

# ТРУДЫ

**ИНСТИТУТА СИСТЕМНОГО  
ПРОГРАММИРОВАНИЯ РАН**

**PROCEEDINGS OF THE INSTITUTE  
FOR SYSTEM PROGRAMMING OF THE RAS**

ISSN Print 2079-8156  
Том 37 Выпуск 2

ISSN Online 2220-6426  
Volume 37 Issue 2

Институт системного  
программирования  
им. В.П. Иванникова РАН

Москва, 2025

**ИСП** **РАН**

## Труды Института системного программирования РАН Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS

**Труды ИСП РАН** – это издание с двойной анонимной системой рецензирования, публикующее научные статьи, относящиеся ко всем областям системного программирования, технологий программирования и вычислительной техники. Целью издания является формирование научно-информационной среды в этих областях путем публикации высококачественных статей в открытом доступе. Издание предназначено для исследователей, студентов и аспирантов, а также практиков. Оно охватывает широкий спектр тем, включая, в частности, следующие:

- операционные системы;
- компиляторные технологии;
- базы данных и информационные системы;
- параллельные и распределенные системы;
- автоматизированная разработка программ;
- верификация, валидация и тестирование;
- статический и динамический анализ;
- защита и обеспечение безопасности ПО;
- компьютерные алгоритмы;
- искусственный интеллект.

Журнал издается по одному тому в год, шесть выпусков в каждом томе.

Поддерживается открытый доступ к содержанию издания, обеспечивая доступность результатов исследований для общественности и поддерживая глобальный обмен знаниями.

**Труды ИСП РАН** реферируются и/или индексируются в:

**Proceedings of ISP RAS** are a double-blind peer-reviewed journal publishing scientific articles in the areas of system programming, software engineering, and computer science. The journal's goal is to develop a respected network of knowledge in the mentioned above areas by publishing high quality articles on open access. The journal is intended for researchers, students, and practitioners. It covers a wide variety of topics including (but not limited to):

- Operating Systems.
- Compiler Technology.
- Databases and Information Systems.
- Parallel and Distributed Systems.
- Software Engineering.
- Software Modeling and Design Tools.
- Verification, Validation, and Testing.
- Static and Dynamic Analysis.
- Software Safety and Security.
- Computer Algorithms.
- Artificial Intelligence.

The journal is published one volume per year, six issues in each volume.

Open access to the journal content allows to provide public access to the research results and to support global exchange of knowledge. **Proceedings of ISP RAS** is abstracted and/or indexed in:



## Редколлегия

**Главный редактор** - [Аветисян Арутюн Ишханович](#), академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор, ИСП РАН (Москва, Российская Федерация)

**Заместитель главного редактора** – [Карпов Леонид Евгеньевич](#), д.т.н., ИСП РАН (Москва, Российская Федерация)

## Члены редколлегии

[Воронков Андрей Анатольевич](#), доктор физико-математических наук, профессор, Университет Манчестера (Манчестер, Великобритания)

[Вирбицкайте Ирина Бонавентуровна](#), профессор, доктор физико-математических наук, Институт систем информатики им. академика А.П. Ершова СО РАН (Новосибирск, Россия)

[Коннов Игорь Владимирович](#), кандидат физико-математических наук, Технический университет Вены (Вена, Австрия)

[Ластовенский Алексей Леонидович](#), доктор физико-математических наук, профессор, Университет Дублина (Дублин, Ирландия)

[Ломазова Ирина Александровна](#), доктор физико-математических наук, профессор, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Москва, Российская Федерация)

[Новиков Борис Асенович](#), доктор физико-математических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный университет (Санкт-Петербург, Россия)

[Петренко Александр Федорович](#), доктор наук, Исследовательский институт Монреаля (Монреаль, Канада)

[Черных Андрей](#), доктор физико-математических наук, профессор, Научно-исследовательский центр CICESE (Энсенада, Баха Калифорния, Мексика)

[Шустер Ассаф](#), доктор физико-математических наук, профессор, Технион — Израильский технологический институт Technion (Хайфа, Израиль)

Адрес: 109004, г. Москва, ул. А. Солженицына, дом 25.

Телефон: +7(495) 912-44-25

E-mail: [info-isp@ispras.ru](mailto:info-isp@ispras.ru)

Сайт: <http://www.ispras.ru/proceedings/>

## Editorial Board

**Editor-in-Chief** - [Arutyun I. Avetisyan](#), Academician of RAS, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor, Ivannikov Institute for System Programming of the RAS (Moscow, Russian Federation)

**Deputy Editor-in-Chief** – [Leonid E. Karpov](#), Dr. Sci. (Eng.), Ivannikov Institute for System Programming of the RAS (Moscow, Russian Federation)

## Editorial Members

[Igor Konnov](#), PhD (Phys.–Math.), Vienna University of Technology (Vienna, Austria)

[Alexey Lastovetsky](#), Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor, UCD School of Computer Science and Informatics (Dublin, Ireland)

[Irina A. Lomazova](#), Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor, National Research University Higher School of Economics (Moscow, Russian Federation)

[Boris A. Novikov](#), Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor, St. Petersburg University (St. Petersburg, Russian Federation)

[Alexandre F. Petrenko](#), PhD, Computer Research Institute of Montreal (Montreal, Canada)

[Assaf Schuster](#), Ph.D., Professor, Technion - Israel Institute of Technology (Haifa, Israel)

[Andrei Tchernykh](#), Dr. Sci., Professor, CICESE Research Centre (Ensenada, Baja California, Mexico).

[Irina B. Virbitskaite](#), Dr. Sci. (Phys.–Math.), The A.P. Ershov Institute of Informatics Systems, Siberian Branch of the RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

[Andrey Voronkov](#), Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor, University of Manchester (Manchester, United Kingdom)

Address: 25, Alexander Solzhenitsyn st., Moscow, 109004, Russia.

Tel: +7(495) 912-44-25

E-mail: [info-isp@ispras.ru](mailto:info-isp@ispras.ru)

Web: <http://www.ispras.ru/en/proceedings>

## С о д е р ж а н и е

Оценка неопределенности в задаче регрессии при байесовской регуляризации решения. <i>Нужный А.С., Савельева Е.А.</i> .....	7
Применения программного обеспечения с открытым исходным кодом для схемотехнического моделирования при разработке аналоговых интегральных микросхем. <i>Кузнецов В.В., Андреев Д.В., Гришин Г.К.</i> .....	19
Методы схемотехнического и топологического синтеза аналоговых интегральных схем по спецификации с использованием методов машинного обучения и дифференцируемого программирования. <i>Щепетов Д.С., Тимошенко А.Г., Гаранжа В.А., Капорин И.Е., Каргин Д.Н.</i> .....	33
Предсказание характеристик СБИС по логической схеме с помощью методов машинного обучения. <i>Лебедев М.С., Дыскина Д.А., Еременко А.Ю., Кабанов Ф.А., Козмин И.А., Петренко Д.М., Прудял Н.Б., Сергеев А.А., Ширинова Р.А.</i> .....	49
Проектирование и развитие механизма мандатного контроля целостности в операционной системе Astra Linux. <i>Девянин П.Н., Старостин А.А., Панов Д.С., Усачев С.В.</i> .....	61
TSAR: инструмент для оценки статических анализаторов. <i>Чибисов К.А., Бучацкий Р.А., Тимонин А.Д., Лазарь В.И., Журихин Д.М., Белеванцев А.А.</i> .....	79
Алгоритм выбора семантических мутаций в фаззинге по принципу серого ящика. <i>Райкин Г.Р., Пелевин М.С., Ицыксон В.М.</i> .....	97
Усовершенствованный поиск архитектур в графовом autoML: расширение и динамическая приоритизация пространства поиска для повышения эффективности. <i>Балабанов Ф.М., Лукьянов К.С.</i> .....	115
Построение гидравлической модели теплообменного аппарата. <i>Байметова Е.С., Королева М.Р.</i> .....	129
Параметрическое исследование эффективности исполнения единичной секции маслоохладителя. <i>Чернова А.А., Шигапова А.Р.</i> .....	141
Численное исследование турбулентного диффузионного пламени на поверхности ПММА на основе открытого пакета FDS. <i>Морар Г., Карпов А.И., Шаклеин А.А.</i> .....	153
Математическое моделирование турбулентного потока жидкости с помощью квазигидродинамических уравнений и модели турбулентности k-omega. <i>Королёва К.С., Потапов И.И.</i> .....	163

О размыве дна, вызванном взвешенной турбулентной струей. <i>Петров А.Г., Потапов И. И.</i> .....	181
Характеристики взаимодействия встречных недорасширенных струй из микросопел. <i>Корепанов М.А., Королева М.Р., Митрюкова Е.А.</i> .....	195
Исследование распространения примеси в среде в одной прикладной осесимметричной задаче. <i>Михайлов Е.А., Тепляков И.О., Виноградов Д.А.</i> .....	207
Поиск именованных сущностей в инструкциях по медицинскому применению лекарственных средств с использованием глубокого обучения и методов обработки естественного языка. <i>Титов Ю.П., Кильмишкин Н.В., Кубраков Д.Д., Иванова П.М.</i> .....	217
Какой статус васюганского варианта хантыйского языка подтверждают вычисления на платформе ЛингвоДок с точки зрения его системных морфологических характеристик? <i>Воробьева В.В., Новицкая И.В.</i> .....	237
Названия украшений в тюркских и финно-угорских языках Урало-Поволжья. <i>Муратова Р.Т.</i> .....	247
Место коми-язьвинского в классификации языков коми на основании фонетических, лексических и морфологических особенностей с помощью программ платформы ЛингвоДок. <i>Баженова О.Н.</i> .....	255
Архитектура системы сбора и извлечения информации для интеллектуальной поисково-аналитической системы. <i>Серенко Д.С., Терентьев Е.Д., Зубарев Д.В., Соченков И.В.</i> .....	263
Модель детекции фибрилляции предсердий, основанная на дифференцировании и сжатии интервалограмм. <i>Марков Н.С.</i> .....	281

**T a b l e o f C o n t e n t s**

Estimation of uncertainty in the regression problem with Bayesian regularization of the solution. <i>Nuzhny A.S., Saveleva E.A.</i> .....	7
FOSS tools usage for circuit simulation in analog IC design. <i>Kuznetsov V.V., Andreev D.V., Grishin G.K.</i> .....	19
Methods of circuit and topological synthesis of analog integrated circuits according to specification using machine learning and differentiable programming methods. <i>Shchepetov D.S., Timoshenko A.G., Garanzha V.A., Kaporin I.E., Kargin D.N.</i> .....	33
Netlist-based ASIC area and delay prediction using machine learning. <i>Lebedev M.S., Dyskina D.A., Eremenko A.Y., Kabanov F.A., Kozmin I.A., Petrenko D.M., Poudial N.B., Sergeev A.A., Shirinova R.A.</i> .....	49
Design and development of mandatory integrity control in Astra Linux OS. <i>Devyanin P.N., Starostin A.A., Panov D.S., Usachev S.V.</i> .....	61
TSAR: Tool for Static Analyzers Ranking. <i>Chibisov K.A., Buchatskiy R.A., Timonin A.D., Lazar V.I., Zhurikhin D.M., Belevantsev A.A.</i> .....	79
Semantic mutation strategy in grey-box fuzzing. <i>Raykin G.R., Pelevin M.S., Itsyson V.M.</i> .....	97
Improved search in graph AutoML: expansion and dynamic prioritization in the search space for enhanced efficiency. <i>Balabanov F.M., Lukyanov K.S.</i> .....	115
Construction of a hydraulic model of a heat exchanger. <i>Baimetova.E.S., Koroleva M.R.</i> .....	129
Parametric study of the performance efficiency of a single oil cooler section. <i>Chernova A.A., Shigapova A.R.</i> .....	141
Numerical Study of the Turbulent Diffusion Flame on the PMMA Surface using FDS. <i>Morar G., Karpov A.I., Shaklein A.A.</i> .....	153
Mathematical modeling of a turbulent fluid flow by using the quasihydrodynamic equations and k-omega turbulence model. <i>Koroliova K.S., Potapov I.I.</i> .....	163
On the erosion of the bottom caused by a suspended turbulent jet. <i>Petrov A.G., Potapov I. I.</i> .....	181
Interaction of opposed underexpanded jets from micronozzles. <i>Korepanov M.A., Koroleva M.R., Mitryukova E.A.</i> .....	195

Research of the propagation of an impurity in a medium in one applied axisymmetric problem.  
*Mikhailov E.A., Teplyakov I.O., Vinogradov D.A.*.....207

Use of deep learning and natural language processing techniques for searching named entities in the medical instructions for use of drugs.  
*Titov Y.P., Kilmishkin N.V., Kubrakov D.D., Ivanova P.M.* .....217

What status of the Vasyugan Khanty vernacular do calculations on the LingvoDoc platform support from the point of view of systemic morphological characteristics?  
*Vorobeva V.V., Novitskaya I.V.* .....237

Names of jewelry in the Turkic and Finno-Ugric languages of the Ural-Volga region.  
*Muratova R.T.*.....247

The Position of the Komi-Yaz'va Idiom in the Komi Languages Based on Phonetic, Lexical, and Morphological Features: Evidence from the LingvoDoc Platform.  
*Bazhenova O.N.* .....255

Architecture of an information collection and extraction system for an intelligent search and analytical platform.  
*Serenko D.S., Terentev E.D., Zubarev D.V., Sochenkov I.V.*.....263

A Model for Atrial Fibrillation Detection Based on Differentiation and Compression of Interbeat Interval Sequences.  
*Markov N.S.* .....281

DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(2)-1



## Оценка неопределенности в задаче регрессии при байесовской регуляризации решения

*А.С. Нужный, ORCID: 0000-0003-3319-2523 <nuzhny@ibrae.ac.ru>*

*Е.А. Савельева, ORCID: 0000-0002- 6562-8750 <esav@ibrae.ac.ru>*

*Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН,  
Россия, 115191, г. Москва, ул. Большая Тульская, д.52.*

**Аннотация.** Рассматривается проблема оценки неопределенности в задаче регрессии. Решение задачи регрессии в данной работе ищется в виде ряда из базисных функций. Коэффициенты при базисных функциях подбираются путем минимизации суммы среднеквадратичной ошибки аппроксимации искомой функцией данных обучающего множества и регуляризационного слагаемого, смысл которого в наложении ограничений на множество решений. Добавление регуляризационного слагаемого – один из способов борьбы с математической некорректностью задачи. Регуляризационное слагаемое состоит из штрафного функционала и регуляризационного множителя, который является дополнительным параметром регрессионной модели. Байесовский подход к оценке оптимального значения регуляризационного множителя дает возможность получить его непосредственно из данных, как наиболее правдоподобное. Выбор регрессионной модели в виде ряда базисных функций из заданного набора позволяет сократить высокую вычислительную стоимость байесовского подхода за счет замены итерационной процедуры, используемой для модели общего вида, аналитическими выражениями. В процессе поиска регуляризационного множителя байесовский подход вычисляет оценку неопределенности получаемого решения. Корректность данной оценки является предметом текущего исследования. Предложенный подход к оценке неопределенности тестируется на модельных данных, зашумленных искусственным шумом. Показывается, что полученная предлагаемым методом оценка величины шума, дает хорошее совпадение со значением, заданным при генерации данных. Точность предлагаемого метода превосходила на модельных примерах точность используемого для оценки неопределенности набора данных Гамма-теста.

**Ключевые слова:** оценка неопределенности; задача регрессии; байесовская регуляризация.

**Для цитирования:** Нужный А.С., Савельева Е.А. Оценка неопределенности в задаче регрессии при байесовской регуляризации решения. Труды ИСП РАН, том 37, вып. 2, 2025 г., стр. 7–18. DOI: 10.15514/ISPRAS–2025–37(2)–1.

# Estimation of Uncertainty in the Regression Problem with Bayesian Regularization of the Solution

A.S. Nuzhny, ORCID: 0000-0003-3319-2523 <nuzhny@ibrae.ac.ru>

E.A. Saveleva, ORCID: 0000-0002- 6562-8750 <esav@ibrae.ac.ru>

*Nuclear safety institute of the Russian Academy of Sciences,  
52, Bolshaya Tulkaya Street, Moscow, 115191, Russia*

**Abstract.** The work considers the estimation of uncertainty of the regression model. The regression model is sought as a linear combination of basic functions. Coefficients in the linear combination are selected by minimizing the sum of the root-mean-square error of the approximation on the training set and the regularization term, which imposes restrictions on the set of solutions. Using a regularization term is one of the ways to combat the mathematical incorrectness of the problem. The regularization term consists of a penalty function and a regularization factor, which is an additional parameter of the regression model. The Bayesian approach allows to estimate the optimal value of the regularization factor directly from the data as being the most plausible. Constructing a regression model as a linear combination of basic functions (from a predefined set) allows us to reduce the high computational cost of the Bayesian approach by replacing the general iterative procedure by analytical expressions. A byproduct of estimating the regularization factor by Bayesian approach is the uncertainty of the regression model. The correctness of this assessment is the main subject of this research. The proposed approach of the uncertainty estimation is tested on the synthetic artificially noisy data. The proposed method estimated the noise magnitude close to the value used during data generation. The accuracy of the proposed method has outperformed the accuracy of the Gamma test, approach widely used to estimate uncertainty incorporated into the set of data.

**Keywords:** uncertainty estimation; regression problem; Bayesian regularization.

**For citation:** Nuzhny A.S., Saveleva E.A. Estimation of uncertainty in the regression problem with Bayesian regularization of the solution. *Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS*, vol. 37, issue 2, 2025. pp. 7-18 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(2)-1.

## 1. Введение

В работе рассматривается проблема оценки неопределенности результатов в задаче регрессии [1], которая относится к классу задач, известному в литературе, как «обучение с учителем». Задача регрессии формулируется следующим образом: дано множество примеров соответствия значений скалярной функции  $y$  ее векторным аргументам  $\vec{x}$ :

$$D = \{\vec{x}_i, y_i\}_{i=1}^L, \quad (1)$$

где  $L$  – число таких примеров. Требуется по этим примерам построить зависимость между множествами  $X$  и  $Y$ :

$$y' = f(\vec{x}, \vec{a}),$$

где  $\vec{a}$  – адаптивные параметры модели. На практике зависимость между входами  $X$  и выходами  $Y$  описывается не точно, а с некоторой невязкой  $\eta = y - y'$ , то есть:

$$y = f(\vec{x}, \vec{a}) + \eta$$

что обуславливается несколькими причинами [2]:

1. данные (1) представляют собой экспериментальные измерения, неточность которых связана с приборной и методической ошибкой;
2. не все факторы, влияющие на выходное значение, присутствуют во входной информации;
3. отображение входного множества в выходное не является гладким.

Оценка неопределенности прогноза представляется практически важной задачей, поскольку данный показатель характеризует степень достоверности результата. Другим важным практическим приложением оценки неопределенности является подбор наиболее значимых

входных переменных – наиболее информативная комбинация переменных имеет наименьшую неопределенность [2].

Многие методы регрессии решают задачу построения отображения  $X$  в  $Y$ , не поднимая вопрос оценки точности построенного конечного отображения (например, нейронные сети [3], градиентный бустинг [4], случайный лес [5] и т. д.). При этом существуют методы (например, кригинг [6], гауссовы процессы [7-8]), которые одновременно с прогнозом значения целевой переменной дают оценку локальной (в оцениваемой точке) неопределенности этого прогноза. Другие методы решают задачу оценки неопределенности в данных не локально, а в среднем по всей выборке [2]. В данной работе задача оценки неопределенности рассматривается, как оценка в среднем по выборке.

Задача регрессии в ее традиционной постановке, как и большинство обратных задач является некорректной. Один из способов борьбы с некорректностью – регуляризация обучения, когда адаптивные параметры модели  $\vec{a}$  находятся путем минимизации ошибки обучения совместно со стабилизирующим членом  $\Omega$  [9]:

$$(y - f(\vec{x}, \vec{a}))^2 + \lambda \Omega(\vec{a})$$

При этом в байесовском подходе [1, 10-11] регуляризационный множитель  $\lambda$  подбирается исходя из множества обучающих данных (1), как имеющий максимальное правдоподобие. Попутно, байесовский подход позволяет оценить неопределенность результата модели. Идея такой оценки неопределенности не нова [11], однако она не получила широкого распространения ввиду вычислительной затратности самого байесовского подхода к оценке регуляризационного множителя. В [1,10] предложены математические решения, позволяющие обойти проблему затратности вычислений в случае использования модели на основе базисных функций, что делает такой подход практически интересным в том числе и для оценки неопределенности в данных.

Подход имеет линейную зависимость вычислительной сложности от числа точек  $L$ , что делает его привлекательным с прикладной точки зрения. Для сравнения, вычислительная сложность обсуждаемого в работе [2] гамма-теста, метода оценки уровня внутренней неопределенности набора данных, зависит от числа точек  $L$  в данных (1), как  $O(L \log L)$  [2]. Кроме того, проведенные эксперименты показали, что оценка неопределенности, даваемая предлагаемым методом в среднем более релевантна, чем оценка Гамма-теста, которая склонна к консервативному завышению.

В работе предполагается, что неопределенность в данных – случайная величина  $\eta$ , распределенная по нормальному закону:

$$p(\eta) = \frac{1}{Z_\eta} \exp\left(-\frac{\eta^2}{2\sigma^2}\right), \quad (2)$$

что на практике достаточно часто соответствует действительности. В таком случае величину неопределенности можно характеризовать параметром гауссовского распределения  $\sigma$ .

В данной работе метод байесовской регуляризации обучения адаптирован к задаче оценки неопределенности и опробован на синтетических примерах с искусственно зашумленными данными, а также применен для оценки неопределенности реальных данных мониторинга уровня грунтовых вод и выпадения осадков. Полученные оценки неопределенности сравнивались с оценками, полученными с помощью Гамма-теста [2].

## 2. Подход к моделированию аппроксимирующей функции

Для построения модели аппроксимации функции необходимо сделать ряд предположений относительно данных и вида модели. Во-первых, как было упомянуто выше (2), будем считать, что неопределенность в данных имеет нормальное распределение, т.е. вероятность появления значения  $y_i$  для аргумента  $\vec{x}_i$  запишется следующим образом:

$$p(y_i|\vec{x}_i) = \frac{1}{Z_X} \exp\left(-\beta(y_i - f(\vec{x}_i, \vec{a}))^2\right),$$

А вероятность появления всей выборки (1):

$$p(D) = \frac{1}{Z_X} \exp\left(-\beta \sum_{i=1}^L (y_i - f(\vec{x}_i, \vec{a}))^2\right) \quad (3)$$

Здесь  $Z_X$  – нормировочный коэффициент,  $\beta$  – гиперпараметр модели. Это наиболее часто используемое предположение о характере шума в данных [1-2, 7].

Во-вторых, необходимо сделать предположения относительно внешнего вида функции  $f(\vec{x}_i, \vec{a})$ . Будем искать ее в виде линейной комбинации базисных функций  $\{\psi_n(\vec{x})\}_{n=1}^N$ ,

$$y = \sum_{n=1}^N a_n \psi_n(\vec{x}),$$

где  $N$  – число используемых базисных функций,  $a_n$  – определяемые в процессе обучения параметры модели. В качестве базисных функций могут выступать любые наборы независимых функций (тригонометрические функции, функции радиального базиса, Эрмит-Гауссовы функции и т.п.)

Максимизация вероятности (3) приведет к методу подбора параметров модели  $\vec{a}$ , известному, как метод наименьших квадратов:

$$\vec{a} = \operatorname{argmin} \sum_{i=1}^L \left( y_i - \sum_{n=1}^N a_n \psi_n(\vec{x}_i) \right)^2 \quad (4)$$

В такой постановке задача является математически некорректной [1], т.е. имеющей множество решений. Для приведения задачи к корректной можно наложить дополнительные ограничения на множество решений – применить регуляризацию [9]. Формально регуляризация сводится к замене функционала (4) регуляризационным функционалом, содержащим дополнительное слагаемое

$$\vec{a} = \operatorname{argmin} \left( \sum_{i=1}^L \left( y_i - \sum_{n=1}^N a_n \psi_n(\vec{x}_i) \right)^2 + \lambda \Omega(a_n) \right) \quad (5)$$

Здесь необходимо сделать третье предположение, касающееся вида регуляризационного функционала. В данной работе возьмем его в гауссовой форме, это одна из наиболее распространенных форм для штрафных функционалов:

$$\Omega(a_n) = \sum_{n=1}^N a_n^2 \quad (6)$$

При таком выборе функционала задача поиска параметров модели  $\vec{a}$  при заданном  $\lambda$  сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений [1].

Регуляризационный множитель  $\lambda$  в (5) [1] играет важную роль: большое значение этого параметра соответствует сильным ограничением на множество допустимых решений, маленькое – слабым. При слишком сильном ограничении на множество решений модель теряет свою гибкость и не может с хорошей точностью описать данные, при излишне слабых – задача поиска параметров модели остается некорректной. Таким образом определение оптимального значения  $\lambda$  является отдельной проблемой [1, 10-11].

Функционалом (6) мы фактически задаем априорную вероятность для каждой возможной функции из множества решений:

$$p(f) = \frac{1}{Z_A} \exp\left(-\alpha \sum_{n=1}^N a_n^2\right), \quad (7)$$

где  $Z_A$  – нормировочный коэффициент, а  $\alpha$  – еще один гиперпараметр модели.

Вероятность выбора параметров модели для описания данных (1), в нашем случае коэффициентов разложения по базисным функциям, записывается через формулу Байеса:

$$p(D|f) = \frac{p(D|f) p(f)}{p(D)} \quad (8)$$

Максимизация вероятности  $p(D|f)$  по параметрам  $a_n$  эквивалентна минимизации регуляризационного функционала (5) и дает оптимальные значения коэффициентов  $a_n$  при заданных гиперпараметрах  $\alpha$  и  $\beta$  (из формул (7) и (3) соответственно). Математически, максимизация (8) по  $a_n$  также сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений [1]. При этом регуляризационный множитель может быть выражен через гиперпараметры функций вероятностей:

$$\lambda = \frac{\alpha}{\beta}$$

Гиперпараметры также, как и коэффициенты при базисных функциях, могут быть определены на основе обучающей выборки, как наиболее правдоподобные путем максимизации по ним знаменателя формулы (8) –  $p(D)$  [1, 10-11].

В работе [1] было показано, что можно избежать вычислительных трудностей и лишних допущений при поиске параметров  $\alpha$  и  $\beta$ , если путем линейного преобразования перейти к ортонормальному базису – базису, для которого свертки векторов значений в точках обучающего множества ортонормированы:

$$\sum_{i=1}^L \psi_n(\vec{x}_i) \psi_m(\vec{x}_i) = \delta_{m,n} \quad (9)$$

В этом случае оптимальные значения гиперпараметров вычисляются по аналитическим выражениям:

$$\alpha = \frac{1}{2} \frac{L - N}{\frac{L}{N} S - \bar{y}^2}, \quad \beta = \frac{1}{2} \frac{L - N}{\bar{y}^2 - S} \quad (10)$$

где

$$S = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^L (y_i \psi_n(\vec{x}_i))^2, \quad \bar{y}^2 = \sum_{i=1}^L y_i^2$$

Как видно из (3)  $\beta$  является параметром, характеризующим неопределенность предсказания модели. Он связан с дисперсией величины отклонения предсказания от истинного значения  $\sigma$  следующей формулой:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{2\beta}} \quad (11)$$

Таким образом, получив в процессе построения аппроксимирующей функции параметр  $\beta$  через выражение (10), можно использовать его для оценки неопределенности полученного результата.

В итоге процедура оценки неопределенности в данных сводится к следующему алгоритму:

- выбираем семейство базисных функций, вычисляем значения базисных функций в точках обучающей выборки;
- строим ортогонализирующее преобразование, которое позволяет получить новые базисные функции, удовлетворяющие условию (9);
- по формулам (10) – (11) вычисляем оценку неопределенности.

3. Эксперименты

Выше уже говорилось, что неопределенность в задаче регрессии складывается из естественного шума в данных и недостатка информации для построения зависимости входов от выходов. В отличие от второго фактора первый мы можем моделировать, задав в функции, генерирующей данные, случайную компоненту. Цель проведения серии численных экспериментов на искусственных данных состоит в том, чтобы показать, что вычисленное по формулам (10) и (11) значение дисперсии ошибки аппроксимации согласуется с искусственно заданным при генерации данных значением неопределенности. Т.е. в экспериментах считаем, что неопределенность состоит только из шумовой компоненты.

3.1 Аппроксимация одномерных данных

Рассмотрим функцию, моделирующую отображение одномерного множества  $X$  в  $Y$ :

$$f = 10exp\left(-\frac{x^2}{2A^2}\right)\cos^2(x) + \sigma_0\xi,$$
 (12)

где  $\xi$  – случайная нормально распределенная величина с нулевым средним и единичной дисперсией, параметр  $A = 10$ . С помощью выражения (12) были сгенерированы обучающие примеры (1) с разными значениями параметра шума  $\sigma_0$ . В каждом эксперименте генерировалось по 100 обучающих точек. При воссоздании отображения по этим примерам в качестве базисных функций использовались тригонометрические функции и функции радиального базиса [10]. В табл. 1 приведены результаты оценки, полученные с использованием этих базисов, оценка, полученная с помощью Гамма-теста, а также истинные значения шума  $\sigma_0$ , заданные при генерации точек функцией (12). В скобках указаны относительные ошибки оценки величины шума.

Табл. 1. Заданные и оцененные значения ошибки.

Table 1. Set and estimated error values.

Номер эксперимента	Истинное значение $\sigma_0$	Оцененное моделью с тригонометрическим базисом значение $\sigma$	Оцененное моделью с ФРБ значение $\sigma$	Оценка Гамма-теста
1	0	7.108e – 8	3.05e-5	0.31
2	0.5	0.495 (1%)	0.51 (2%)	0.52 (4%)
3	1	1.02 (2%)	0.95 (5%)	1.18 (18%)
4	2	1.97 (1.5%)	2.03 (1.5%)	2.08 (4%)

На рис. 1 приведены результаты аппроксимации функции по сгенерированным точкам при значениях  $\sigma_0$  равных а) 0, б) 0.5, в) 1, г) 2 моделью с тригонометрическим базисом.

3.2 Аппроксимация двумерных данных

Далее рассмотрим отображение двумерных данных  $X$  на скалярное множество  $Y$ :

$$f = 10exp\left(-\frac{x_1^2 + x_2^2}{2A^2}\right)\left(\sin^2(x_1) + \sin^2\left(\frac{x_2}{2}\right)\right) + \sigma_0\xi,$$
 (13)

где  $\xi$  – случайная нормально распределенная величина с нулевым средним и единичной дисперсией, параметр  $A = 10$ . Была проведена серия экспериментов: с помощью выражения (13) генерировалось 500 точек, после чего по этим точкам с помощью метода базисных функций восстанавливалось отображение  $X$  в  $Y$ . В качестве базисных функций брались двумерные тригонометрические и радиальные базисные функции. В экспериментах варьировался параметр шума  $\sigma_0$ . Оцененное значение величины шума  $\sigma$  сравнивалось с заданным  $\sigma_0$ . Результаты некоторых оценок, сопоставленные с исходным уровнем шума в

данных приведены в табл. 2. В скобках указаны относительные отклонения оценки метода от заданного в эксперименте значения величины шума.

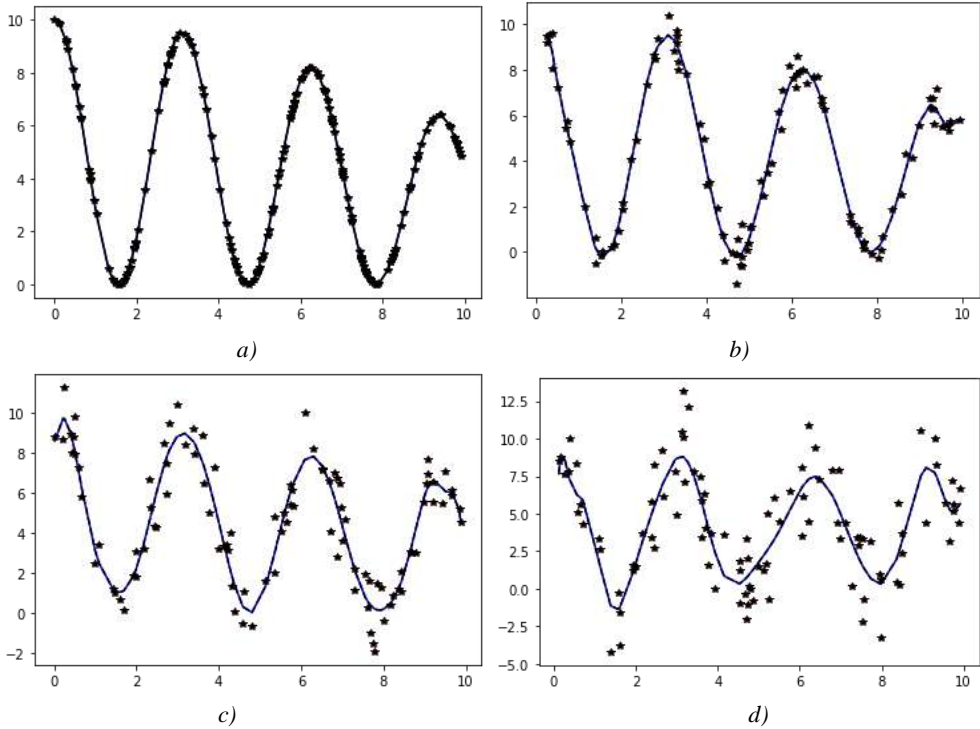


Рис. 1. Аппроксимация одномерных данных при а)  $\sigma = 0$ , б)  $\sigma = 0.5$ , в)  $\sigma = 1$ , д)  $\sigma = 2$ .

Fig. 1. One-dimensional data approximation at при а)  $\sigma = 0$ , б)  $\sigma = 0.5$ , в)  $\sigma = 1$ , д)  $\sigma = 2$ .

Табл. 2. Заданные и оцененные значения ошибки в экспериментах с двумерными данными.

Table 2. Set and estimated error values in two-dimensional data experiments.

Номер эксперимента	Истинное значение $\sigma$	Оцененное моделью с тригонометрическим базисом значение $\sigma$	Оцененное моделью с ФРБ значение $\sigma$	Оценка Гамма-теста
1	0	0.00025	0.049	0.3
2	0.5	0.506 (1.2%)	0.505 (1%)	0.65 (30%)
3	1	1.02 (2%)	1.05 (5%)	1.07 (7%)
4	2	1.97 (1.5%)	2.01(0.5%)	2.06 (3%)

На рис. 2 приведены результаты аппроксимации двумерных данных, сгенерированных функцией (13) с уровнем шума 0 и 1.

Всего было подготовлено 150 случайных выборок данных (75 одномерных – по формуле (12) и 75 двумерных по формуле (13)) с показателями шума 0.5, 1 и 2. В табл. 3 приведены значения средней по всем экспериментам относительной ошибки (MAPE):

$$MAPE = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \frac{|\sigma^j - \sigma_0^j|}{\sigma_0^j}$$

Здесь  $J$  – число проведенных экспериментов.

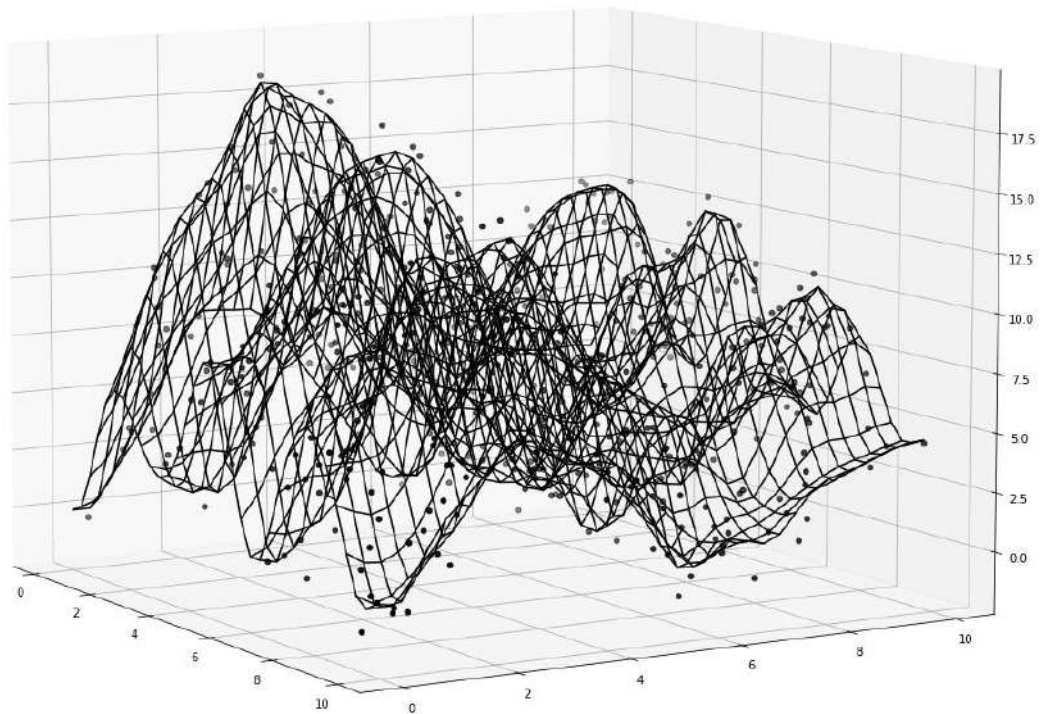
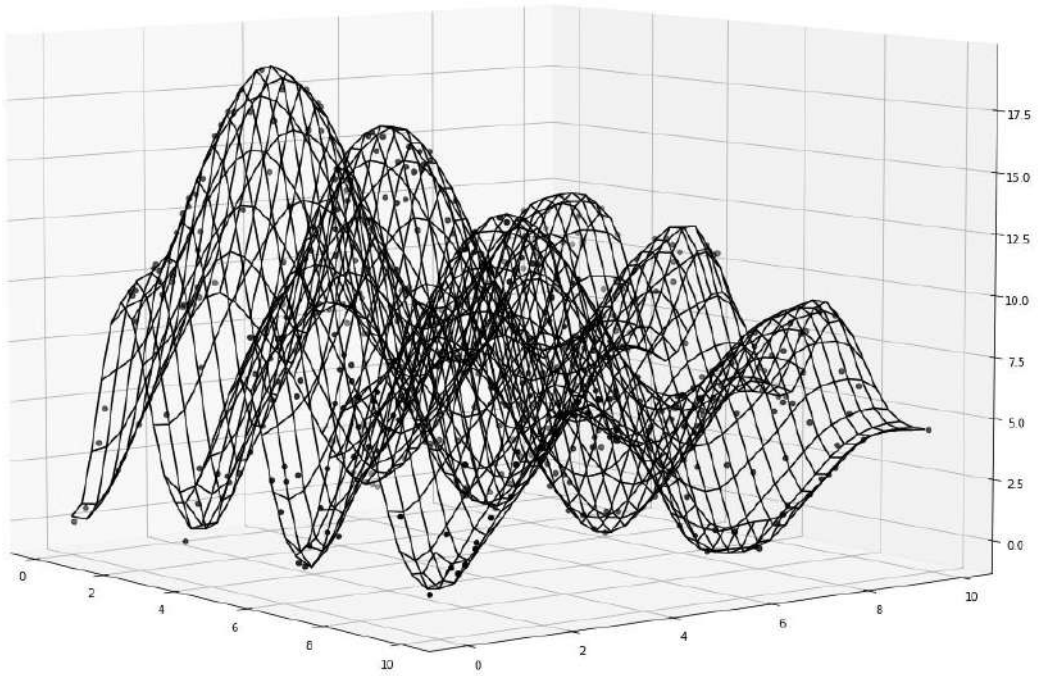


Рис. 2. Аппроксимация данных, сгенерированных функцией (11) с параметром шума  
а)  $\sigma = 0$ ; б)  $\sigma = 1$  с помощью функций радиального базиса.  
Fig. 2. Approximation of data generated with function (11) with noise parameter  
а)  $\sigma = 0$ ; б)  $\sigma = 1$  using radial basis function.

Табл. 3. Показатели точности определения значения неопределенности.

Table 3. The indicators of accuracy of uncertainty estimation.

	Модель с тригонометрическим базисом	Модель с ФБР	Гамма-тест
MAPE	0.048	0.049	0.1

В проведенной серии экспериментов байесовский метод оценки неопределенности показал себя, как более точный по сравнению с гамма-тестом, который демонстрирует склонность к завышению уровня шума.

### 3.3 Оценка неопределенности в реальных данных

На рис. 3 приведены результаты аппроксимации значений ежемесячного мониторинга уровней грунтовых вод в 3-х скважинах (рис. 3а, 3б, 3с) и выпадения осадков (рис. 3д) с помощью тригонометрического базиса. Уровни грунтовых вод, как и осадки измеряются в сантиметрах. По оси абсцисс отложено время в месяцах от начала измерений. При оценке уровня шума в данных предполагается, что он имеет гауссову природу и может характеризоваться параметром  $\sigma$  (2).

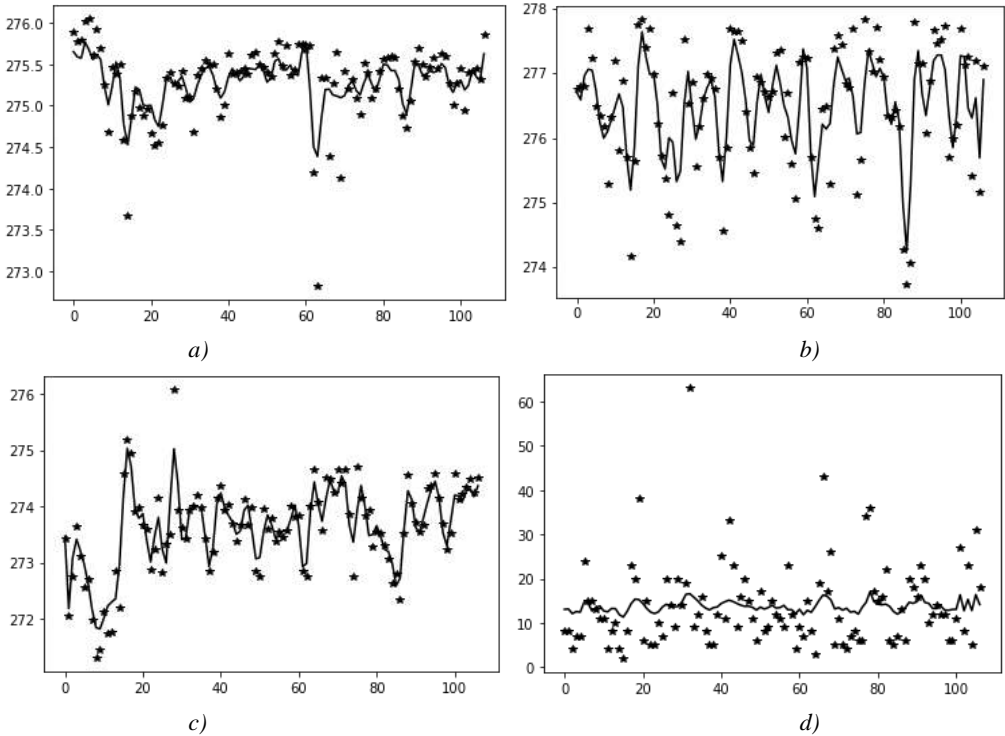


Рис. 3. Результаты аппроксимации графиков уровней грунтовых вод – а), б), в) и графика выпадения осадков – г).

Fig. 3. The results of the approximation of the groundwater levels – a), b), c) and the precipitation – d).

Из внешнего вида графиков можно констатировать, что уровни грунтовых вод достаточно сильно зашумлены, однако модель все-таки выявляет в них некоторые закономерности. В данных же по осадкам модель видит практически только белый шум.

В табл. 4 приведены оценки уровня шума  $\sigma$ , полученные моделями с тригонометрическим базисом и базисом радиальных функций, а также оценки, полученные с помощью Гамма-теста [2]. Указано абсолютное значение шума  $\sigma$  и рядом в скобках приведено значение, нормированное на дисперсию оцениваемой величины.

Табл. 4. Оценки неопределенности в гидрогеологических данных.

Table 4. Estimates of uncertainty in hydrogeological data.

Данные	Байесовская модель с тригонометрическим базисом	Байесовская модель с функциями радиального базиса	Гамма-тест
Скважина1	0.39(0.83)	0.35(0.75)	0.35(0.76)
Скважина2	0.67(0.67)	0.73(0.74)	0.77(0.77)
Скважина3	0.45(0.57)	0.44(0.57)	0.5(0.62)
Осадки	8.99(0.95)	8.45(0.9)	8.67(0.92)

Здесь можно говорить о близости оценки неопределенности, полученных байесовским методом и Гамма-тестом.

4. Заключение

В работе рассмотрен метод оценки неопределенности в задаче аппроксимации функции по точкам. Для тестирования данного метода была проведена серия экспериментов на искусственно сгенерированных данных, зашумленных случайным нормально распределенным шумом. Уровень зашумленности регулировался параметром функции, генерирующей данные. Эксперименты показали хорошее совпадение между исходным параметром шума  $\sigma_0$ , заданным при генерации данных, и полученной оценкой  $\sigma$ . Предлагаемый метод превзошел по точности традиционно используемый для задачи оценки неопределенности Гамма-тест.

С помощью описанного подхода была проведена оценка неопределенности в данных гидрогеологических наблюдений. Результат также сравнивался с оценкой, полученной с помощью Гамма-теста. В данном примере два подхода показали хорошую согласованность. Следует отметить, что вычислительная затратность предложенного метода линейно растет с ростом числа данных в то время, как Гамма-тест имеет зависимость от числа данных  $O(L \log L)$ .

Список литературы / References

[1]. Нужный А.С. Регуляризация Байеса при подборе весовых коэффициентов в ансамблях предикторов. Труды ИСП РАН, том 31, вып. 4, 2019 г., стр. 113-120. DOI: 10.15514/ISPRAS2019-31(4)-7 / Nuzhny A.S. Bayes regularization in the selection of weight coefficients in the predictor ensembles. Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS, vol. 31, issue 4, 2019. pp. 113-120 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2019-31(4)-7

[2]. Antonia J. Jones, Dafydd Evans, Steve Margetts, Peter M. Durrant. The Gamma Test. Chapter IX in Heuristic and Optimization for Knowledge Discovery. Edited by Ruhul Sarker, Hussein Abbass and Charles Newton. Idea Group Publishing, Hershey, PA. 2002.

[3]. Гудфеллоу Я., Бенджио И., Курвилль А. Глубокое обучение / пер. с англ. А. А. Слинкина. – 2-е изд., испр. – М.: ДМК, Пресс, 2018., 652с. / Ian Goodfellow, Yoshua Bengio, and Aaron Courville: Deep learning: The MIT Press, 2016, 800 pp, ISBN: 0262035618

[4]. Friedman J.H. Greedy function approximation: a gradient boosting machine // The Annals of Statistics. – 2001. – Vol. 29, no. 5. – P. 1189–1232.

[5]. Hastie, T., Tibshirani R., Friedman J. Chapter 15. Random Forests // The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. — 2nd ed. — Springer-Verlag, 2009. — 746 p.

[6]. В. В. Демьянов, Е. А. Савельева, ГЕОСТАТИСТИКА теория и практика, Москва, Наука, 2010, 227с. / V.V. Demyanov, E.A. Saveleva, GEOSTATISTICS theory and practice, Moscow, Nauka, 2010, 227p (in Russian)

- [7]. Rasmussen, C. E. and C. K. I. Williams. *Gaussian Processes for Machine Learning*. MIT Press. Cambridge, Massachusetts, 2006.
- [8]. Z. Chen, B. Wang, How priors of initial hyperparameters affect Gaussian process regression models, *Neurocomputing* 275 (2018) 1702–1710.
- [9]. А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин. Методы решения некорректных задач. Изд. 2-е. – М.: Наука, 1979, 285с. / A.N. Tichonov, V.Ya. Arsenin. The methods for solving ill-passed problems, Moscow, Nauka, 1979, 285p. (in Russian)
- [10]. А.С. Нужный. Байесовский подход к регуляризации задачи обучения сети функций радиального базиса // Искусственный интеллект и принятие решений, 2015, №2, сс. 18-24. / A.S. Nuzhny, Bayesian approach to regularization for training task of radial basic function network // Artificial intelligent and decision making, 2015, №2, pp. 18-24. (in Russian)
- [11]. D. MacKay. Bayesian interpolation // *Neural Computation*, 1992, v.4, p.415–447.

## **Информация об авторах / Information about authors**

Антон Сергеевич НУЖНЫЙ – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ИБРАЭ РАН, доцент национального исследовательского университета МФТИ. Сфера научных интересов: искусственный интеллект, некорректные задачи, оптимальное управление, интеллектуальный анализ информации.

Anton Sergeevich NUZHNY, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher at IBRAE RAS, Associate Professor at the National Research University MIPT. Research interests: artificial intelligence, ill-passed problems, optimal control, data manning.

Елена Александровна САВЕЛЬЕВА – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией Института проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. Сфера научных интересов: геостатистика, искусственный интеллект, интеллектуальный анализ информации, оценка чувствительности расчетных моделей к их параметрам.

Elena Aleksandrovna SAVELEVA, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Head of Laboratory in Nuclear Safety Institute RAS. Research interests: geostatistics, artificial intelligence, data manning, sensitivity analysis.



DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(2)-2



## FOSS Tools Usage for Circuit Simulation in Analog IC Design

*V.V. Kuznetsov, ORCID: 0000-0002-5738-555X <vadim.kuznetsov@bmstu.ru>*

*D.V. Andreev, ORCID: 0000-0001-9080-1028 <dmitrii\_andreev@bmstu.ru>*

*G.K. Grishin, ORCID: 0009-0002-1279-4699 <grishin\_gr@mail.ru>*

*Electronic engineering department, Bauman Moscow State Technical University,  
Building 1, 5, 2nd Baumanskaya st., Moscow, 105005, Russia.*

**Abstract.** Circuit simulation is an important part of the microelectronics design flow. This paper presents a design flow using Qucs-S circuit simulation tool with Ngspice or QucsatorRF backend. This solution may be targeted to both academic and industrial applications. Qucs-S combines a modern graphical user interface and a computation power of open-source circuit simulation kernels like Ngspice, QucsatorRF, and XYCE. The article provides an overview of Qucs-S software architecture and its application for integrated circuits design. The proposed workflow is illustrated by example of the semiconductor resistors parameter extraction and corner analysis using the mentioned open-source tools.

**Keywords:** computer-aided design (CAD); electronic design automation (EDA); microelectronics; circuit simulation; compact modelling.

**For citation:** Kuznetsov V.V., Andreev D.V., Grishin G.K. FOSS tools usage for circuit simulation in analog IC design. Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS, vol. 37, issue 2, 2025, pp. 19-32. DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(2)-2.

**Acknowledgements.** The research was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as a part of the project FSN-2024-0086.

## **Применения программного обеспечения с открытым исходным кодом для схемотехнического моделирования при разработке аналоговых интегральных микросхем**

*В.В. Кузнецов, ORCID: 0000-0002-5738-555X <vadim.kuznetsov@bmstu.ru>*

*Д.В. Андреев, ORCID: 0000-0001-9080-1028 <dmitrii\_andreev@bmstu.ru>*

*Г.К. Гришин, ORCID: 0009-0002-1279-4699 <grishin\_gr@mail.ru>*

*Кафедра проектирования и технологии производства электронной аппаратуры,  
Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана,  
Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, с. 1.*

**Аннотация.** Моделирование схем является неотъемлемой частью процесса проектирования микроэлектронных устройств. В статье представлен процесс проектирования с использованием инструмента для моделирования Qucs-S с Ngspice или QucsatorRF в качестве движка моделирование. Данное ПО может быть использовано как в академических, так и в промышленных целях. Qucs-S сочетает в себе современный графический интерфейс и движки для моделирования, такие как Ngspice, QucsatorRF и XYCE. В статье представлен обзор программной архитектуры Qucs-S и ее применения для проектирования интегральных схем. Предлагаемый рабочий процесс проиллюстрирован на примере извлечения параметров полупроводниковых резисторов и углового моделирования с использованием упомянутых инструментов с открытым исходным кодом.

**Ключевые слова:** автоматизированное проектирование (CAD); автоматизация проектирования электроники (EDA); микроэлектроника; моделирование микросхемы; компактное моделирование.

**Для цитирования:** Кузнецов В.В., Андреев Д.В., Гришин Г.К. Применения программного обеспечения с открытым исходным кодом для схемотехнического моделирования при разработке аналоговых интегральных микросхем. Труды ИСП РАН, том 37, вып. 2, 2025 г., стр. 19–32 (на английском языке). DOI: 10.15514/ISPRAS–2025–37(2)–2.

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Госзадания FSFN-2024-0086.

### **1. Introduction**

Circuit simulation is an important part of the electronic hardware design flow in the modern industry. The first circuit simulator called SPICE [1] was developed by Laurence Nagel from Berkeley University in 1973. The most of the modern circuit simulation software share the SPICE netlist syntax and its computation algorithms. The electronic components vendors are sharing the SPICE models for their integrated circuits (IC) and discrete devices. So, the SPICE became an industrial standard for circuit simulation and models interchange. There exists a number of open-source SPICE-compatible circuit simulation backends developed by international community. The most famous are Ngspice (licensed under BSD) or XYCE (licensed under GPL). The both tools operate in the command line (CLI) accepting the plain text netlist as input and providing the text or binary dataset as the output. Ngspice provides a postprocessing language called Nutmeg for manipulation with the simulation data. The both CLI tools mentioned above have a good simulation speed, performance, and device models compatibility and therefore recommended by Google for their free Skywater 130nm process design kit (PDK) for IC design. There is no need to develop another open-source simulation engine from scratch.

But the CLI circuit simulation tools are lacking the graphical user interface (GUI). Development of the unified GUI that allows fast simulation backend switching is an important task in free open-source (FOSS) circuit simulation tools development. Besides proprietary circuit simulation software

there exists a number of open source or freeware solutions with graphical user interface (GUI) summarized in the Table 1.

The table compares a number of existing circuit simulation tools. Only freeware proprietary and FOSS tools are compared. The MicroCAP circuit simulation tool is abandonware, because the Spectrum Software company has discontinued its development, but it remains free to download. The main disadvantage of both Ltspice and MicroCAP is that they are Windows-only. The KiCAD is not a circuit simulation software, but PCB design suite. But KiCAD contains extensions that allow to simulate schematic using Ngspice. Xschem is recommended by Google as the Ngspice frontend for their 130nm PDK. The main advantage of this tools is that it allows unlimited hierarchical cells design that is important for microelectronics. Other tools may have hierarchical levels limitation. No one of the freeware and open-source circuit simulation tools provide an advanced features for the radio frequency (RF) circuit simulation and compact modelling features. These features are implemented in the simulation backend level. There exists a need to develop a tool that brings these features to the GUI level.

Table 1. Circuit simulation tools comparison.

	Qucs-S	KiCAD	MicroCAP	LTSpice	XSchem
License	GPL	GPL	Abandonware	Freeware	GPL
Platform	Cross-platform	Cross-platform	Windows	Windows	Cross-platform
Simulation backends	Ngspice, Xyce, QucsatorRF	Ngspice	Proprietary SPICE	Proprietary SPICE	Ngspice
Hierarchical design	Subcircuits	Subcircuits	Subcircuits	Subcircuits	Unlimited cells
RF extensions	S-parameter; Transmission lines models; Smith charts	Not supported	Not supported	Not supported	Not supported
Postprocessor	Nutmeg, Qucs equations	No postprocessor	Proprietary	Proprietary	Nutmeg
Export to PCB	Not supported	Implemented	Not supported	Not supported	Not supported
Compact modelling	Verilog-A support using OpenVAF; Verilog-A synthesizer	Not supported	Not supported	Not supported	Not supported
Simulation backend switching	Quick switch from GUI	Not supported	Not supported	Not supported	Not supported

Qucs-S is based on the “Quite universal circuit simulator” Qucs [2], [3] project that was established by M. Margraf and S. Jahn in 2001. The Qucs was originally designed as radio frequency (RF) and microwave circuit simulator and had its own SPICE incompatible simulation kernel called Qucsator. This simulation engine had a number of unique features like scattering matrix and harmonic balance

analysis. Later the Qucsator was extended for simulation of general-purpose circuits but its time-domain analysis performance remained very poor compared to kernels based on SPICE. The Qucs-S [4] was forked from original Qucs project around 2017. Qucs-S is distributed under general public license (GPL) version two and cross-platform. It can operate on Linux, Windows, and FreeBSD platforms.

The purpose of Qucs-S fork was to bring SPICE compatibility, because SPICE netlist syntax remains an industrial standard. Qucs-S has switched from Qucsator to Nspice [5] opens-source simulation kernel as default simulation kernel to provide SPICE compatibility. Another open-source SPICE compatible simulation kernel XYCE [6] could be selected as optional.

The QucsatorRF simulation kernel is kept for RF and microwave circuits analysis [7]. It is distributed with Qucs-S package and doesn't require a separate installation. The QucsatorRF is fork of the abandoned Qucsator simulation kernel. QucsatorRF is maintained by Qucs-S developers now. This simulation kernel is not SPICE-compatible and uses netlist syntax different from SPICE. The internal architecture of the QucsatorRF allows to define S-parameter matrix of the device in the C++ level model. This simulator provides for example microstrip lines models taking into account frequency dependency effects and dispersion. These models are not available for SPICE.

Besides a GUI for command line SPICE simulation kernels Qucs-S provides an advanced compact modeling features like Verilog-A models synthesizer [6] and OpenVAF compiler integration that allows using it for academic applications.

2. Tool architecture overview

The architecture of the Qucs-S is shown in the block diagram Fig. 1. The tool consists of the schematic capture and visualization system that operates on GUI level and SPICE circuit simulation engine that operate on the CLI level.

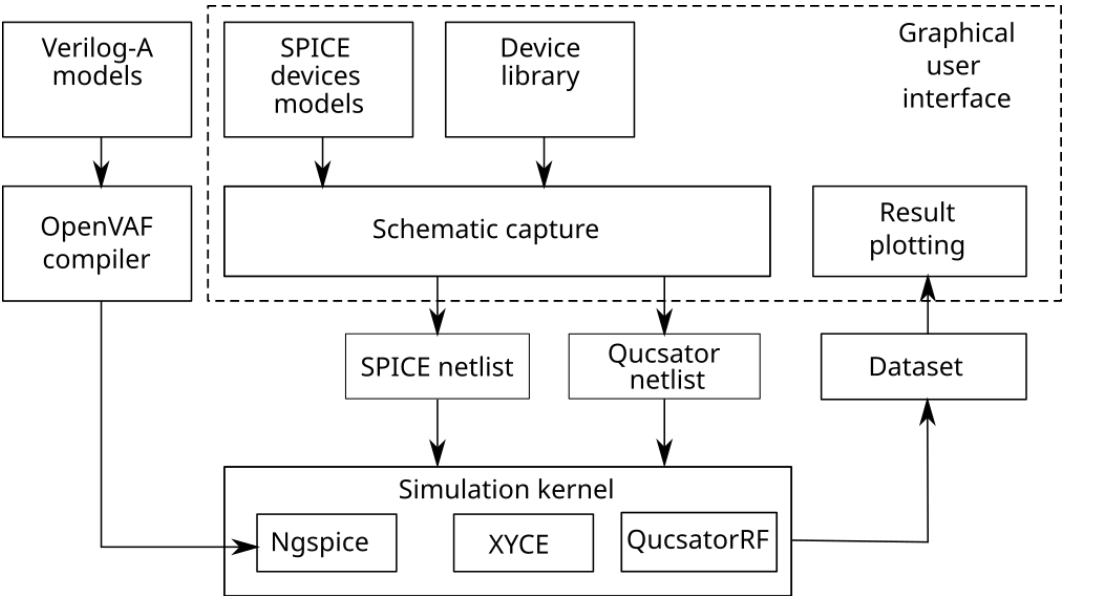


Fig. 1. Qucs-S software architecture.

A user enters circuit data using the GUI schematic capture, and then the tool automatically generates netlist that is passed to Nspice or XYCE circuit simulation kernel. Qucs-S doesn't contain an internal SPICE engine, but provides a user interface to external SPICE-compatible simulators. The legacy Qucsator simulation kernel and its netlist syntax also could be selected for backward

compatibility. After the simulation is finished the waveform data is saved to dataset which is parsed by the GUI to plot the waveform. Qucs-S supports not only SPICE models but also Verilog-A models that are could be linked to SPICE simulation kernel using the open-source OpenVAF compiler [8].

The main window of the Qucs-S application is shown in the Fig. 2. Arrows are not the GUI design elements, but indicate the key elements of the interface. Plain text XML format is used for saving schematic and libraries. This allows to write an extensions like schematic synthesizers. The devices, equations, simulations and diagrams are represented as the graphical objects that are placed on the schematic field (pointed by arrows, see the Fig. 2). It is possible to build hierarchical schematics using subcircuits and library devices. Qucs-S allows users to construct SPICE device definitions from a name, a model specifier and a SPICE style modelcard. These can be attached to a schematic symbol and passed directly to a SPICE kernel. Fig. 3 illustrates the construction of a SPICE netlist entry for a bipolar junction transistor (BJT) device. Arrows indicate the connection between the schematic editor GUI elements and SPICE netlist directives.

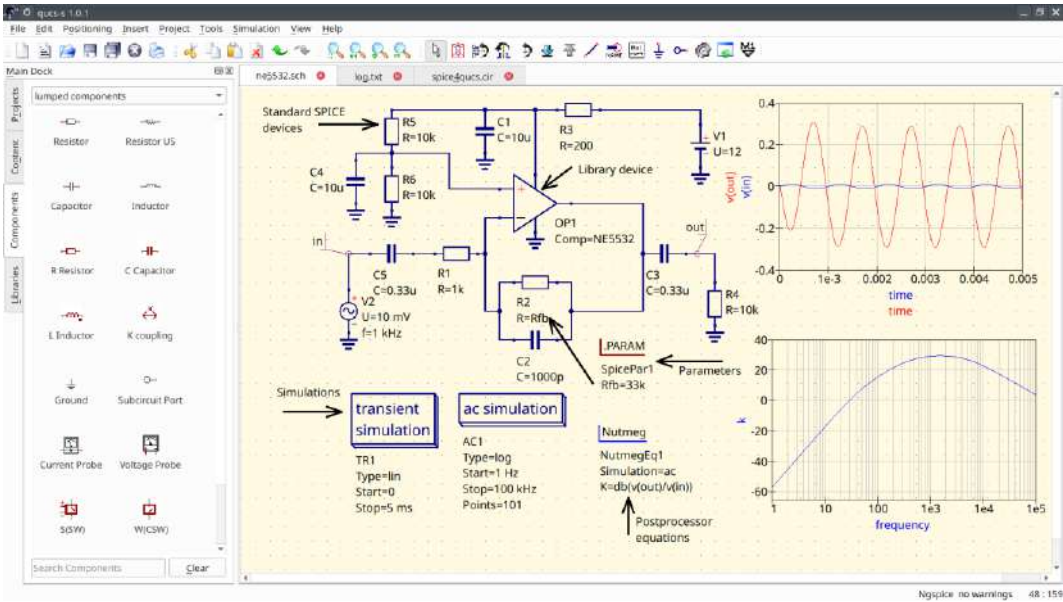


Fig. 2. Qucs-S application main window.

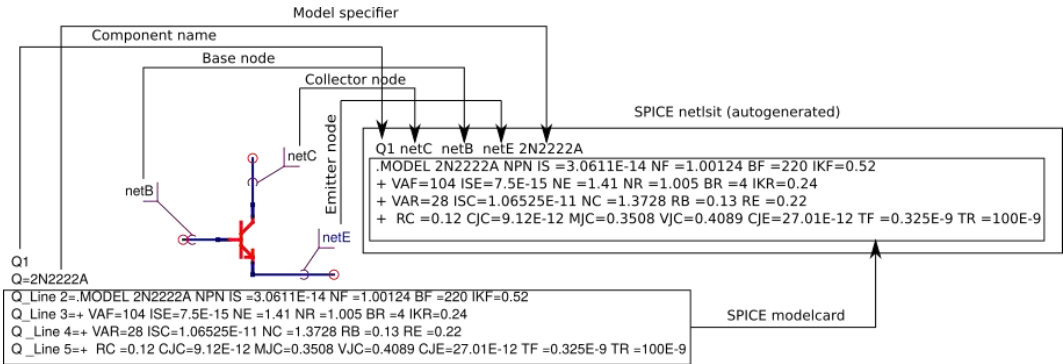


Fig. 3. Construction of a SPICE netlist entry for BJT.

Qucs-S is cross-platform application and is written in C++ using Qt6 toolkit. The block diagram representing the C++ classes hierarchy and its interaction is shown in the Fig. 4. The components

representing devices and simulations are represented as the C++ classes. The class properties are holding the SPICE parameters. The netlist generator is also represented as C++ class. Ngspice and XYCE both are SPICE-compatible but has some difference in netlist syntax. The common SPICE netlist routines are implemented in the AbstractSpiceKernel class. The simulation kernel specific is implemented in the inherited classes. The interaction between the simulation kernel and GUI is implemented using the standard Qt signal/slot mechanics. Qucs-S supports the mechanics of quick switching of the simulation kernel without of the restart of the application.

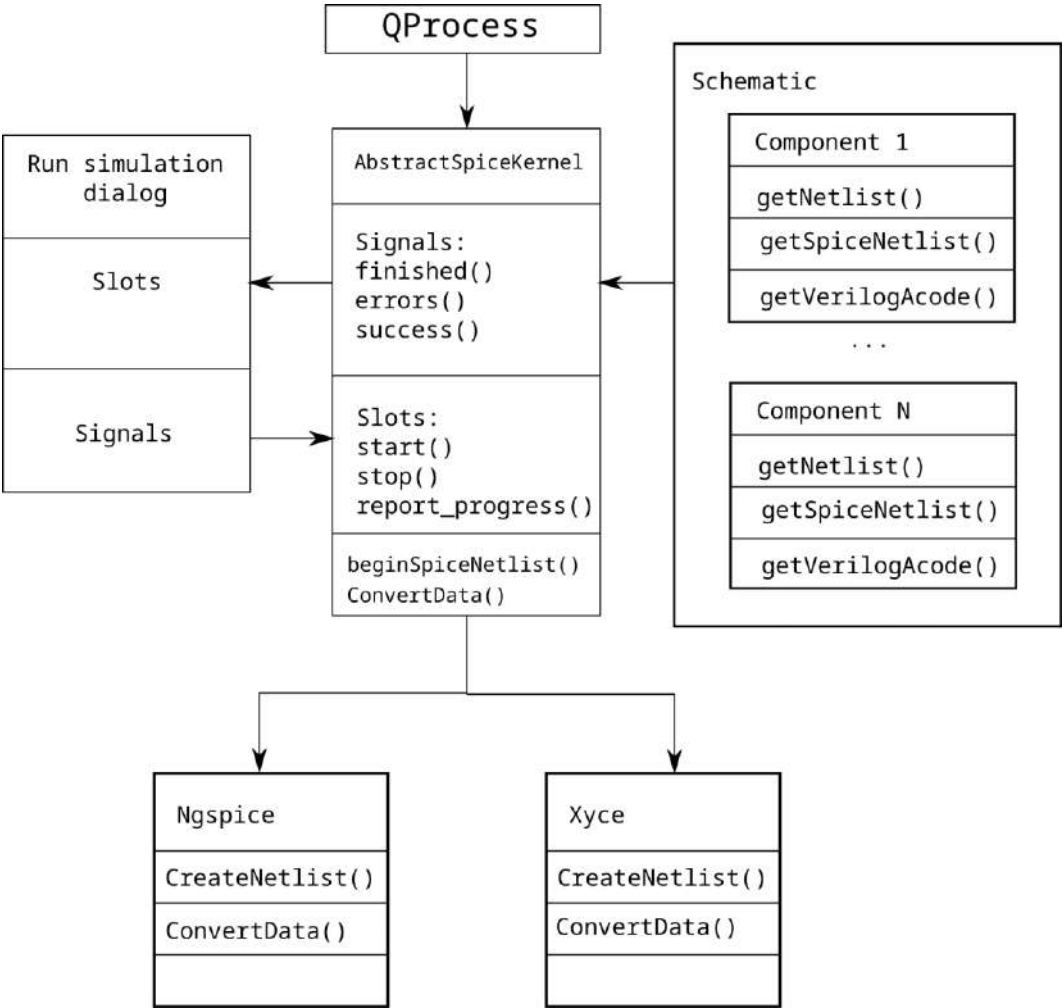


Fig. 4. Qucs-S C++ classes inheritance and interaction diagram.

Qucs-S provides a set of system library devices designed to provide a support of microelectronic process design kits (PDK) [8]. These library devices allow to assign SPICE letter, pin number, modelcard name, and model parameters. Qucs-S supports the simulation using both Google Skywater 130nm [9] and IHP open BiCMOS [10] PDKs. The Fig. 5 illustrates the integration of Google Skywater 130nm models in Qucs-S schematic document. The MOSFET models are taken from the library that is indicated by arrow. The Ngspice is used as the simulation kernel [11]. Besides the PDKs support Qucs-S has a number of RF simulation features like transmission line models, S-parameter and harmonic balance simulation, Smith charts.

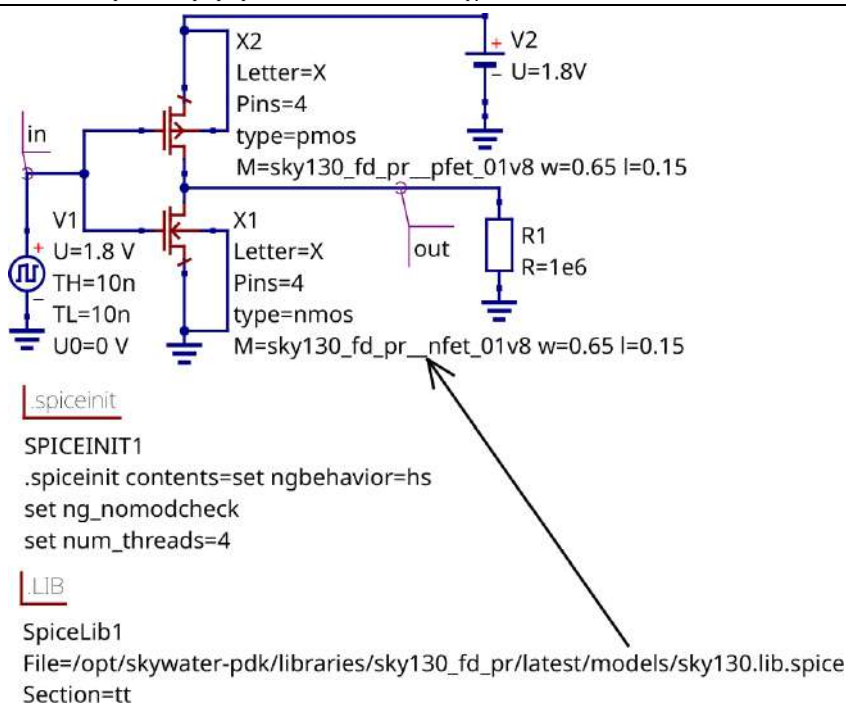


Fig. 5. CMOS IC design using Skywater PDK.

### 3. Compact modelling features

#### 3.1 Verilog-A synthesizer

Verilog-A language has become an industrial standard (IEEE1364-2005) for building semiconductor devices models. The usage of the Verilog-A allows to add new semiconductor devices models without the modification of the simulation engine source.

The existing Verilog-A models could be integrated in Qucs-S using OpenVAF compiler and Nspgpc simulator link. Qucs-S provides a number of advanced features for compact modeling. The arbitrary nonlinear device could be represented as unified equation defined device (EDD). This device is described by the system of  $N$  equations representing current and charge of the device branches. The current  $I_k$  and charge  $Q_k$  of the  $k$ -th branch may depend on branch voltage  $V_k$ . Current equation for  $k$ -th branch is the following:

$$I_k = f_k(V_1, \dots, V_N, I_1, \dots, I_N) \quad (1)$$

Charge equation for  $k$ -th branch is the following:

$$Q_k = h_k(V_1, \dots, V_N, I_1, \dots, I_N) \quad (2)$$

This equation set could be automatically converted to the Verilog-A current contribution:

$$I_k^{VA} = I_k + \frac{dQ_k}{dt} \quad (3)$$

Qucs-S application contains an automated Verilog-A synthesizer. A subcircuit containing nonlinear EDD devices and passive primitive RCL devices could be converted to a Verilog A module. The block diagram shown in the Fig. 6 explains the Verilog-A synthesizer algorithm.

Verilog-A synthesizer operates similar to SPICE netlist builder. The synthesizer allows to build compact models as subcircuit combined from primitive blocks and then debug it using the tools of

circuit simulation kernel. The passive devices and sources are described by current-voltage dependency that is converted to Verilog-A current contribution operator by the synthesizer. It is possible to synthesize such complex compact models as EKV MOSFET model [12] or Angelow GaN HEMT model [13].

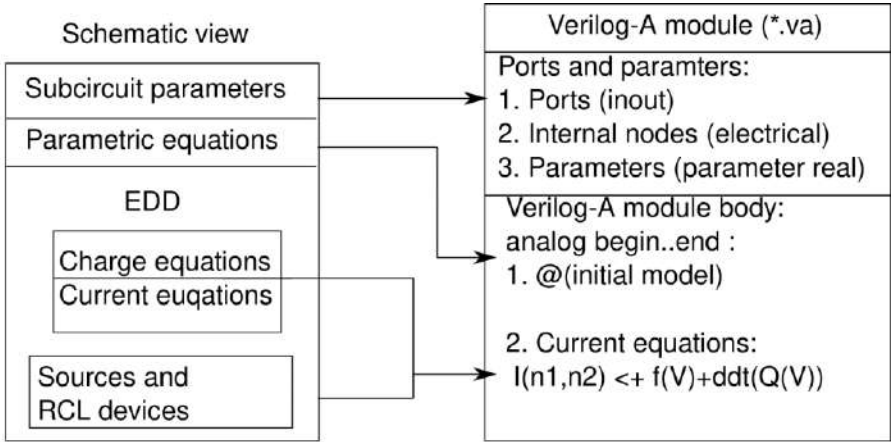


Fig. 6. The mapping of Qucs schematic and Verilog-A module.

3.2 Qucs-S, Ngspice, and OpenVAF compact model integration workflow

The Qucs-S allows to construct a new device using a special component named SPICE generic device and scripting features. This component allows to define a device with a dynamically allocated pin number and mapped to a required SPICE letter, like N for OpenVAF device. This device may be wrapped in a subcircuit. Fig. 7 illustrates this process. The tunnel diodes use Esaki model [14].

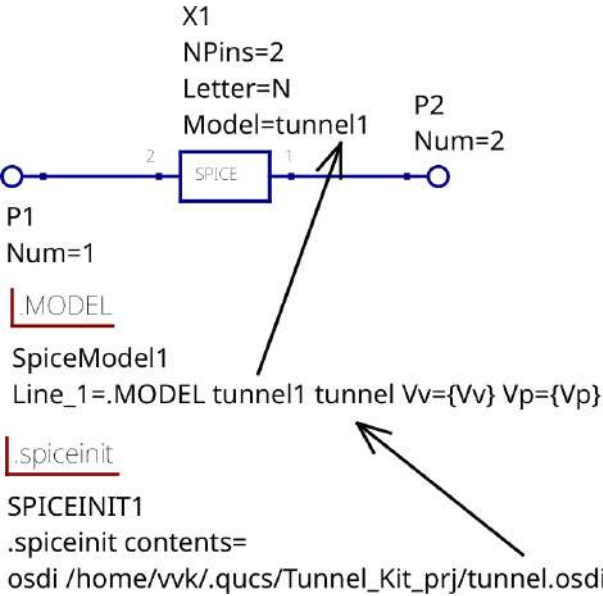


Fig. 7. Definition of subcircuit referencing OSDI module.

This device could be simulated using usual simulation procedure. The testbench schematic and IV-curve of the tunnel diode using the Verilog-A model is shown in the Fig. 8 and 9 respectively.

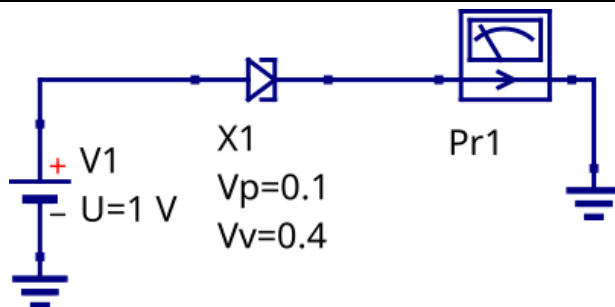


Fig. 8. Tunnel diode testbench schematic.

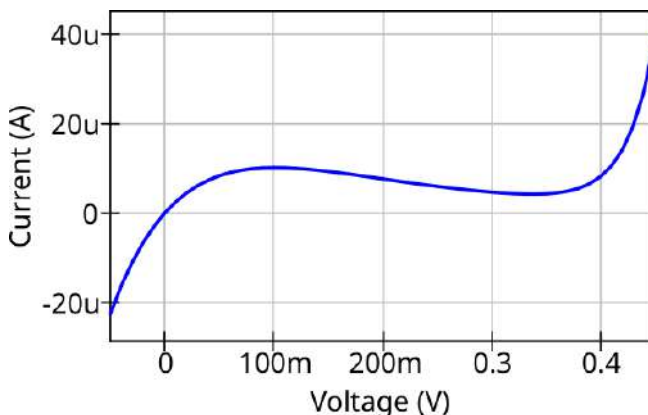


Fig. 9. Simulated tunnel diode IV-curve.

## 4. Semiconductor resistor modelling taking into account temperature dependency

### 4.1 Diffusion resistor model extraction

The simulation of the bipolar reference IC requires taking into the account temperature dependency of the diffusion resistors. The diffusion resistor SPICE model is described by the following equations:

$$R = R_{SH} \left( \frac{L}{W} \right) T_F \quad (4)$$

$$T_F = 1 + TC_1(T - T_{nom}) + TC_2(T - T_{nom})^2 \quad (5)$$

where the  $R_{SH}$  is the sheet resistance at the nominal temperature  $T_{nom}$  and  $TC_1$ ,  $TC_2$  are the temperature coefficients.

This model is fully supported by Qucs-S with Ngspice backend. The model parameters could be extracted solving this equation system numerically using the experimental data. The simulated and measured resistance temperature dependencies are shown in the Fig. 10. The Qucs-S testbench schematic and extracted SPICE model with parameters are shown in the Fig. 11.

The measurement was done using a test structure containing 12 diffusion resistors. The temperature was swept in range from -60°C to 125°C. The extraction of the  $R_{SH}$ ,  $TC_1$ ,  $TC_2$  parameters was made from averaged resistance temperature dependency curve. The simulation shows a fitting of extracted model and measurement data within 1% tolerance. The extracted model was used for the design of the bipolar current reference.

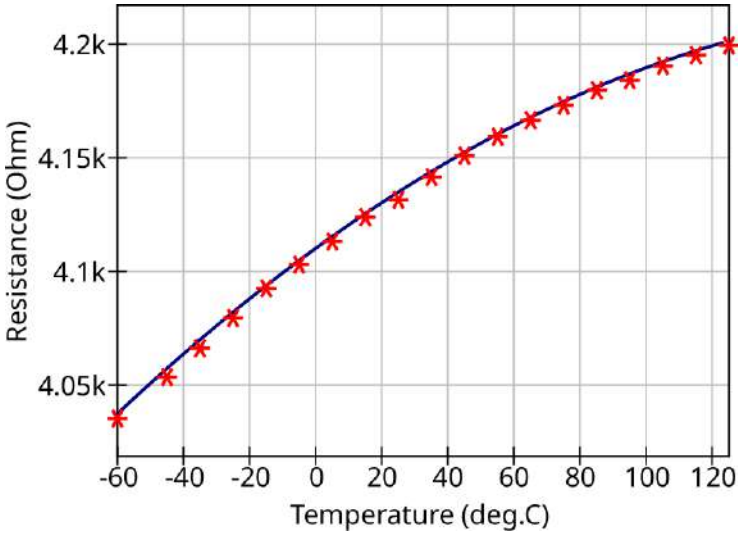


Fig. 10. Measured (stars) and simulated (solid line) temperature dependency of the diffusion resistor.

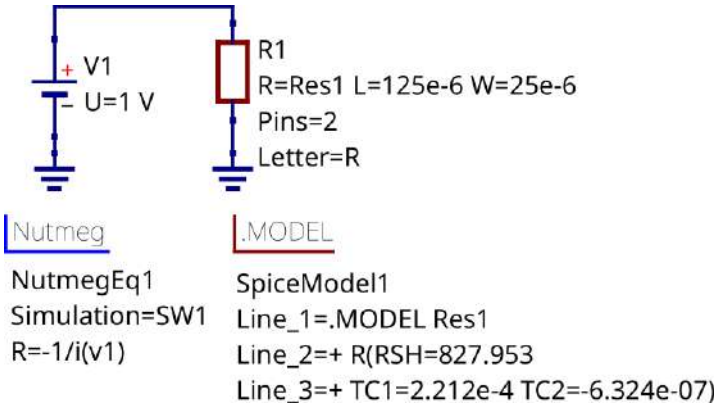


Fig. 11. Diffusion resistor testbench schematic.

## 4.2 Corner analysis of schematic with polysilicon resistors

Let's consider how to implement a corner analysis [15] using open-source tools. Corner analysis allows to make investigation of the worst case process parameters on the circuit performance. The testbench schematic implementing corner analysis using the Qucs-S is shown in the Fig. 12.

The library RPOLY contains three sets of polysilicon resistors models (minR, maxR, typ). The model parameters were extracted using the procedure described in the section IV-A. The extracted models should be placed in an appropriate section of the model library. The Qucs-S provides full supports of the sectioned libraries. The content of the library is shown in the listing 1.

The result of the temperature sweep using corner analysis testbench schematic is shown in the Fig. 13. The corner analysis was used for design of current reference ICs.

## 5. Conclusion

The open-source circuit simulation tool Qucs-S has been considered in this paper. The main advantage of this tool is that is free and open-source. The open model of the software development allows any individual or industrial user to request a new feature or propose a patch containing

improvement or bugfix. The system devices library provides a good compatibility with open microelectronic PDKs. Other advantages are the switchable simulation kernel and good support of the SPICE-3f5 standard and Verilog-A compact models using OpenVAF compiler. The QucsatorRF simulation kernel allows to use advanced RF and microwave devices models. The Verilog-A synthesizer allows to easily debug and build compact models which is especially important for academic users. The scripting and postprocessing subsystem allow use the proposed tools for model parameter extraction and new simulation construction like corner analysis. Summarizing all above we can conclude that the proposed workflow may serve as the replacement of the proprietary circuit simulation tools for educational tasks and for operation with open PDKs.

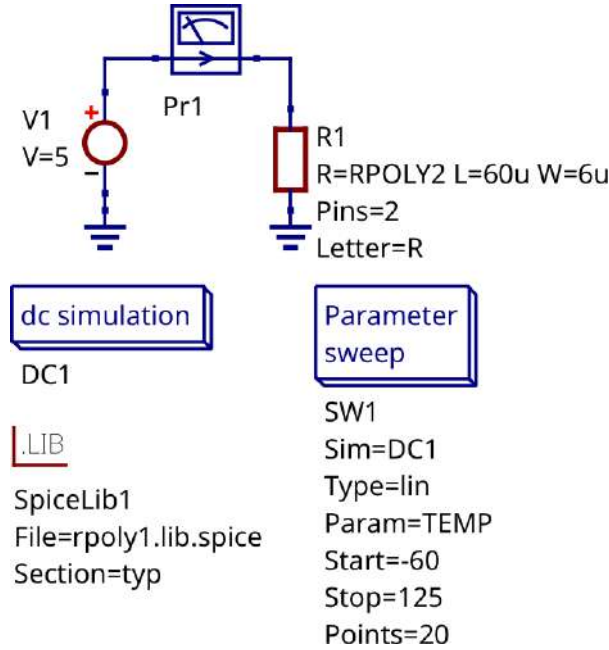


Fig. 12. Corner simulation testbench schematic.

```
* Typical corner
. LIB typ
.MODEL RPOLY2 R(RSH=1400, TC1=-0.0014, TC2=3.6E-6)
. ENDL
* min RSH corner
. LIB minR
.MODEL RPOLY2 R(RSH=1200, TC1=-0.0014, TC2=3.6E-6)
. ENDL
* max RSH corner
. LIB maxR
.MODEL RPOLY2 R(RSH=1400, TC1=-0.0014, TC2=3.6E-6)
. ENDL
```

Listing 1. The sectioned SPICE library containing the corner model.

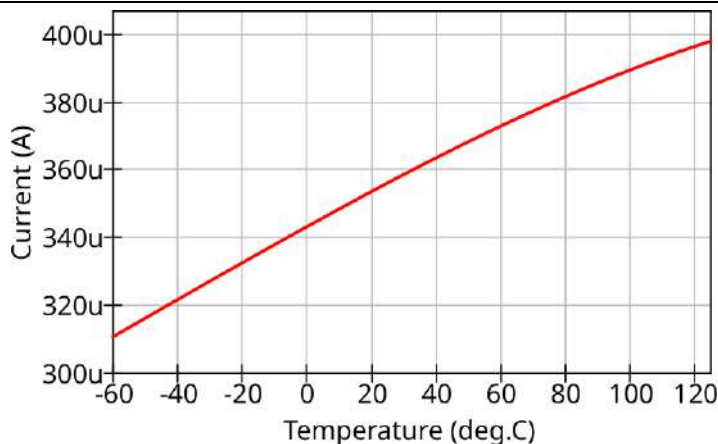


Fig. 13. Temperature dependency obtained from corner simulation.

## References

- [1]. A. Vladirmirescu, "Shaping the history of SPICE," *IEEE Solid State Circuits Magazine*, vol. 3, no. 2, pp. 36–39, 2011. doi: 10.1109/MSSC.2011.942105.
- [2]. S. Jahn and M. Brinson, "Interactive compact device modelling using Qucs equation-defined devices," *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, vol. 21, no. 5, pp. 335–349, 2008. doi: 10.1002/jnm.676.
- [3]. M. Brinson and S. Jahn, "Qucs: A GPL software package for circuit simulation, compact device modelling and circuit macromodelling from dc to rf and beyond," *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, vol. 22, no. 4, pp. 297–319, 2009. doi: 10.1002/jnm.702.
- [4]. M. Brinson and D. Tomaszewski, "Advances in Qucs-S schematic capture for SPICE and Verilog-A device modelling and circuit simulation," in *2022 29th International Conference on Mixed Design of Integrated Circuits and System (MIXDES)*. IEEE, 2022. doi: 10.23919/MIXDES55591.2022.9838038 pp. 27–32.
- [5]. F. Lannutti, P. Nenzi, and M. Olivieri, "KLU sparse direct linear solver implementation into NGSPICE," in *Proceedings of the 19th International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems MIXDES 2012*. IEEE, 2012, pp. 69–73.
- [6]. M. Brinson and F. Salfelder, "Compact device modeling and simulation with Qucs/Qucs-S/Xyce modular libraries," in *2021 28th International Conference on Mixed Design of Integrated Circuits and System*. IEEE, 2021. doi: 10.23919/MIXDES52406.2021.9497545 pp. 35–40.
- [7]. I. V. Chukhraev and V. E. Drach, "Parameter optimization of broadband interference-suppressing filters of hi-performance power supplies," in *2023 5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE)*, vol. 5. IEEE, 2023. doi: <https://doi.org/10.1109/REEPE57272.2023.10086788> pp. 1–5.
- [8]. D. V. Andreev, G. G. Bondarenko, V. V. Andreev and S. A. Loskutov, "Programmable set to monitor charge state change of MIS devices under high-fields," *2022 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT)*, Moscow, Russian Federation, 2022, pp. 1-3, doi: 10.1109/MWENT55238.2022.9802396.
- [9]. P. Kuthe, M. Müller, and M. Schröter, "VerilogAE: An open source Verilog-A compiler for compact model parameter extraction," *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, vol. 8, pp. 1416–1423, 2020. doi: 10.1109/JEDS.2020.3023165.
- [10]. P.-C. Medinceanu and M. Enachescu, "Open Skywater130nm PDK based IP development platform: A PWM peripheral case study," in *2024 IEEE 22nd Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON)*. IEEE, 2024. doi: 10.1109/MELECON56669.2024.10608632 pp. 856-861.
- [11]. K. Herman, R. Scholz, and S. Andreev, "Reflections on the first european open source PDK by IHP-experiences after one year and future activities," in *2024 31st International Conference on Mixed Design of Integrated Circuits and System (MIXDES)*. IEEE, 2024. doi: 10.23919/MIXDES62605.2024.10614043 pp. 19–22.

- [12]. I. V. Chukhraev and V. E. Drach, "Investigation of factors, affecting the behaviour of Id–Vg shift in MOSFET," in 2024 6th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). IEEE, 2024. doi: <https://doi.org/10.1109/REEPE60449.2024.10479923> pp. 1–5.
- [13]. M. E. Brinson and V. Kuznetsov, A new approach to compact semiconductor device modelling with Qucs Verilog-A analogue module synthesis. *Int. J. Numer. Model.*, vol. 29: pp. 1070–1088., 2016 doi: 10.1002/jnm.2166.
- [14]. M. E. Brinson and V. Kuznetsov Extended behavioural device modelling and circuit simulation with Qucs-S. *International Journal of Electronics*, vol. 105(3), pp. 412–425. doi:10.1080/00207217.2017.1357764
- [15]. M. Lotfi and D. Zohir, "Pspice implementation of a new esaki tunnel diode macro-model," *International Journal of Smart Home*, vol. 10, no. 4, pp. 153–166, 2016. doi: 10.14257/ijsh.2016.10.4.15.
- [16]. G. Rappitsch, E. Seebacher, M. Kocher, and E. Stadlober, "SPICE modeling of process variation using location depth corner models," *IEEE transactions on semiconductor manufacturing*, vol. 17, no. 2, pp. 201 213, 2004. doi: 10.1109/TSM.2004.826940.

## **Информация об авторах / Information about authors**

Вадим Вадимович КУЗНЕЦОВ – кандидат технических наук, доцент кафедры Проектирование и технология электронных средств МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сфера научных интересов: разработка САПР для схемотехнического моделирования, разработка аналоговых микросхем, воздействие электростатического разряда на полупроводниковые приборы.

Vadim Vadimovich KUZNETSOV – Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Electronic engineering department of the Bauman Moscow State Technical University. His research interests include open-source circuit simulation software development, analog ICs design, ESD robustness of microelectronic devices.

Дмитрий Владимирович АНДРЕЕВ – кандидат технических наук, доцент кафедры Проектирование и технология электронных средств МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сфера научных интересов: разработка аналоговых микросхем, физика МДП-структур, физическое моделирование полупроводниковых приборов.

Dmitrii Vladimirovich ANDREEV – Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Electronic engineering department of the Bauman Moscow State Technical University. His research interests include analog ICs design, MOS structures physics, the physical modelling of the semiconductor devices.

Григорий Константинович ГРИШИН – студент магистратуры кафедры Проектирование и технология электронных средств МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сфера научных интересов: свойства материалов, разработка и производство аналоговых микросхем.

Grigorii Konstantinovich GRISHIN is a Master student of the electronic engineering department of the Bauman Moscow State Technical University. His research interests include properties of materials, development and production of analog chips.





# Методы схемотехнического и топологического синтеза аналоговых интегральных схем по спецификации с использованием методов машинного обучения и дифференцируемого программирования

<sup>1</sup> Д.С. Щепетов, ORCID: 0009-0005-3562-6374 <dshchepetov@synth-cad.ru>

<sup>2</sup> А.Г. Тимошенко, ORCID: 0000-0002-2018-165X <timoshenko@org.miet.ru>

<sup>1</sup> В.А. Гаранжа, ORCID: 0000-0002-8376-756X, <garan@ccas.ru>

<sup>1</sup> И.Е. Капорин, ORCID: 0000-0002-1451-1632 <igorkaporin@mail.ru>

<sup>3</sup> Д.Н. Каргин, ORCID: 0009-0002-7394-0370 <dmitry.n.kargin@synth-cad.ru>

<sup>1</sup> Федеральный исследовательский центр "Информатика и управление" РАН,  
Россия, 119333, г. Москва, Вавилова, д.44, кор.2.

<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,  
Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1.

<sup>3</sup> Московский политехнический университет,  
Россия, 107023, г. Москва, ул. Б. Семёновская, д. 38.

**Аннотация.** Задача разработки принципиальной электрической схемы, возникающая при создании аналоговых интегральных схем, сформулирована как задача оптимизации дифференцируемой гладкой функции с помощью комбинации методов дифференцируемого программирования и методов машинного обучения. Показано, что такой подход позволяет достичь требований спецификации и предложить оптимальную комбинацию схемотехнических шаблонов, составляющих аналоговую интегральную схему, без привлечения методов комбинаторной оптимизации и обучения с подкреплением. Показано, что такой подход дает значительные преимущества по скорости по сравнению с традиционными методами, основанными на обучении с подкреплением. Исследована возможность полностью автоматического синтеза аналоговой ИС от спецификации до топологии без участия эксперта с помощью программных средств с открытым исходным кодом. Показаны преимущества и недостатки такого подхода.

**Ключевые слова:** проектирование аналоговых интегральных схем; дифференцируемое программирование; машинное обучение; схемотехнический синтез.

**Для цитирования:** Щепетов Д.С., Тимошенко А.Г., Гаранжа В.А., Капорин И.Е., Каргин Д.Н. Методы схемотехнического и топологического синтеза аналоговых интегральных схем по спецификации с использованием методов машинного обучения и дифференцируемого программирования. Труды ИСП РАН, том 37, вып. 2, 2025 г., стр. 33–48. DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(2)-3.

## Methods of Circuit and Topological Synthesis of Analog Integrated Circuits According to Specification Using Machine Learning and Differentiable Programming Methods

<sup>1</sup> D.S. Shchepetov, ORCID: 0009-0005-3562-6374 <dshchepetov@synth-cad.ru>

<sup>2</sup> A.G. Timoshenko, ORCID: 0000-0002-2018-165X <timoshenko@org.miet.ru>

<sup>1</sup> V.A. Garanzha, ORCID: 0000-0002-8376-756X <garan@ccas.ru>

<sup>1</sup> I.E. Kaporin, ORCID: 0000-0002-1451-1632 <igorkaporin@mail.ru>

<sup>3</sup> D.N. Kargin, ORCID: 0009-0002-7394-0370 <dmitry.n.kargin@synth-cad.ru>

<sup>1</sup> Federal Research Center "Informatics and Control" of the Russian Academy of Sciences",  
Russia, 119333, Moscow, Vavilova st., 44, bldg. 2.

<sup>2</sup> National Research University "MIET",  
Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokina square, bldg. 1.

<sup>3</sup> Moscow Polytechnic University,  
Russia, 107023, Moscow, B. Semenovskaya st., 38.

**Abstract.** The problem of schematic development (netlist generation), which arises in the development of analog integrated circuits, is formulated as an optimization problem for a differentiable smooth function using a combination of differentiable programming and machine learning methods. It is shown that this approach allows one to achieve the specification requirements and propose an optimal combination of circuit templates that make up an analog integrated circuit, without involving combinatorial optimization and reinforcement learning methods. It is shown that this approach provides significant speed advantages compared to traditional methods based on reinforcement learning. The possibility of fully automatic synthesis of an analog IC from specification to topology without expert participation using open-source software is investigated. The advantages and disadvantages of this approach are shown.

**Keywords:** analog integrated circuits design; machine learning; differentiable programming; schematic synthesis.

**For citation:** Shchepetov D.S., Timoshenko A.G., Garanzha V.A., Kaporin I.E., Kargin D.N. Methods of circuit and topological synthesis of analog integrated circuits according to specification using machine learning and differentiable programming methods. *Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS*, vol. 37, issue 2, 2025. pp. 33-48 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(2)-3.

### 1. Введение

Проектирование аналоговых интегральных схем (ИС), как схемотехническое, так и топологическое, исторически сопряжено с применением большого количества ручного, экспертного труда и обладает меньшей степенью автоматизации, чем проектирование цифровых ИС. Это обуславливается следующими причинами: вариативностью размеров транзисторов в аналоговом режиме, широкой номенклатурой режимов их работы, существенно большей чувствительностью к шумам по сравнению с цифровыми ИС и, соответственно, большей требовательностью к взаимному расположению транзисторов в топологическом проектировании. В связи с этим проектирование аналоговых ИС, например, топологическое, рассматривалось как "искусство", главным образом в том смысле, что автоматизация этого процесса невозможна и неэффективна («проверка алгеброй гармонии»), и эта точка зрения даже отразилась в названии книги по топологическому проектированию [1]. Способ («маршрут») проектирования аналоговых ИС имеет 4 стадии:

- выбор схемотехнического решения (разработка схемы электрической принципиальной – СЭП) на основе спецификации ИС. Стадия осуществляется полностью экспертом;

- определение размеров транзисторов и параметров пассивных элементов (т.н. «сайзинг» от англ. sizing), составляющих ИС. Стадия осуществляется либо экспертом на основании упрощенных моделей транзисторов, либо методами оптимизации типа «черный ящик». Валидация результатов осуществляется с помощью средства схемотехнического моделирования (CCM);
- топологическое размещение транзисторов и пассивных элементов с учетом их параметров. Стадия осуществляется экспертом-топологом;
- верификация – проверка на соответствие правилам проектирования (Design Rules Check, DRC), проверка на соответствие топологии схеме (Layout-versus-Schematic, LvS), определение значений паразитных элементов (Parasitic Extraction, PEX). Стадия осуществляется специализированными решателями, первая «прикидка» исходит из интуиции эксперта-тополога и эксперта-схемотехника.

Этот маршрут редко проходится один раз, возвраты на предыдущие стадии из-за невозможности выполнить требования спецификации возможны и вероятны.

Исследования последних лет в области методов машинного обучения (МО) позволили сделать важные шаги к разработке нового почти автоматического маршрута. В области схемотехнического синтеза (выбора схемотехнического решения) был представлен ряд работ, основанных на обучении с подкреплением (RL – англ. Reinforcement Learning) [2, 3]. В области сайзинга аналоговых ИС интересна работа [4], в которой авторы отказались от «золотого стандарта» сайзинга – методов байесовской оптимизации – и перешли к автокодировщикам, которые учились сопоставлять характеристикам ИС параметры транзисторов непосредственно в процессе оптимизации. В области топологического проектирования были разработаны два программных пакета [5, 6], которые позволяли проводить топологическое проектирование в автоматическом режиме в два шага: на первом с помощью графовых искусственных нейронных сетей (ИНС) выделялись условия на симметричность и компактность расположения, на втором – решалась задача оптимизации с учетом детектированных условий методами оптимизации с ограничениями.

Таким образом, с использованием упомянутых работ, появилась возможность построить контур проектирования аналоговых ИС без участия человека-эксперта. В более реальном сценарии: роль эксперта сводится к высокоуровневому дизайну и заданию ограничений, рутинные операции берет на себя автоматическая система. Однако, современные методы МО требовательны к объему и составу обучающей выборки, что делает их обучение трудоемким (во всех отношениях) процессом, а также требуют специальных знаний для выбора метода МО и для подготовки и очистки данных. Эксперт-схемотехник или тополог редко обладает такими знаниями, поэтому актуальными остаются несколько направлений, которые позволяют существенно сократить размер обучающей выборки и повысить интерпретируемость результатов, а именно:

- проектирование ИС в соответствии с определенным набором правил. Например, в работе [7] был разработан набор составных частей и связей, позволяющих описать все операционные усилители (ОУ), что позволяет синтезировать обучающую выборку в автоматическом режиме на основе алгоритмов обучения с подкреплением;
- «полуклассический» подход – «дифференцируемое программирование» (ДП) – в котором часть алгоритма записывается в строгом соответствии с правилами в виде классической программы, а часть алгоритма с помощью методов машинного обучения. При этом количество настроечных параметров у такой программы велико, а алгоритм должен быть составлен таким образом, чтобы между шагами алгоритма можно было вычислить градиент по настроечным параметрам.

Таким образом, можно сформулировать цель данного исследования:

- на основе выбранного объекта исследования – аналого-цифрового преобразователя последовательного приближения (АЦП-ПП) – исследовать возможность их автоматизированного синтеза с помощью методов дифференциального программирования и методов машинного обучения;
- проверить эффективность предложенного подхода и сравнить его с классическими методами как машинного обучения, так и обучения с подкреплением;
- проверить эффективность сквозного проектирования от спецификации до топологии с использованием средств автоматического топологического размещения.

Статья организована следующим образом. Раздел 2 содержит основные сведения о дифференцируемом программировании и его применении к рассматриваемой задаче, а также описание схемы работы АЦП-ПП и реализацию дифференцируемой программы, которая описывает поведение данного типа АЦП. Раздел 3 содержит описание используемых методов машинного обучения для решения поставленной задачи, а также краткое описание основных трудностей, с которыми столкнулся предполагаемый подход. Раздел 4 содержит описание эксперимента по применению разработанных методов и сравнение его с актуальными методами решения поставленной задачи, которые распространены в литературе. В разделе представлен анализ результатов эксперимента. Также в разделе описаны результаты автоматического создания топологии в пакете с открытым исходным кодом – Align. Раздел 5 содержит основные выводы по рассмотренной в работе проблеме.

## 2. Дифференцируемое программирование для синтеза ИС

### 2.1. Общие сведения

Согласно [8] введем определение дифференцируемой программы как композиции гладких, дифференцируемых преобразований  $(f_k)$  над состояниями программы  $S_k$  (под состоянием понимается совокупность переменных и параметров программы на  $i$ -том шаге):

$$S_k = f_k(S_{k-1}). \quad (1)$$

Финальное состояние  $S_n$  представляет собой результат работы программы. Начальное состояние  $S_0$  представляет собой совокупность настроечных параметров и значений «входа» программы. В случае, если дана выборка начальных ( $S_0$ ) состояний программы и желаемых конечных ( $O$ ) состояний программы –  $(S_{0,j}, O_j)$ , то оптимальные значения настроечных параметров  $p$  будут определяться как аргумент, минимизирующий заданную невязку  $L$ :

$$p = \operatorname{argmin}_p \sum_j L(S_{n,j}, O_j).$$

Если все функции  $f_k$  в (1) дифференцируемые и гладкие, то возможно получить производные  $\nabla_p S_n$  по параметрам алгоритма  $p$ , используя, например, методы автоматического дифференцирования [9] и проводить минимизацию невязки с помощью процедур типа «градиентный спуск».

Целесообразно задавать невязку  $L$  со следующими свойствами:

$$\begin{aligned} L(S_{n,j}, O_j) &= 0, \text{ если } S_{n,j} \equiv O_j, \\ \nabla_{f_{n,j}} L(S_{n,j}, O_j) &= 0, \text{ если } S_{n,j} \equiv O_j, \end{aligned} \quad (2)$$

где знак  $\equiv$  используется как совпадение с заданной точностью входного и выходного состояний,  $\nabla_{f_{n,j}}$  – градиент невязки по переменным состояниям  $S_{n,j}$ . Это делается по следующей причине. Выражение для невязки градиента по параметрам ( $p$ ) имеет вид:

$$\nabla_{f_{n,j}} L(S_{n,j}, O_j) = \nabla_{f_{n,j}} L \cdot \prod_{i=n}^{i=1} \nabla_{f_{i-1,j}} S_{i,j} \cdot \nabla_p S_{0,j} \quad (3)$$

В случае совпадения выходов с желаемыми выходами для всех образцов выражение (3) с учетом условия (2) равно 0, что фиксирует параметры и препятствует их дальнейшему изменению в градиентном спуске.

Упрощенный алгоритм поиска оптимального решения с помощью градиентного спуска представлен в алгоритме 1.

*Алгоритм 1. Алгоритм поиска оптимального решения для дифференцируемой программы.*

*Algorithm 1. Algorithm for finding the optimal solution of a differential program.*

**Вход:** начальное значение параметров  $p_0$ , функция невязки  $L$ , набор из желаемых входных и выходных состояний  $(S_{0,j}, O_j)$  – обучающая выборка.

**Параметры:** шаг градиентного спуска  $\tau$ , размер пакета  $N_{batch}$ , точность алгоритма  $\epsilon$ .

**Выход:** критическая точка  $p_c$ :  $|\nabla_p \sum_j L(S_{n,j}, O_j)| < \epsilon$ .

- 1 **Пока**  $|\nabla_p \sum_j L(S_{n,j}, O_j)| \geq \epsilon$ :
- 2     Собрать подмножество обучающей выборки размером  $N_{batch}$  – «пакет»  $(S_{n,j_b}, O_{j_b})$ .
- 3     Посчитать параметрический градиент  $\nabla(b) = \nabla_p \sum_{j_b} L(S_{n,j_b}, O_{j_b})$  по элементам пакета.
- 4     **Если**  $p$  должно лежать на многообразии  $P$ :
- 5         Спроецировать градиент на касательную плоскость многообразия:  
 $\delta = P \downarrow (\nabla(b))$ .
- 6         Вычесть  $\delta$  из текущей точки:  
 $p_t \leftarrow p - \delta$ .
- 7         Спроецировать точку обратно на многообразие:  
 $p \leftarrow P \uparrow (p_t)$ .
- Иначе:**
- 4         Прибавить к текущим параметрам антиградиент:  
 $p \leftarrow p - \nabla(b) \cdot \tau$ .
- 5     Произвести оценку общего градиента. Если выполняется условие  $|\nabla_p \sum_j L(S_{n,j}, O_j)| < \epsilon$ , то  
 $p_c \leftarrow p$  и выйти из цикла.
- 6 **Выход:** вернуть  $p_c$ .

Отметим, что для краткости изложения в алгоритме 1 были опущены вопросы, связанные с введением критериев останова по сходимости и достижению максимального числа итераций. Принципиальным является шаг 4. Поскольку «параметрами» программы по оптимизации составной аналоговой ИС являются характеристические функции схемотехнических блоков, таких как устройств «выборки-хранения» (УВХ), компараторов, цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП), то эти функции принадлежат к тем или иным многообразиям по построению. Определение этих многообразий в ручном режиме трудоемко, поэтому для этих целей могут быть успешно применены методы машинного обучения. Но они также требуют определенной адаптации (подробнее – раздел 3).

## 2.2. Дифференцируемая программа для синтеза АЦП-ПП

АЦП-ПП и принцип его работы изображен на рис. 1.

В момент команды «Начать преобразование» АЦП-ПП УВХ переводится в режим хранения, и регистр последовательного приближения начинает формировать последовательно биты кода, начиная с самого старшего. Для этого все биты кода выставляются в 0, кроме старшего (на последующих стадиях – текущего). Код подается на ЦАП, откуда подается на компаратор. Компаратор сравнивает сигнал с УВХ и ЦАП и выдает логическую единицу (чаще всего ей служит напряжение питания – шина Vdd) в случае, если сигнал с УВХ больше сигнала с ЦАП, и логический 0 (чаще всего – шина Vss) в противном случае. Сигнал с компаратора преобразуется в бит кода и регистр переходит к выставлению следующего бита. По завершению преобразования формируется сигнал «EOC DRDY», пока идет преобразование формируется сигнал «BUSY».

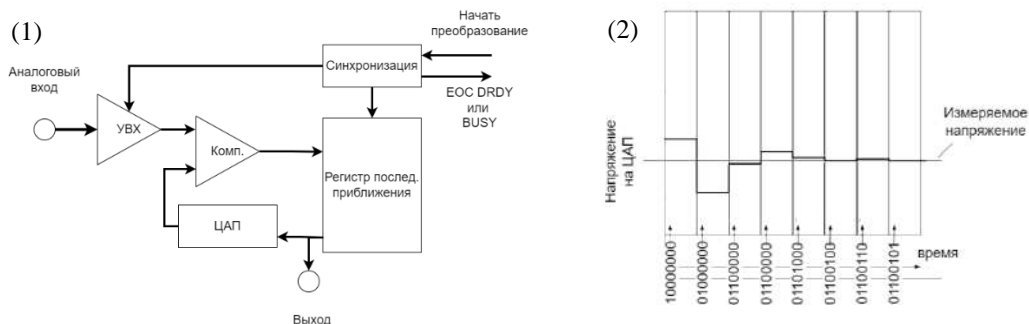


Рис. 1. Структурная схема АЦП-ПП (1) и преобразование сигнала в ней (2).

Fig. 1. SAR structural scheme (1) and signal forming in SAR (2).

Дифференцируемая программа преобразования «аналог – цифра» для подобного АЦП-ПП будет иметь следующий вид (алгоритм 2).

Характеристические функции (ХФ), упомянутые в алгоритме 2 – функции, описывающие поведение схемотехнических блоков во времени в зависимости от параметров. Идеальные характеристические функции, их свойства и источники их неидеальности приведены в табл. 1.

В случае, если все ХФ близки или равны идеальным, АЦП-ПП работает с бесконечной скоростью и точностью. Очевидно, что такие функции недостижимы для реальных схемотехнических решений УВХ, компаратора и ЦАП. Возможные ХФ блоков определяются схемотехникой блоков и их параметрами, формирование ХФ с помощью методов МО описано в разделе 3. Общая программа для синтеза схемотехнических блоков представлена в алгоритме 3.

## 3. Методы машинного обучения для аппроксимаций многообразий схемотехнических блоков

Преобразование между пространством характеристических функций и пространством схемотехнических решений наиболее естественно осуществлять с помощью методов МО. Для этого могут быть использованы нейронные сети с архитектурами автокодировщик или трансформер, в данной работе был использован вариационный автокодировщик [10]. Общий вид такой ИНС представлен на рис. 3.

Операторы проекции на касательную плоскость многообразия и репроекции на многообразие реализуются при использовании нейросетевых архитектур типа автокодировщик

естественным образом (рис. 2) по следующему алгоритму. ХФ, к которой прибавлен градиент (шаг (1) рис. 2) преобразуется в латентном пространстве автокодировщика (ВАК-ЛП (от вариационный автокодировщик-латентное пространство), шаг (2) рис. 2) в код существенной меньшей размерности, который может рассматриваться как касательное пространство к многообразию, описывающему  $p$ , затем оно декодируется в ХФ из того же многообразия. Для проведения шага 8 алгоритма 2 в архитектуре автокодировщика встроена «голова», которая осуществляет преобразование из латентного пространства, кодирующего ХФ, в СЭП соответствующего схемотехнического блока. Следует отметить, что надежность преобразования зависит, как минимум, от размера выборки и может быть недостаточной для малых объемов выборки. Поэтому для проверки надежности были проведены тесты, которые измеряют качество в зависимости от размера выборки. Их результаты приведены в табл. 2. Было подтверждено, что при больших размерах синтезированной выборки, что схема на рис. 2 работает с достаточной надежностью. Однако, такие размеры выборки могут быть непрактичными в случае, когда надо создавать множество нейросетевых моделей схемотехнических блоков. Поэтому схема преобразования была модифицирована следующим образом (рис. 3).

*Алгоритм 2. SarAdcDiff. Дифференцируемая программа оцифровки аналогового сигнала в АЦП-ПП.*

*Algorithm 2. SarAdcDiff. A differentiable program for analog to digital conversion.*

**Вход:** аналоговый сигнал  $A(t)$ .

**Выход:** последовательность бит преобразования аналог-цифра. *Примечание: поскольку программа дифференцируемая – формируется последовательность вещественных чисел, близких к 0 или 1, а не строго равных им.*

**Оптимизируемые в ДП параметры:** «характеристическая функция» УВХ –  $sh(V, t)$ , «характеристическая функция» компаратора  $comp(t)$ , «характеристическая функция» ЦАП –  $dac(C, t)$ .

**Константные параметры:** число бит ( $N_{bit}$ ), время оцифровки ( $T_{adc}$ ), время шага преобразования  $\Delta t = \frac{T_{adc}}{N}$ ,  $\kappa_0$ ,  $\chi_0$  – параметры, характеризующие функцию бинаризации.

**Изменяемые параметры алгоритма:** текущий битовый код  $C$ .

- 1      Перевести УВХ в режим хранения, захватить текущий входной сигнал  
 $s(t) = sh(A(t_0), t)$ .
- 2      Выставить все биты кода в 0:  
 $C \leftarrow 0_0 \dots 0_{N_{bit}-1}$
- 3      Для  $i$  меняющегося от  $N_{bit} - 1$  до 0:
- 4          Выставить  $i$  бит в 1:  
 $C \leftarrow 0_0 \dots 0_{i-1} 1_i \dots C_{N_{bit}-1}$ .
- 5          Подать во время равное  $t_i = t_0 + i \cdot \Delta t$  на ЦАП код следующего вида:  
 $C_{out} = \sum_i 2^i \cdot C_i$  и сформировать сигнал ЦАП  $dac(C_{out}, 0)$ .
- 6          Подождать половину цикла и считать значение сигнала с компаратора:  
 $comp(t) = comp(sh(t), dac(C_{out}, \Delta t/2))$ .
- 7          Сохранить  $i$ -тый бит в компараторе как:  
 $C = 0_0 \dots 0_{i-1} \Phi\left(comp\left(t_i + \frac{\Delta t}{2}\right)\right)_i \dots C_{N_{bit}-1}$   
 $\Phi(\chi) = \frac{\exp((\chi - \chi_0) \cdot \kappa_0)}{\exp((\chi - \chi_0) \cdot \kappa_0) + 1}$  - гладкая бинаризирующая функция.
- 8      **Выход:** вернуть  $C$

Табл. 1. Свойства ХФ.  
Table.1. Properties of characteristic functions (CF).

СХТ блок	Идеальная характеристическая функция	Источники ошибок
УВХ	$sh(A,t)=A$	Недостаточность характеристик ОУ в составе УВХ, утечка заряда на конденсаторе хранения через паразитные элементы, инжекция паразитных зарядов в конденсатор хранения.
Компаратор	$comp(A,B,t) = \begin{cases} A < B, V_{ss} \\ A > B, V_{dd} \end{cases}$	Недостаточность чувствительности, большое время выставления финального значения, зависимость от величины постоянного смещения.
ЦАП	$dac(C,t) = C \cdot K$	Нелинейность преобразования, деградация со временем, недостаточность внутреннего сопротивления, невозможность представить полный диапазон значений.

Алгоритм 3. Программа схемотехнического синтеза АЦП-ПП.  
Algorithm 3. SAR schematic synthesis program.

**Вход:** последовательность аналоговых сигналов А и эталонных битовых кодов, начальное приближение для схемотехники ИС, параметр малости невязки  $\epsilon$ .

**Выход:** схемотехника ИС в виде СЭП.

**Оптимизируемые в ДП параметры:** «характеристическая функция» УВХ –  $sh(V,t)$  , «характеристическая функция» компаратора –  $comp(t)$ , «характеристическая функция» ЦАП –  $dac(C,t)$ .

- 1
- Выполнить преобразование из имеющихся схем блоков в ХФ.
- 2
- Пока** не достигнуты параметры, удовлетворяющие спецификации:
- 3
- Для каждого элемента обучающей выборки (или обучающего пакета) сформировать выходные коды с помощью алгоритма SarAdcDiff:  
 $S_{n,j} = \text{SarAdcDiff}(A_j)$  .
- 4
- Сформировать набор невязок:  
$$L = \sum_{k,j} |S_{n,j,k} - O_{j,k}| \cdot 2^k,$$
  
к – номер бита.
- 5
- Посчитать параметрический градиент.
- 6
- Обновить ХФ.
- 7
- Если**  $L < \epsilon$ , преобразовать ХФ в СЭП и запустить средство схемотехнического моделирования для проверки.
- 8
- Если** схемотехническое моделирование дало удовлетворяющий спецификации результат:
- 9
- Выход**
- 10
- Иначе:**
- 11
- получить коэффициенты пропорциональности между реальными и расчетным ХФ и использовать их при будущем моделировании
- 12
- Выход: вернуть** С

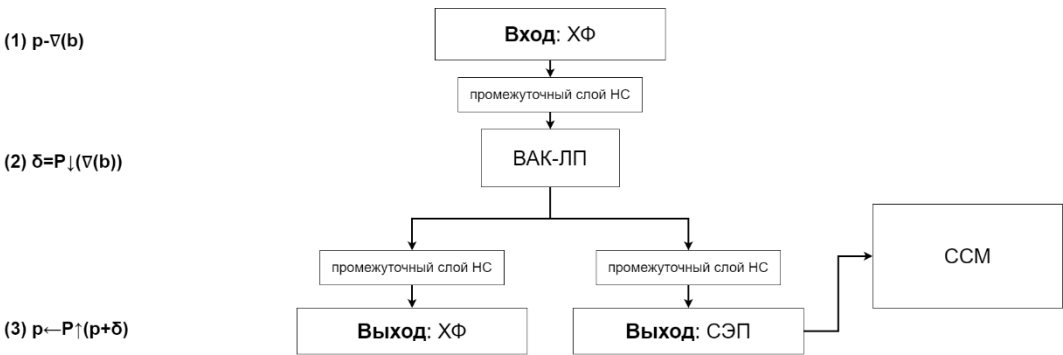


Рис. 2. Автокодировщик для представления многообразия ХФ и преобразования ХФ в СЭП.  
Fig. 2. Autoencoder for learning CF manifolds and translation CF to netlist.

Табл. 2. Зависимость ошибки предсказания ХФ от размера синтетической выборки.  
Table 2. The set of specifications for testing.

Размер выборки, кол-во элементов	Относительная ошибка предсказания ХФ с помощью автокодировщика
500	0,42
5000	0,13
50000	0,04

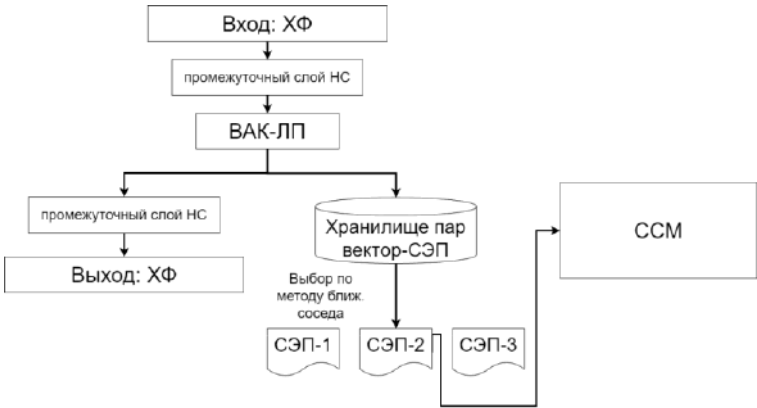


Рис. 3. Модификация автокодировщика с преобразованием ХФ-СЭП по методу ближайшего соседа.  
Fig.3 Autoencoder modification with use of CF-netlist transform by nearest neighbor search method.

Каждому СЭП соответствует вектор в латентном пространстве автокодировщика, который соответствует его ХФ. Для всех ХФ и соответствующих им СЭП из обучающей выборки формируется хранилище векторов. Преобразование ХФ в СЭП осуществляется с помощью поиска наилучшего соответствия (вектора с наименьшим расстоянием) из хранилища векторов, в качестве СЭП берется СЭП, соответствующая этому вектору из хранилища. Хранилище представляет собой реализованное авторами на основе открытых исходных кодов дерево поиска ближайших соседей [11], ускоряющее поиск ближайшего элемента. Преобразование «схема-СЭП» ограничено только теми примерами, которые уже встречались в обучающей выборке, что делает невозможным галлюцинации сети и позволяет работать даже для небольших тестовых выборок. В случае, если производство располагает большим

количеством тестовых примеров, использование схемы, изображенной на рис. 2 оправдано в большей мере, так как не ограничивает решения только ближайшими образцами.

4. Результаты экспериментов по синтезу ОУ и АЦП-ПП

Для экспериментов был собран тестовый стенд (маршрут), основанный на САПР с открытым исходным кодом, включающий CCM Хусе [12], средство топологического размещения Align [6]. Общий маршрута представлен на рис. 4.

В качестве набора средств проектирования (Process Development Kit – PDK) использовалось PDK Google+SkyWater-130 nm [13]. В качестве условий спецификации для АЦП-ПП задавалось требуемое количество бит, эффективное соотношение сигнал-шум и частота дискретизации (табл. 3). В качестве «строительных блоков» алгоритм синтезировал из вариантов, представленных в табл. 4.

Авторами было проведено сравнение с методами обучения с подкреплением для подтверждения эффективности предложенного подхода. В качестве референсного алгоритма был выбран алгоритм [2] из-за наличия исходного кода, его простоты и заявляемой эффективности. Перед выполнением синтеза по спецификации алгоритм был пред-обучен на специальной выборке из троек – (набор (УВХ, компаратор, ЦАП) СЭП блоков и их ХФ, изменение одного элемента из данного набора, новые СЭП и ХФ). Время генерации было ограничено одними сутками (1440 минут). Состав и параметры синтезированных ИС представлен в табл. 5.



Рис. 4. Маршрут для автоматического проектирования.  
Fig. 4. Proposed automatic synthesis route.

Табл. 3. Набор спецификаций для тестирования.  
Table 3. The set of specifications for testing.

Спецификация	Количество бит	Соотношение сигнал шум, дБ	Частота дискретизации, МГц
АЦП-8	8	45	100
АЦП-12	12	52	25
АЦП-16	16	63	0,5

Табл. 4. Набор схемотехнических шаблонов для синтеза ИС.

Table 4. Schematics templates for IC synthesis.

Реализация компаратора	Реализация УВХ	Реализация ЦАП
Компаратор на регенеративной защелке	УВХ с одним ОУ и конденсатором с контролем заряда:	ЦАП R-2R типа с различными видами ОУ:
StrongARM компаратор		
	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Двухкаскадный простой ОУ</li> <li>2. ОУ с диодной нагрузкой (двухкаскадный)</li> <li>3. ОУ на изогнутом каскаде (двухкаскадный)</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Двухкаскадный простой ОУ</li> <li>2. ОУ с диодной нагрузкой (двухкаскадный)</li> <li>3. ОУ на изогнутом каскаде (двухкаскадный)</li> </ol>

По результатам экспериментов видно (табл. 5), что предложенный подход позволяет синтезировать ИС существенно быстрее, чем подходы, основанные на обучении с подкреплением, и сравнимо по времени с подготовительной стадией проектирования экспертом (запустить САПР и выпить кофе со сменой эмоций). Также интересно, что начального УВХ (правда, с различными размерами транзисторов) «хватило» для всех трех случаев. Это связано с тем, что моделирование проводилось для одной транзисторной модели (параметры tt – «typical typical») и при моделировании «в углах» результаты получились бы другими. Также стоит отметить более разнообразный выбор вариантов схем, полученный алгоритмом обучения с подкреплением, что имеет как свои плюсы (исследование более широкой области параметрического пространства), так и минусы (неоправданно переусложненный дизайн). Неудача с синтезом АЦП-12 имеет, по всей видимости, вероятностный характер, связанный со случайным выбором точки, являющейся локальным минимумом, из которой алгоритм не смог выбраться. При многократном повторении этот артефакт был бы исключен. Поскольку этот эксперимент не влиял на «общую картину» и был длительным повторен он не был.

Для СЭП, сгенерированных алгоритмом, запускался топологический раскладчик Align, который позволял генерировать аналоговую часть АЦП непосредственно в GDS. Результаты представлены на рис. 5.

Время, требующееся для получения топологических решений – 40 минут для АЦП-8, 56 минут для АЦП-12 и 66 минут для АЦП-16, что также существенно быстрее ручного проектирования.

Все результаты топологического проектирования свободны от DRC/LvS нарушений, но компактность топологического проектирования, по мнению авторов, недостаточна несмотря на то, что для функций потерь, с учетом распознанных условий на компактность и симметричность, были достигнуты локальные минимумы. На текущем этапе проектирование такого качества может использоваться топологом в качестве начального приближения, либо в контуре автоматического подбора параметров СЭП – сайзинге. Во втором случае, должно быть еще больше сокращено время проектирования, в первом случае – требуется повышение качество проектирования.

Табл. 5. Результаты соответствия спецификации автоматически синтезированных ИС.  
Table 5. Parameters versus schematics of syntheses schemes.

Спецификация	Способ синтеза	Состав	Время синтеза, минуты	Соотношение сигнал-шум (требования спецификации), дБ	Частота, МГц
АЦП-8	ДП	1. УВХ с простым двухкаскадным ОУ 2. Компаратор на регенеративной защелке 3. ЦАП с простым двухкаскадным ОУ	14	46,1 (45)	100
	RL	1. УВХ с простым двухкаскадным ОУ 2. Компаратор StrongArm 3. ЦАП с простым двухкаскадным ОУ	108	47,6 (45)	100
АЦП-12	ДП	1. УВХ с простым двухкаскадным ОУ 2. Компаратор StrongArm 3. ЦАП с ОУ с диодной нагрузкой	24	52,4 (52)	25
	RL	1. УВХ с ОУ на изогнутом каскаде 2. Компаратор StrongArm 3. ЦАП с ОУ на изогнутом каскаде	1440 (не смог сойтись)	39,8 (52)	25
АЦП-16	ДП	1. УВХ с простым двухкаскадным ОУ 2. Компаратор StrongArm 3. ЦАП с ОУ на изогнутом каскаде	40	63,2 (63)	0,5
	RL	1. УВХ с ОУ с диодной нагрузкой 2. Компаратор StrongArm 3. ЦАП с ОУ на изогнутом каскаде	237	67,4 (63)	0,5
ДП – дифференцируемое программирование RL – обучение с подкреплением					

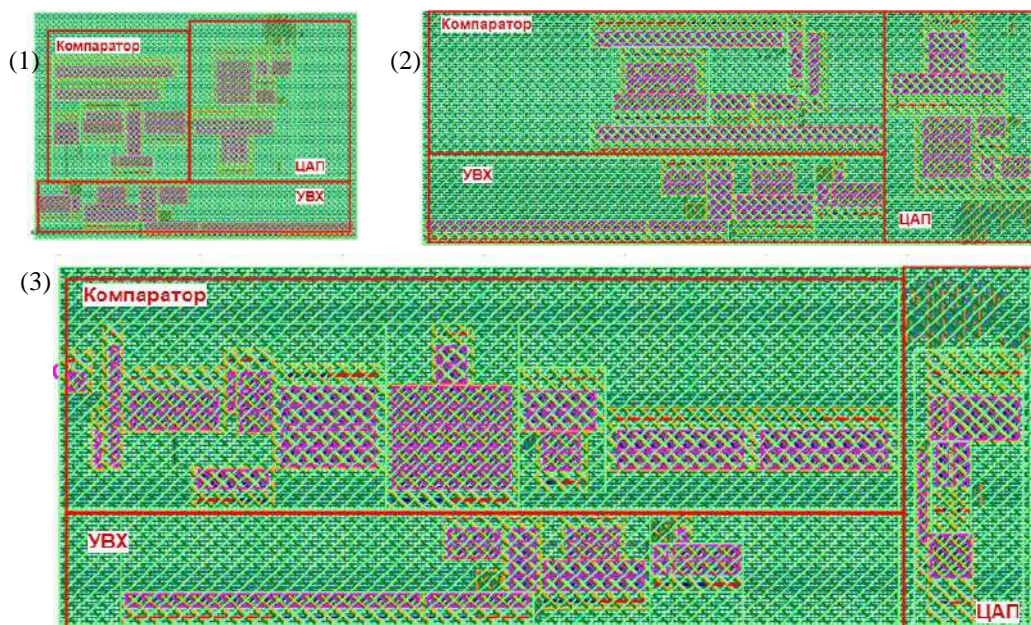


Рис. 5. Результаты топологического проектирования для синтезированных аналоговых СЭП для АЦП-8 (1) АЦП-12 (2) АЦП-16 (3).

Fig. 5. Layout for synthesized analog netlist for ADC-8 (1), ADC-12 (2), ADC-16 (3).

## 5. Заключение

В данной работе были исследованы возможности применения методов машинного обучения и дифференцируемого программирования к задачам синтеза аналоговых ИС и аналоговых частей аналогово-цифровых ИС. Были обоснованы причины, по которым этот подход может иметь преимущество над моделями типа RL и моделями, основанными на чистых методах машинного обучения, обученных на больших выборках. Показано, что данный подход существенно быстрее методов, основанных на обучении с подкреплением. «Под ковер» была спрятана длительная и дорогостоящая в плане вычислительных ресурсов фаза обучения ХФ схмотехнических шаблонов, но она производится однократно и не влияет на время синтеза ИС проектировщиком.

Поскольку данная работа преследовала цель проверить применимость гипотезы эффективности методов дифференцируемого программирования для синтеза ИС схмотехническое моделирование проводилось для типичного значения параметров (точка  $tt$ ) и не проходило верификационную часть и часть выделения паразитных элементов, и эти части еще не готовы в маршруте, разрабатываемом группой авторов исследования (рис. 4).

Было показано, что предложенные методы позволяют получить схмотехнику аналоговых ИС, удовлетворяющую спецификации, значительно быстрее, чем это получилось бы у «живого» схмотехника и алгоритма обучения с подкреплением, что делает предложенный метод применимым для решения стандартных схмотехнических задач и дает возможность эксперту сосредоточиться на сложных и требующих творческого подхода случаях.

Также было показано, что можно в течении минут получить не только схмотехническое решение, но и результат топологического проектирования, свободный от нарушений DRC/LVS, но уступающий решению, спроектированному экспертом, и содержащий ряд дефектов (с точки зрения эксперта-тополога), которые не покрываются правилами DRC /LVS.

В рамках развития данной темы можно предложить следующие направления исследования:

- одновременная оптимизация и синтез схемотехнического и топологического решения;
- поддержка моделирования в углах, а не только центральной точки (tt);
- включение в контур оптимизации методов оценки паразитных элементов и разработка решения с учетом реально получающихся условий, которые будут развиты в рамках будущих работ группы.

## Список литературы / References

- [1]. Hastings A. The art of analog layout. – Prentice hall New Jersey, 2001, 576 p.
- [2]. Settaluri, K., Haj-Ali, A., Huang, Q., Hakhamaneshi, K., & Nikolic, B. (2020, March). Autocckt: Deep reinforcement learning of analog circuit designs. In 2020 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE) (pp. 490-495). IEEE.
- [3]. Budak, A. F., Jiang, Z., Zhu, K., Mirhoseini, A., Goldie, A., & Pan, D. Z. (2022, January). Reinforcement learning for electronic design automation: Case studies and perspectives. In 2022 27th Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC) (pp. 500-505). IEEE.
- [4]. Khan, S., Shi, Z., Li, M., & Xu, Q. (2024, March). DeepSeq: Deep Sequential Circuit Learning. In 2024 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE) (pp. 1-2). IEEE.
- [5]. Xu, B., Zhu, K., Liu, M., Lin, Y., Li, S., Tang, X., ... & Pan, D. Z. (2019, November). MAGICAL: Toward fully automated analog IC layout leveraging human and machine intelligence. In 2019 IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design (ICCAD) (pp. 1-8). IEEE.
- [6]. Kunal, K., Madhusudan, M., Sharma, A. K., Xu, W., Burns, S. M., Harjani, R., ... & Sapatnekar, S. S. (2019, June). ALIGN: Open-source analog layout automation from the ground up. In Proceedings of the 56th Annual Design Automation Conference 2019 (pp. 1-4).
- [7]. Abel, I., Neuner, M., & Graeb, H. E. (2021). A hierarchical performance equation library for basic op-amp design. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 41(7), 1976-1989.
- [8]. Blondel, M., & Roulet, V. (2024). The elements of differentiable programming. *arXiv preprint arXiv:2403.14606*.
- [9]. Baydin A. G. et al. Automatic differentiation in machine learning: a survey // *Journal of machine learning research*. – 2018. – Т. 18. – №. 153. – С. 1-43.
- [10]. Doersch, C. (2016). Tutorial on variational autoencoders. *arXiv preprint arXiv:1606.05908*.
- [11]. Malkov, Y. A., & Yashunin, D. A. (2018). Efficient and robust approximate nearest neighbor search using hierarchical navigable small world graphs. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 42(4), 824-836.
- [12]. Dodge, H. D. (2020). Xyce Case Study (No. SAND-2020-2877R). Sandia National Lab.(SNL-NM), Albuquerque, NM (United States).
- [13]. Rahman, M. S., Suvo, S. H., Kamal, Z., & Rahman, T. (2024, May). Standard Cell Library Characterization Flow Using Open Source Tools with Google+ SkyWater 130nm PDK. In 2024 6th International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology (ICEEICT) (pp. 1175-1180). IEEE.

## Информация об авторах / Information about authors

Денис Сергеевич ЩЕПЕТОВ – кандидат технических наук, ведущий специалист ФИЦ ИУ РАН. Сфера научных интересов: многокритериальная оптимизация, методы машинного обучения, робототехнические системы.

Denis Sergeevich SHCHPETOV – Cand. Sci. (Tech.), Leading Specialist of the FRC ICS RAS. Research interests: multicriteria optimization, machine learning methods, robotic systems.

Александр Геннадиевич ТИМОШЕНКО – кандидат технических наук, доцент НИУ МИЭТ. Сфера научных интересов: проектирование аналоговых ИС и схем смешанного сигнала, обработка сигналов, схемотехническое проектирование.

Aleksandr Gennadyevich TIMOSHENKO – Cand. Sci. (Tech.), associate professor of the National Research University of Electronic Technology. Research interests: analog and mixed signals IC design, signal processing, circuit design.

Владимир Анатольевич ГАРАНЖА – доктор физико-математических наук, профессор РАН, главный научный сотрудник ФИЦ ИУ РАН. Сфера научных интересов: дифференциальная геометрия, многокритериальная оптимизация, параллельное программирование, построение расчетных сеток.

Vladimir Anatolyevich GARANZHA – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor of the RAS, Chief Researcher FRC ICS RAS. Research interests: differential geometry, multicriterial optimization, parallel programming, construction of computational grids.

Игорь Евгеньевич КАПОРИН – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник ФИЦ ИУ РАН. Сфера научных интересов: итеративные алгоритмы решения СЛАУ, безградиентные методы оптимизации больших задач, параллельное программирование.

Igor Evgenievich KAPORIN – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Chief Researcher FRC ICS RAS. Research interests: iterative algorithms for solving SLAE, gradient-free methods for optimizing large problems, parallel programming.

Дмитрий Николаевич КАРГИН – аспирант, Московский политехнический университет. Сфера научных интересов: параллельное программирование, робототехнические системы, многокритериальная оптимизация.

Dmitry Nikolaevich KARGIN – postgraduate student, Moscow Polytechnic University. Research interests: parallel programming, robotic systems, multicriterial optimization.





## Предсказание характеристик СБИС по логической схеме с помощью методов машинного обучения

<sup>1,2</sup> М.С. Лебедев, ORCID: 0000-0002-0207-7672 <lebedev@ispras.ru>

<sup>1</sup> Д.А. Дыскина, ORCID: 0009-0008-0298-1822 <dashadysk0804@gmail.com>

<sup>1</sup> А.Ю. Еременко, ORCID: 0009-0008-2358-5191 <eremenko\_ay@mail.ru>

<sup>1</sup> Ф.А. Кабанов, ORCID: 0009-0007-6817-4823 <nxizer@gmail.com>

<sup>1</sup> И.А. Козмин, ORCID: 0009-0001-4752-5280 <ilya24624864@gmail.com>

<sup>1</sup> Д.М. Петренко, ORCID: 0009-0001-1067-3490 <petrenko.dan.work@gmail.com>

<sup>1</sup> Н.Б. Поудял, ORCID: 0009-0008-7423-9977 <poudialn@gmail.com>

<sup>1</sup> А.А. Сергеев, ORCID: 0009-0002-3854-7565 <weshaimer13@gmail.com>

<sup>1</sup> Р.А. Ширинова, ORCID: 0009-0002-0265-8458 <renochka7@gmail.com>

<sup>1</sup> Российский Экономический Университет им. Г.В. Плеханова,  
Россия, 115054, г. Москва, Стремянный переулок, д. 36.

<sup>2</sup> Институт системного программирования им. В.П. Иванникова РАН,  
Россия, 109004, г. Москва, ул. А. Солженицына, д. 25.

**Аннотация.** Разработка цифровой аппаратуры – длительный процесс, одними из основных этапов которого являются логический и физический синтез. Несмотря на автоматизацию синтеза в современных САПР, он может занимать часы или даже дни. Применение методов машинного обучения может помочь прогнозировать результаты синтеза и за счет этого ускорить весь процесс разработки. В данной статье описан опыт создания и оценки восьми моделей машинного обучения для прогнозирования площади и задержки СБИС по ее схеме на этапе логического синтеза. Полученные результаты показывают перспективность данного подхода и указывают направления для дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** машинное обучение; искусственный интеллект; системы автоматизации проектирования (САПР); логический синтез; логическая схема; конъюнкторно-инверторные графы (AIG).

**Для цитирования:** Лебедев М.С., Дыскина Д.А., Еременко А.Ю., Кабанов Ф.А., Козмин И.А., Петренко Д.М., Поудял Н.Б., Сергеев А.А., Ширинова Р.А. Предсказание характеристик СБИС по логической схеме с помощью методов машинного обучения. Труды ИСП РАН, том 37, вып. 2, 2025 г., стр. 49–60. DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(2)-4.

**Благодарности:** Исследование выполнено в РЭУ им. Г.В. Плеханова за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-00313, <https://rscf.ru/project/23-21-00313>.

## Netlist-Based ASIC Area and Delay Prediction Using Machine Learning

<sup>1,2</sup> M.S. Lebedev, ORCID: 0000-0002-0207-7672 <lebedev@ispras.ru>

<sup>1</sup> D.A. Dyskina, ORCID: 0009-0008-0298-1822 <dashadysk0804@gmail.com>

<sup>1</sup> A.Y. Eremenko, ORCID: 0009-0008-2358-5191 <eremenko\_ay@mail.ru>

<sup>1</sup> F.A. Kabanov, ORCID: 0009-0007-6817-4823 <nxizer@gmail.com>

<sup>1</sup> I.A. Kozmin, ORCID: 0009-0001-4752-5280 <ilya24624864@gmail.com>

<sup>1</sup> D.M. Petrenko, ORCID: 0009-0001-1067-3490 <petrenko.dan.work@gmail.com>

<sup>1</sup> N.B. Poudial, ORCID: 0009-0008-7423-9977 <poudialn@gmail.com>

<sup>1</sup> A.A. Sergeev, ORCID: 0009-0002-3854-7565 <weshaimer13@gmail.com>

<sup>1</sup> R.A. Shirinova, ORCID: 0009-0002-0265-8458 <renochka7@gmail.com>

<sup>1</sup> Plekhanov Russian University of Economics,  
36, Stremyanny lane, Moscow, 115054, Russia.

<sup>2</sup> Ivannikov Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences,  
25, Alexander Solzhenitsyn st., Moscow, 109004, Russia.

**Abstract.** Hardware development is a time-consuming process that includes logic synthesis, placement and routing as its main steps. Despite that these steps are automated in modern CADs, their execution can take hours or even days. The application of machine learning methods can help predict synthesis results and thereby speed up the development process. This article describes the experience of creating and evaluating eight machine learning models for predicting area and delay of the synthesized ASIC using its netlist at the logic synthesis step. The results obtained show the benefits of this approach and indicate directions for further research.

**Keywords:** machine learning; artificial intelligence; EDA; logic synthesis; netlist; AIG.

**For citation:** Lebedev M.S., Dyskina D.A., Eremenko A.Y., Kabanov F.A., Kozmin I.A., Petrenko D.M., Poudial N.B., Sergeev A.A., Shirinova R.A. Netlist-based ASIC area and delay prediction using machine learning. *Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS*, vol. 37, issue 2, 2025. pp. 49-60 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(2)-4.

**Acknowledgements.** This research was carried out at Plekhanov Russian University of Economics at the expense of a grant from the Russian Science Foundation, № 23-21-00313, <https://rscf.ru/project/23-21-00313>.

### 1. Введение

Машинное обучение всё чаще применяется в различных областях человеческой деятельности. Не обходит эта тенденция и современные системы автоматизированного проектирования (САПР) микроэлектроники.

Проектирование аппаратуры – многоэтапный и длительный процесс, включающий в себя такие стадии как: разработка спецификации цифрового устройства, создание модели уровня регистровых передач (register transfer level, RTL), логический синтез (создание и оптимизация логической схемы, отображение в технологический базис) и физический синтез (размещение и трассировка элементов на кристалле, генерация топологии). Последние две стадии полностью автоматизированы в современных САПР, однако содержат большое количество настроек и могут занимать длительное время. При этом точные физические характеристики разработанной сверхбольшой интегральной схемы (СБИС) становятся известны только по завершении процесса синтеза.

Основными характеристиками СБИС можно назвать энергопотребление, производительность и площадь на кристалле (power, performance, area, PPA). Разработанная СБИС обычно должна удовлетворять некоторым ограничениям на эти характеристики, либо какая-то из них должна быть максимизирована/минимизирована. Конечные параметры СБИС

трудно спрогнозировать из-за недетерминированности процесса синтеза, наличия множества параметров и настроек и непредсказуемости их влияния на синтезируемую схему. А расчетные значения характеристик до этапов размещения и трассировки могут в разы отличаться от реальных. Поэтому процесс разработки зачастую является итеративным и длительным: нужно многократно проводить синтез, подбирая необходимые параметры. Применение машинного обучения может позволить точнее прогнозировать характеристики СБИС и негативные эффекты (например, перегруженность соединительных линий или падение напряжения в цепях питания) и ускорить процесс разработки за счет исключения бесперспективных запусков инструментов синтеза и возможности быстрого исследования проектных альтернатив. Анализ существующих работ показал, что большинство моделей машинного обучения, применяемых для прогнозирования характеристик СБИС, работает со схемами на этапе физического синтеза, т.к. на нем появляется больше информации о синтезируемой схеме (например, план размещения на кристалле). Однако разработчик аппаратуры заинтересован получать прогнозы о результате синтеза как можно раньше, желательно на этапе RTL-модели или логической схемы.

В данной статье описан опыт применения восьми моделей машинного обучения для прогнозирования производительности и площади СБИС по ее логической схеме до этапа технологического отображения. В качестве набора данных (dataset) для обучения разработанных моделей использовалась часть открытого набора данных OpenABC-D [1]. Раздел 2 посвящен обзору существующих работ по прогнозированию характеристик СБИС. Раздел 3 содержит описание использованных моделей машинного обучения и набора данных. В разделе 4 приведены результаты экспериментов. Наконец, раздел 5 содержит выводы и направления дальнейших исследований.

## **2. Обзор существующих работ**

Сфера применения методов машинного обучения для прогнозирования различных характеристик СБИС активно развивается. Наиболее часто на различных этапах синтеза прогнозируются значения РРА. Распространено также прогнозирование различных эффектов, например, перегрузки коммутационных линий (congestion). В статье [2] для этого применяется графовая сеть внимания (Graph Attention Network, GAT), а также построение тепловых карт, показывающих участки СБИС с наиболее перегруженными коммутационными линиями. Предложенная модель имеет большую точность предсказания по сравнению с аналитическими моделями.

В статьях [3] и [4] методы машинного обучения применяются для прогнозирования временных характеристик СБИС. В работе [3] для этого используется графовая нейронная сеть, а в работе [4] – регрессия Лассо, нейронные сети и случайный лес. Эксперименты в [3] показывают точность прогнозов, сопоставимую с коммерческими инструментами статического временного анализа. Авторы [4] утверждают, что метод случайного леса позволяет достигать результатов, сравнимых с результатами инструмента синтеза, полученными после этапа трассировки. При этом обе статьи показывают намного большую скорость работы методов машинного обучения по сравнению с инструментами синтеза. Стоит заметить, что обе работы используют признаки для прогнозирующих моделей на основе схем после этапа размещения, когда уже известны некоторые геометрические параметры СБИС.

В работе [5] предлагается метод оценки длины соединений и временных характеристик логической схемы до этапа размещения на основе GAT. Авторы предлагают моделировать отдельно задержки на выходах вентилях и задержки межсоединений, а также извлекать топологическую информацию путем разделения графа.

В работе [1] описывается набор логических схем и сценариев их оптимизации для использования в машинном обучении. Он будет рассмотрен подробнее в следующих

разделах. Помимо самого набора данных OpenABC-D, авторы показывают способы его применения на примере нескольких моделей машинного обучения, основанных на графовой и сверточной нейронных сетях. Эти модели нацелены на прогнозирование качества результата синтеза (количество вентилях в схеме, площадь, задержка). На вход графовой нейронной сети поступает логическая схема, а на вход сверточной нейронной сети – сценарий синтеза. Затем результаты работы этих моделей поступают на вход полносвязной нейронной сети, которая выдает прогнозируемое значение одной из характеристик. Проведенные авторами эксперименты показывают высокое качество прогнозов.

В данной работе было решено использовать набор данных OpenABC-D в качестве основы для машинного обучения. Но, в отличие от большинства рассмотренных статей, были выбраны «простые» модели, а не графовые сети, и общие признаки схем.

### 3. Прогнозирование характеристик СБИС

#### 3.1. Логические схемы

Как уже было упомянуто, процесс разработки цифрового устройства начинается с создания его RTL-модели на языке описания аппаратуры (hardware description language, HDL), например, Verilog или VHDL. Далее следует стадия логического синтеза, во время которой RTL-модель трансформируется в логическую схему в некотором базисе, не привязанном к конкретной технологической библиотеке. Такую схему можно представить в виде графа, вершины которого представляют собой логические функциональные элементы (вентили), а дуги - соединения между ними. Некоторые вершины графа помечены как входные или выходные. Одно из популярных представлений логических схем – конъюнкторно-инверторные графы (And-Inverter Graph, AIG). В узлах этого графа используются только конъюнкторы (вентили “И”), а дуги могут быть помечены операцией “НЕ”. На рис. 1 изображена схема в базисе И-ИЛИ-НЕ и соответствующий ей AIG.

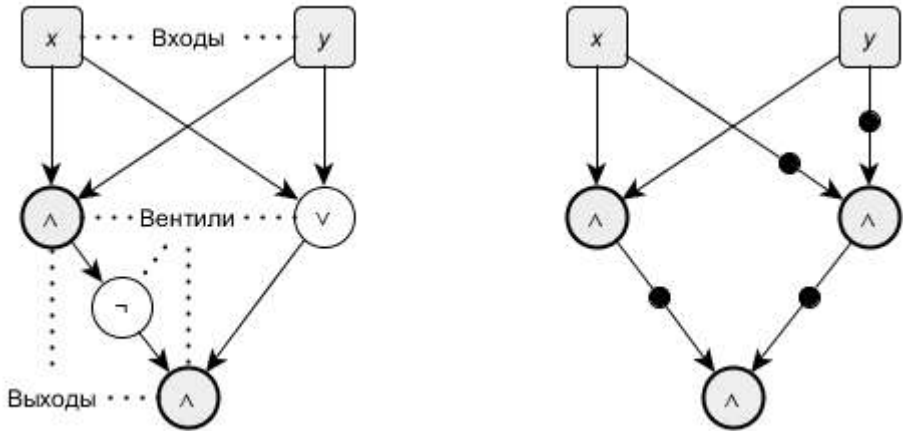


Рис. 1. Логическая схема в базисе И-ИЛИ-НЕ и соответствующий ей AIG.

Fig. 1. A netlist and its corresponding AIG.

Далее логическая схема подвергается технологически независимой оптимизации, обычно с целью уменьшить ее глубину или количество вентилях в ней. Затем она проходит этап технологического отображения и технологически зависимой оптимизации. На этом этапе схема переводится в базис конкретной технологической библиотеки.

Следующей стадией является физический синтез, состоящий из этапов размещения и трассировки. На этапе размещения функциональные элементы схемы располагаются на плоскости проектируемого кристалла. А на этапе трассировки они соединяются проводниками и слоями металлизации. Наконец, генерируется топология СБИС в виде файла GDSII. Этот файл отправляется на фабрику для производства готового изделия.

В данной работе для прогнозирования характеристик СБИС было решено опираться на технологически независимые схемы, а именно, AIG. Во-первых, так как прогнозирование на ранних стадиях синтеза позволяет ускорить процесс разработки аппаратуры. А во-вторых, прогнозирующие модели для таких схем легко переиспользовать для разных технологических библиотек, так как не требуется извлекать разные признаки схемы в зависимости от используемой технологии.

## 3.2. Набор данных

В качестве набора данных для обучения прогнозирующих моделей была использована часть логических схем из открытого набора данных логических схем OpenABC-D. Этот набор данных основан на 29 RTL-моделях, взятых из различных открытых источников и реализующих несколько классов функциональности, а именно: коммуникационные протоколы, контроллеры шин, алгоритмы шифрования, алгоритмы обработки цифровых сигналов, микропроцессоры. Размер моделей варьируется от нескольких сотен до сотен тысяч логических вентилей. Для каждой RTL-модели авторы набора данных сгенерировали по 1500 случайных сценариев логической оптимизации инструмента ABC [6], каждый из которых состоит из 20 последовательных трансформаций. Схема, полученная на каждом шаге оптимизации, сохранялась в виде AIG в форматах GraphML [7] и bench [8]. После 20-го шага оптимизированная схема проходила технологическое отображение и размечалась предварительными данными о площади и задержке. В качестве целевой технологии авторы набора данных использовали технологию NanGate 45nm.

Набор данных OpenABC-D предназначен для моделей, прогнозирующих результаты логической оптимизации и получающих на вход исходную логическую схему и сценарий ее оптимизации. Целью нашей же работы являлось прогнозирование характеристик СБИС без учёта сценариев оптимизации, поэтому для обучения прогнозирующих моделей из набора данных OpenABC-D были выбраны только логические схемы, полученные после 20-го шага оптимизации (всего 43 500). Их разметка данными о площади и задержке не менялась.

Отобранный набор данных делился на обучающую и тестовую выборки двумя способами: все RTL-модели известны, некоторые RTL-модели неизвестны. В первом случае в обучающую выборку попадало по 1000 схем из каждой RTL-модели и по 500 - в тестовую выборку. Во втором случае обучающая выборка формировалась из всех логических схем 19-и RTL-моделей, а в тестовую выборку попадали оставшиеся схемы из 10 RTL-моделей.

## 3.3. Модели машинного обучения

Для прогнозирования характеристик СБИС было разработано восемь моделей машинного обучения:

- полносвязная нейронная сеть;
- сверточная нейронная сеть;
- случайный лес;
- градиентный бустинг XGBoost (XG-бустинг);
- градиентный бустинг LightGBM (LG-бустинг);
- линейная регрессия;

- регрессия Лассо;
- метод опорных векторов.

Модели были программно реализованы с помощью библиотек Pytorch [9] (сверточная нейронная сеть), Tensorflow [10] (полносвязная нейронная сеть), SciKit-Learn [11] (случайный лес, линейная регрессия, регрессия Лассо, метод опорных векторов), XGBoost [12], LightGBM [13].

В качестве входа для моделей машинного обучения использовались следующие признаки логических схем:

- количество первичных входов;
- количество первичных выходов;
- количество конъюнкторов;
- количество инверторов;
- количество буферов;
- глубина схемы (наибольший путь) в вентилях.

Было создано по две версии моделей машинного обучения: для прогнозирования значения площади и для прогнозирования значения задержки (кроме сверточной нейронной сети, которая предсказывала сразу оба значения). Каждая из моделей обучалась на двух разбиениях набора данных (с известными и неизвестными RTL-моделями). Значения энергопотребления не прогнозировались из-за отсутствия соответствующей разметки, а также из предположения, что входные признаки недостаточно характеризуют энергопотребление (для этого требуются сведения о переключательной активности элементов схемы). Гиперпараметры обучаемых моделей подбирались с помощью алгоритма поиска по сетке (grid search).

Качество прогнозирующих моделей оценивалось по трем метрикам: коэффициенту детерминации ( $R^2$ ), среднеквадратической ошибке (mean squared error, MSE) и средней абсолютной процентной ошибке (mean average percentage error, MAPE). Основной метрикой была выбрана MAPE.

## 4. Эксперименты

Результаты обучения моделей для прогнозирования площади представлены в табл. 1. Наилучший результат на наборе данных со всеми известными RTL-моделями показали модели XG- и LG-бустинга. На наборе данных с неизвестными RTL-моделями лучшей была полносвязная нейронная сеть.

Табл. 2 содержит результаты обучения моделей для прогнозирования задержки. Наилучший результат на наборе данных со всеми известными RTL-моделями опять же показали XG- и LG-бустинги. На наборе данных с неизвестными RTL-моделями на этот раз лучшей был XG-бустинг.

Во время исследования “хорошим” значением MAPE считалось 0.2 (то есть 20%) и меньше. Таким образом, при прогнозировании площади по известным RTL-моделям под этот критерий попали следующие модели: полносвязная нейронная сеть, случайный лес, XG- и LG-бустинги, регрессия Лассо и метод опорных векторов. При прогнозировании площадей по неизвестным RTL-моделям критерию удовлетворяют только полносвязная нейронная сеть и XG-бустинг.

Прогнозирование задержки с необходимой точностью оказалось под силу только XG- и LG-бустингу и только на наборе данных с известными RTL-моделями. На наборе данных с неизвестными RTL-моделями необходимой точности не достигла ни одна модель. При этом

некоторые модели даже показывали неадекватные значения коэффициента детерминации (меньше 0).

Результаты линейной регрессии во всех случаях были наихудшими и выбивающимися из общей картины, что можно объяснить нелинейностью входных данных.

Табл. 1. Результаты прогнозирования значения площади.

Table 1. Area prediction results.

Модель	Набор данных с известными RTL-моделями			Набор данных с неизвестными RTL-моделями		
	R <sup>2</sup>	MAPE	MSE	R <sup>2</sup>	MAPE	MSE
Полносвязная нейронная сеть	0.995	0.121	8 899 171	0.979	<b>0.100</b>	9 693 661
Свёрточная нейронная сеть	0.454	0.405	138 203 467	0.433	0.420	190 000 000
Случайный лес	0.990	0.037	2 392 959	0.930	0.320	30 025 834
XG-бустинг	0.999	<b>0.012</b>	1 348 663	0.959	0.179	18 729 656
LG-бустинг	0.999	0.016	1 088 640	0.936	0.327	29 187 983
Линейная регрессия	0.932	2.140	2.6*10 <sup>16</sup>	0.050	30.640	3.9*10 <sup>16</sup>
Регрессия Лассо	0.989	0.079	20 417 728	0.979	0.248	9 292 597
Метод опорных векторов	0.987	0.080	24 619 178	0.983	0.440	7 624 740

Табл. 2. Результаты прогнозирования значения задержки.

Table 2. Delay prediction results.

Модель	Набор данных с известными RTL-моделями			Набор данных с неизвестными RTL-моделями		
	R <sup>2</sup>	MAPE	MSE	R <sup>2</sup>	MAPE	MSE
Полносвязная нейронная сеть	0.565	0.387	159 557 646	-0.026	0.921	257 339 336
Свёрточная нейронная сеть	0.454	0.405	138 203 467	0.433	0.420	190 000 000
Случайный лес	0.510	0.810	179 075 512	1	3.220	503 098 616
XG-бустинг	0.887	<b>0.144</b>	41 527 151	0.427	<b>0.599</b>	143 795 603
LG-бустинг	0.906	0.149	34 277 760	-2.950	3.599	992 478 350
Линейная регрессия	0.935	14.500	2.6*10 <sup>16</sup>	0.050	270.900	3.9*10 <sup>16</sup>

Регрессия Лассо	0.239	0.826	63 702 028	-0.020	0.870	255 980 352
Метод опорных векторов	-0.011	0.730	371 104 033	0.0113	1.240	248 009 158

На рис. 2 изображены диаграммы в координатах площадь/задержка реальных и прогнозных значений характеристик для 29 RTL-моделей. Прогнозирование осуществлялось с помощью модели XG-бустинга на наборе данных с неизвестными RTL-моделями. Можно заметить, что предсказанные значения задержки во многих случаях имеют маленький разброс и располагаются посередине областей реальных значений (то есть, как правило, предсказывается некоторая средняя задержка для данной RTL-модели). Это также может объяснять большие значения среднеквадратической ошибки.

Анализ признаков логических схем показал, что значения площади СБИС сильно коррелируют с количеством вентилях, поэтому прогнозирующие модели показали лучшие результаты именно при предсказании этой характеристики. Некоторая корреляция существует между глубиной схемы и задержкой, но небольшая точность прогнозирующих моделей в этом случае свидетельствует о недостаточной информативности использованных признаков логической схемы.

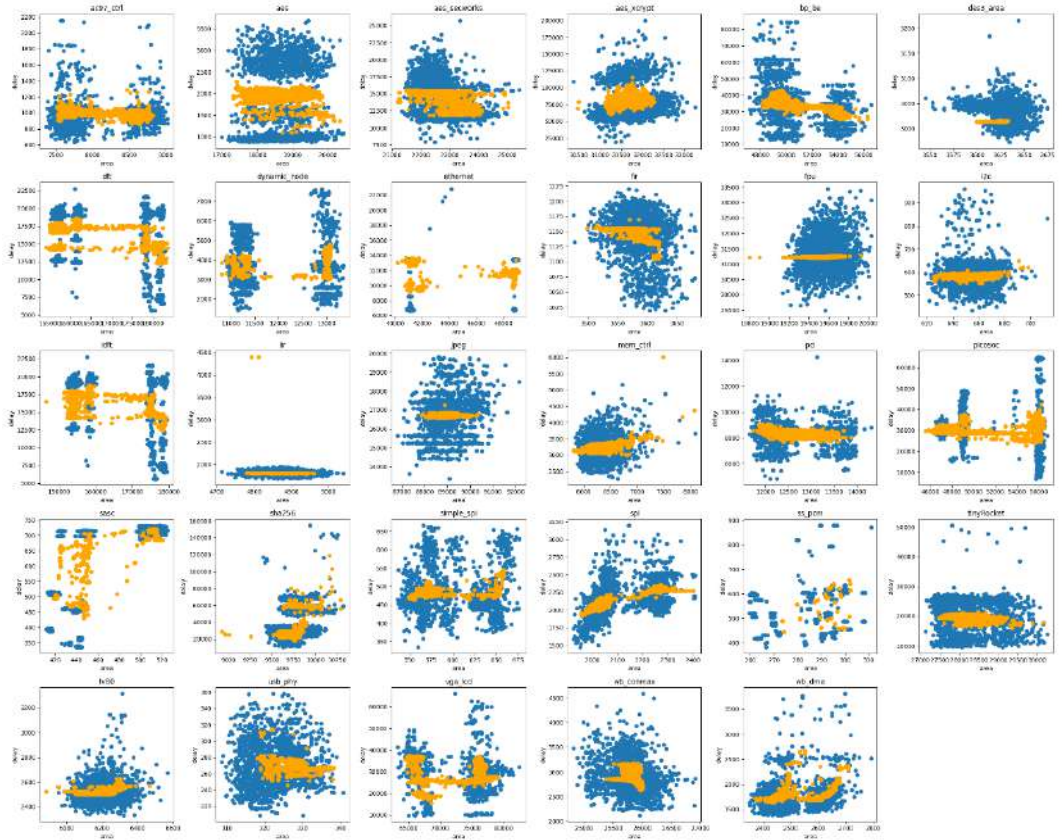


Рис. 2. Реальные (синие точки) и спрогнозированные моделью XG-бустинга (желтые точки) значения характеристик СБИС.  
Fig. 2. Actual (blue dots) and predicted by the XGBoost model (yellow dots) ASIC characteristics.

## 5. Заключение

В результате проведенной работы были разработаны и обучены восемь моделей машинного обучения, прогнозирующих предварительные значения площади и задержки СБИС по ее логической схеме. Для этого использовалась часть открытого набора данных OpenABC-D. Эксперименты с обученными моделями показали, что требуемое качество прогнозирования достигалось на наборе данных с известными RTL-моделями. Однако при ужесточении требований к качеству, либо при прогнозировании характеристик неизвестных RTL-моделей, разработанные модели машинного обучения показывают неудовлетворительный результат. В связи с этим можно выделить следующие проблемы:

- Малая вариативность набора данных. Несмотря на большое количество схем для обучения, в их основе лежит всего 29 RTL-моделей, а применение большого количества оптимизаций не вносит существенных изменений в эти схемы.
- Недостаточность признаков схем. Входные признаки моделей машинного обучения позволяют прогнозировать на приемлемом уровне только площадь СБИС (коррелирует с количеством вентилях в схеме). Для прогнозирования задержки и энергопотребления имеющиеся признаки явно неинформативны.

Для решения обозначенных проблем требуются дальнейшие исследования. Во-первых, необходимо увеличить количество RTL-моделей в наборе данных, при этом уменьшив количество вариантов их оптимизации. Во-вторых, требуется точная разметка набора данных при помощи САПР физического синтеза, а не предварительная при помощи инструмента ABC. В этом случае при прогнозировании характеристик СБИС потребуются учитывать настройки физического синтеза, которые могут сильно влиять на конечный результат. В-третьих, для прогнозирования задержки и энергопотребления требуются признаки, более полно характеризующие эти аспекты схем (например, переключательная активность элементов).

Так как логические схемы являются графами, одним из направлений для улучшения качества прогнозирования может быть применение графовых нейронных сетей. Этот вид нейронных сетей позволяет учитывать структуру графа помимо его высокоуровневых признаков и часто применяется в машинном обучении в области микроэлектроники.

## Список литературы / References

- [1]. Chowdhury A.B., Tan B., Karri R., Garg S. OpenABC-D: A Large-Scale Dataset For Machine Learning Guided Integrated Circuit Synthesis. ArXiv, abs/2110.11292 (online). Доступно по ссылке: <https://arxiv.org/pdf/2110.11292.pdf>, 2021.
- [2]. Kirby R., Godil S., Roy R., Catanzaro B. CongestionNet: Routing congestion prediction using deep graph neural networks. IFIP/IEEE 27th International Conference on Very Large Scale Integration (VLSI-SoC), 2019, pp. 217—222.
- [3]. Guo Z., Liu M., Gu J., Zhang S., Pan D.Z., Lin Y. A timing engine inspired graph neural network model for pre-routing slack prediction. Proceedings of the ACM/IEEE Design Automation Conference (DAC), 2022, pp. 1207—1212.
- [4]. Barboza E. C., Shukla N., Chen Y., Hu J. Machine Learning-Based Pre-Routing Timing Prediction with Reduced Pessimism. ACM/IEEE Design Automation Conference (DAC), 2019, pp. 1-6.
- [5]. Xie Z., Liang R., Xu X., Hu J., Chang C.-C., Pan J., Chen Y. Preplacement Net Length and Timing Estimation by Customized Graph Neural Network. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, vol. 41, No. 11, 2022, pp. 4667-4680.
- [6]. Berkeley Logic Synthesis and Verification Group, ABC: A System for Sequential Synthesis and Verification. Доступно по ссылке: <http://www.eecs.berkeley.edu/~alanmi/abc>, дата обращения: 12.12.2023.
- [7]. Формат файлов GraphML. Доступно по ссылке: <http://graphml.graphdrawing.org>, дата обращения 12.12.2023.

- [8]. Brglez F., Bryan D., Kozminski K. Combinational profiles of sequential benchmark circuits. 1989 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), vol.3, 1989, pp. 1929-1934.
- [9]. Библиотека машинного обучения Pytorch. Доступно по ссылке: <https://pytorch.org>, дата обращения 12.12.2023.
- [10]. Библиотека машинного обучения Tensorflow. Доступно по ссылке: <https://www.tensorflow.org>, дата обращения 12.12.2023.
- [11]. Библиотека машинного обучения SciKit-Learn. Доступно по ссылке: <https://scikit-learn.org>, дата обращения 12.12.2023.
- [12]. Библиотека градиентного бустинга XGBoost. Доступно по ссылке: <https://github.com/dmlc/xgboost>, дата обращения 12.12.2023.
- [13]. Библиотека градиентного бустинга LightGBM. Доступно по ссылке: <https://github.com/microsoft/LightGBM>, дата обращения 12.12.2023.

## **Информация об авторах / Information about authors**

Михаил Сергеевич ЛЕБЕДЕВ является старшим научным сотрудником научной лаборатории «Гетерогенные компьютерные системы» РЭУ им. Г.В. Плеханова, а также научным сотрудником Института Системного Программирования им. В.П. Иванникова РАН. Сфера научных интересов: логический синтез, машинное обучение, нейронные сети, цифровая аппаратура.

Mikhail Sergeyevich LEBEDEV is a senior researcher at the «Heterogeneous computer systems» laboratory of Plekhanov RUE, and a researcher at Ivannikov Institute for System Programming of the RAS. His research interests are: logic synthesis, machine learning, neural networks, digital hardware.

Дарья Алексеевна ДЫСКИНА является студентом направления «Информационная безопасность» в РЭУ им. Г.В. Плеханова. Ее научная деятельность связана с применением методов машинного обучения в процессе оптимизации цифровых схем.

Daria Alexeevna DYSKINA is a student of the «Information Security» program at the Plekhanov Russian University of Economics. Her scientific activities are related to the application of machine learning methods in the process of optimizing digital circuits.

Анастасия Юрьевна ЕРЕМЕНКО является студентом направления «Прикладная математика и информатика» РЭУ им. Г.В. Плеханова. Ее научные интересы включают анализ данных, машинное обучение и искусственный интеллект.

Anastasia Yuryevna EREMENKO is a student of the «Applied Mathematics and Computer science» program at the Plekhanov Russian University of Economics. Her research interests include data analytics, machine learning and artificial intelligence.

Фёдор Александрович КАБАНОВ является студентом направления «Информационная безопасность» в РЭУ им. Г.В. Плеханова. Его научная деятельность связана с применением методов машинного обучения в процессе оптимизации цифровых схем.

Fedor Aleksandrovich KABANOV is a student of the «Information Security» program at Plekhanov Russian University of Economics. His scientific activities are related to the application of machine learning methods in the process of optimizing digital circuits.

Илья Александрович КОЗМИН является студентом направления «Прикладная математика и информатика» в РЭУ им. Г.В. Плеханова. Его научные интересы включают искусственный интеллект, работа с большими данными, методы оптимизации логических схем.

Ilya Aleksandrovich KOZMIN is a student of the «Applied Mathematics and Computer science» program at the Plekhanov Russian University of Economics. His research interests include artificial intelligence, big data, netlist optimization methods.

Даниил Михайлович ПЕТРЕНКО является студентом направления «Информационная безопасность» в РЭУ им. Г.В. Плеханова. Его научные интересы связаны с применением машинного обучения для анализа логических схем цифровых устройств.

Daniil Mikhailovich PETRENKO is a student of the «Information Security» program at the Plekhanov Russian University of Economics. His research interests are related to the application of machine learning to netlist analysis.

Никита Басуевич ПОУДИАЛ является студентом направления «Информационная безопасность» в РЭУ им. Г.В. Плеханова. Его научная деятельность связана с использованием машинного обучения для анализа больших данных.

Nikita Basuevich POUDIAL is a student of the «Information Security» program at Plekhanov Russian University of Economics. His research activity is related to the usage of machine learning to analyze massive data.

Андрей Алексеевич СЕРГЕЕВ является студентом направления «Информационная безопасность» в РЭУ им. Г.В. Плеханова. В сферу его научных интересов входит изучение нейронных сетей и процессов, связанных с их оптимизацией.

Andrey Alekseevich SERGEEV is a student at the «Information Security» program at the Plekhanov Russian University of Economics. His research interests include the study of neural networks and processes related to their optimization.

Рена Афрайл кызы ШИРИНОВА является студентом РЭУ им. Г.В. Плеханова по специальности «Прикладная математика и информатика в экономике». Ее научные интересы включают машинное обучение и обучение с подкреплением.

Rena Afrail kyzy SHIRINOVA is a student of the «Applied Mathematics and Computer science in economics» program at the Plekhanov Russian University of Economics. Her research interests include machine learning, in particular, reinforcement learning.





DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(2)-5

## Проектирование и развитие механизма мандатного контроля целостности в операционной системе Astra Linux

<sup>1</sup> П.Н. Девянин, ORCID: 0000-0003-2561-794X <pdevyanin@astralinux.ru>

<sup>1</sup> А.А. Старостин, ORCID: 0009-0008-6465-080X <astarostin@astralinux.ru>

<sup>1</sup> Д.С. Панов, ORCID: 0009-0001-6430-7947 <dpanov@astralinux.ru>

<sup>2</sup> С.В. Усачев, ORCID: 0009-0001-2147-2811 <usachev\_semen@mail.ru>

<sup>1</sup> ООО «РусБИТех-Астра», Россия, 117105, г. Москва, Варшавское ш., д. 26.

<sup>2</sup> ООО «Яндекс», Россия, 119021, г. Москва, ул. Льва Толстого, д. 16.

**Аннотация.** Механизм мандатного контроля целостности (МКЦ) – фундамент безопасности сертифицированной по высшим классам защиты и уровням доверия операционной системы (ОС) Astra Linux, обеспечивающий наряду с другими механизмами, включая замкнутую программную среду (ЗПС), защиту привилегированных процессов ОС, целостность исполняемых и конфигурационных системных файлов и каталогов ОС, а также пользовательских данных. Использование МКЦ направлено на защиту от вирусов (например, «шифровальщиков»), от эксплуатации многих типовых уязвимостей программного обеспечения (ПО) ОС семейства Linux, в том числе приводящих к атакам нарушителя с правами суперпользователя root. Научной основой реализации МКЦ в ОС Astra Linux является соответствующая критериям ГОСТ Р 59453.1-2021 мандатная сущностно-ролевая ДП-модель управления доступом и информационными потоками в ОС семейства Linux (МРОСЛ ДП-модель). При этом внедрение механизма МКЦ поверх штатного для ОС семейства Linux дискреционного управления доступом представляет существенные трудности, часто требует разработки технологий и сценариев согласованного с ним применения системного и прикладного ПО. Авторами проводятся исследования по проектированию, развитию и эффективному использованию МКЦ. Во-первых, это доработки МРОСЛ ДП-модели для теоретического описания механизма МКЦ с учетом вносимых в него изменений. Во-вторых, адаптированная к МКЦ технология контейнерной виртуализации, когда потенциально «опасное» ПО запускается в изолированных на промежуточных уровнях целостности (в сессиях администратора системы, работающего на максимальном уровне целостности) или отрицательных уровнях целостности (в сессиях непривилегированного пользователя, работающего на нулевом уровне целостности) контейнерах-«песочницах» (например, docker). В-третьих, технологии и сценарии непосредственного запуска прикладного ПО на промежуточных или отрицательных уровнях целостности с настройкой меню рабочего стола администратора системы или непривилегированного пользователя, соответственно. В-четвертых, утилита настройки МКЦ, выставляющая файлам и каталогам уровни целостности или специальные флаги на основе правил профилей LSM-модуля AppArmor.

**Ключевые слова:** операционная система; мандатный контроль целостности; МРОСЛ ДП-модель; контейнер; Astra Linux.

**Для цитирования:** Девянин П.Н., Старостин А.А., Панов Д.С., Усачев С.В. Проектирование и развитие механизма мандатного контроля целостности в ОС Astra Linux. Труды ИСП РАН, том 37, вып. 2, 2025, стр. 61–78. DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(2)-5.

## Design and Development of Mandatory Integrity Control in Astra Linux OS

<sup>1</sup> P.N. Devyanin, ORCID: 0000-0003-2561-794X <pdevyanin@astralinux.ru>

<sup>1</sup> A.A. Starostin, ORCID: 0009-0008-6465-080X <astarostin@astralinux.ru>

<sup>1</sup> D.S. Panov, ORCID: 0009-0001-6430-7947 <dpanov@astralinux.ru>

<sup>2</sup> S.V. Usachev, ORCID: 0009-0001-2147-2811 <usachev\_semen@mail.ru>

<sup>1</sup> RusBITech-Astra,

26, Varshavskoe, Moscow, 117105, Russia.

<sup>2</sup> Yandex,

16, Leo Tolstoy St., Moscow, 119021, Russia.

**Abstract.** Mandatory integrity control (MIC) is the security foundation of the Astra Linux operating system (OS) certified for the highest protection classes and trust levels, which, along with other mechanisms, including a closed software environment, ensures protection of privileged OS processes, integrity of executable and configuration system files and OS directories, as well as user data. The use of MIC is aimed for protecting against viruses (for example, ransomware), from the exploitation of many typical vulnerabilities in the software of the Linux family OS, including those leading to attacks by the adversaries with superuser's root rights. The scientific basis for the implementation of MIC in the Astra Linux OS is the mandatory entity-role model of access and information flows security control in OS of Linux family (MROSL DP-model) that meets the criteria of GOST R 59453.1-2021. At the same time, the implementation of the MIC over the standard discretionary access control for the OS of Linux family presents significant difficulties and often requires the development of technologies and scenarios for the coordinated use of system and application software. In this regard, the authors conduct research on the design, development and effective use of MIC, a number of the results of which are devoted to this article. Firstly, there are modifications of the MROSL DP-model for the theoretical description of the MIC, including new features making for it. Secondly, adapting for MIC the container virtualization technology, when potentially "dangerous" software (for example, browsers) is launched at isolated intermediate integrity levels (in sessions of the system administrator with maximum integrity level) or negative integrity levels (in sessions of an unprivileged user with zero integrity level) in containers-sandboxes (for example, docker). Thirdly, technologies and scenarios for directly launching application software at intermediate or negative integrity levels with the configuration of the desktop menu of the system administrator or unprivileged user, respectively. Fourthly, the MIC configuration utility, which setting integrity levels or special flags for files and directories based on the rules of the AppArmor LSM module profiles.

**Keywords:** operating system; mandatory integrity control; MROSL DP-model; containers; Astra Linux.

**For citation:** Devyanin P.N., Starostin A.A., Panov D.S., Usachev S.V. Design and development of mandatory integrity control in Astra Linux OS. *Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS*, vol. 37, issue 2, 2025. pp. 61-78 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(2)-5.

### 1. Введение

Управление доступом одна из основных функций безопасности [1], реализуемых средствами защиты информации (СЗИ) такими, как операционные системы (ОС), средства виртуализации, системы управления базами данных (СУБД) и др. В силу относительной простоты в большинстве ОС, особенно семейства Linux, применяется выполняющий эту функцию механизм дискреционного управления доступом [2-3], основанного на непосредственном и независимом друг от друга назначении прав доступа субъектам (например, процессам) к сущностям (объектам доступа, например, файлам или каталогам). Были решения, например, еще в 1976 г. в ОС Multics, использования более сложного механизма мандатного управления доступом [3-4], когда субъектам назначаются уровни доступа, сущностям – уровни конфиденциальности, и с использованием сравнения этих уровней принимаются решения о предоставлении доступов с конечной целью предотвратить создание информационных потоков (скрытых каналов) с высокого уровня

конфиденциальности на низкий [5]. Особенно часто в СУБД в качестве «промежуточного» по сложности реализации и достаточного гибкого механизма используется ролевое управление доступом [3, 6], отличающееся от дискреционного в первую очередь (помимо иерархии ролей, ограничений и др.) назначением прав доступа субъектам к сущностям не непосредственно, а через роли.

Во многом прорывным стало применение длительное время невостребованного механизма мандатного контроля целостности (МКЦ) [3, 7], близкого по технологиям реализации к мандатному управлению доступом. Он основан на присвоении субъектам и сущностям уровней целостности и использовании сравнения этих уровней для принятия решения о предоставлении доступов с целью – предотвратить получение субъектом с меньшим уровнем целостности управления другим субъектом с большим уровнем целостности. Таким образом задача МКЦ – защита привилегированных высокоцелостных компонент (субъектов или сущностей) СЗИ от их несанкционированного изменения или захвата управления над ними со стороны непривилегированных низкоцелостных субъектов. Внедрение в 2007 г. в ОС Microsoft Windows Vista механизма МКЦ совместно с механизмом контроля учётных записей (User Account Control – UAC) [8] показало его высокую эффективность для обеспечения целостности программной среды этой ОС, предотвращения заражения вирусами и внедрения программных закладок.

Именно поэтому более 10 лет назад было решено сделать МКЦ одним из основных механизмом защиты ОС Astra Linux (операционной системы специального назначения Astra Linux Special Edition) [9-10], согласованным с штатным для всех ОС семейства Linux механизмом дискреционного управления доступом, а также механизмом мандатного управления доступом, который к тому времени уже был внедрен в эту ОС. Эти механизмы защиты совместно с рядом других, например, замкнутой программной средой (ЗПС), реализуются в подсистеме безопасности PARSEC ОС Astra Linux.

Научной основой реализации перечисленных механизмов управления доступом в ОС Astra Linux является мандатная сущностно-ролевая ДП-модель управления доступом и информационными потоками в ОС семейства Linux (МРОСЛ ДП-модель) [3]. Данная модель полностью соответствует критериям, изложенным в ГОСТ Р 59453.1-2021 [1], и верифицирована с применением инструментальных средств [11] согласно рекомендациям ГОСТ Р 59453.2-2021 [12]. При этом модель имеет иерархическое представление, позволяющее описывать ее по уровням (слоям), где каждый нижний уровень модели представляет абстрактную систему, элементы которой не зависят от новых элементов, принадлежащих более высокому уровню модели, который, в свою очередь, наследует, а при необходимости корректирует или дополняет элементы нижнего уровня. В целом иерархическое представление модели состоит из восьми уровней – четырех уровней для моделирования управления доступом непосредственно в ОС (ролевого управления доступом, мандатного контроля целостности, мандатного управления доступом с информационными потоками по памяти, мандатного управления доступом с информационными потоками по времени) и четырех уровней для решения аналогичной задачи в штатной для ОС СУБД PostgreSQL. Такое разделение МРОСЛ ДП-модели на уровни соответствует тому, как она реализуется непосредственно в программном коде подсистемы безопасности PARSEC.

В контексте настоящей статьи наибольший интерес представляет второй уровень иерархического представления МРОСЛ ДП-модели, соответствующий механизму МКЦ. Этот уровень, как и вся модель регулярно модифицируется [13], чтобы, с одной стороны, отвечать находящейся в развитии теории информационной безопасности, с другой стороны, соответствовать появлению новых технологий применения механизмов защиты ОС Astra Linux. Такая регулярная модификация МРОСЛ ДП-модели полностью отвечает рекомендациям проекта национального стандарта ГОСТ Р «Защита информации. Формальная модель управления доступом. Часть 3. Рекомендации по разработке» [14].

Поскольку механизм МКЦ является фундаментом обеспечения безопасности ОС Astra Linux, то его дальнейшему проектированию, выработке эффективных сценариев его применения прилагаются значительные усилия специалистов «Группы Астра» (ООО «РусБИТех-Астра»), в том числе в этом участвуют авторы. Многие из этих сценариев стали возможными за счет реализации (начиная с релиза ОС Astra Linux 2021 г.) в механизме МКЦ достаточно «выразительных» уровней целостности, являющихся объединением неиерархических категорий целостности (маски 32 бит) и линейных уровней – знаковых чисел от -128 до 127 [10].

К первому направлению проектирования МКЦ относится адаптированная к нему технология контейнерной виртуализации, которая позволяет создавать для недоверенного потенциально «опасного» программного обеспечения (ПО) такого, как браузеры, своеобразные «песочницы», где оно изолируется от остального ПО. Вопросы разработки таких «песочниц» для потенциально «опасного» ПО исследовались в работе [15], посвященной анализу безопасности контейнерной виртуализации в ОС семейства Linux. При этом предлагалось изолировать «опасное» ПО с использованием штатных механизмов ОС таких, как namespaces и cgroups, а также seccomp [16]. Кроме того, в работе [17] исследовались возможности применения для изоляции ПО, имеющегося в пакете безопасности SELinux (LSM-модуле) механизма мандатного управления доступом, предотвращая с его помощью несанкционированный доступ к системным компонентам ОС. Вместе с тем наличие МКЦ в ОС Astra Linux позволяет повысить эффективность этих технологий за счет запуска «песочниц» на промежуточном неиерархическом или на отрицательных линейных уровнях целостности. В этом случае недоверенное ПО, даже если подвергнется атаке нарушителя или заражению вирусом, не будет представлять опасности для всей остальной системы.

Поскольку не все ПО возможно или эффективно запускать с использованием контейнерной виртуализации, следующим направлением исследований стала разработка технологий непосредственного запуска прикладного ПО на промежуточных или отрицательных уровнях целостности. Похожие технологии применяются в пакете безопасности SELinux, что снижает риск атак на ОС семейства Linux через эксплуатацию уязвимости ПО [18]. Кроме того, как уже было отмечено, МКЦ используется в ОС семейства Windows, где уровни целостности обеспечивают изоляцию процессов, файлов и каталогов, гарантируя, что процессы с низким уровнем целостности не могут модифицировать данные с более высоким уровнем целостности [8, 19]. Эти технологии исследуются в ряде работ, касающихся интеграции МКЦ с другими механизмами такими, как ролевое управление доступом, что может обеспечить гибкую многоуровневую защиту ОС [20]. Однако важным аспектом выполненного авторами исследования является учет специфики реализации механизма МКЦ в ОС Astra Linux, с целью разработки сценариев его применения, которые позволят оптимизировать работу ПО, анализируя влияние его применения на безопасность ОС в сессиях привилегированных и непривилегированных пользователей.

Также при проектировании и развитии механизма МКЦ в ОС Astra Linux целесообразно использовать существующие апробированные практики, повышающие эффективность управления доступом в ОС семейства Linux. Одна из них базируется на применении LSM-модуля AppArmor, реализующего более развитые чем штатные для ОС рассматриваемого семейства технологии дискреционного управления доступом [21]. Данный LSM-модуль позволяет назначать права доступа и ограничивать доступ к ресурсам ОС конкретному ПО посредством соответствующих ему профилей AppArmor. Непосредственное применение AppArmor в ОС Astra Linux затруднено в связи с практической невозможностью верификации этого механизма и обеспечения к нему доверия. Однако сами профили AppArmor могут быть полезны для настройки механизмов защиты ОС Astra Linux и в первую очередь МКЦ.

В целом развитие МРОСЛ ДП-модели, включая соответствующего МКЦ второго уровня ее иерархического представления, проектирование этого механизма управления доступом для

дальнейшего внедрения его результатов в ОС Astra Linux ведется в «Группе Астра» в рамках реализации единой методологии разработки безопасного системного ПО [22].

В связи с изложенным статья организована следующим образом. В следующем разделе рассматриваются основные новые элементы соответствующего МКЦ второго уровня иерархического представления МРОСЛ ДП-модели. В разделе 3 анализируются результаты проектирования адаптированной к МКЦ технологии контейнерной виртуализации. В разделе 4 излагаются технологии и сценарии непосредственного запуска прикладного ПО на промежуточных или отрицательных уровнях целостности. Раздел 5 посвящен настройке МКЦ на основе правил профилей LSM-модуля AppArmor. Заключение завершает статью, в нем подводятся итоги выполненного к настоящему времени теоретического и практического проектирования механизма МКЦ ОС Astra Linux, а также рассматриваются дальнейшие направления этих исследований.

## **2. Новые элементы соответствующего МКЦ второго уровня иерархического представления МРОСЛ ДП-модели**

В предыдущем разделе было отмечено, что МРОСЛ ДП-модель является основой для реализации механизма управления доступом в подсистеме безопасности PARSEC ОС Astra Linux. При этом в контексте проводимого авторами исследования по переработке и развитию МКЦ именно в соответствующий ему второй уровень иерархического представления МРОСЛ ДП-модели вносятся наибольшее число изменений. Часть этих изменений уже были применены в [13]. Среди них наибольшее значение для повышения эффективности применения МКЦ имеют специальные метки (флаги) сущностей (файлов и каталогов), позволяющие повысить гибкость настройки этого механизма.

Рассмотрим их подробнее, для чего используем некоторые обозначения, заданные на первом (ролевого управления доступом) и втором уровнях иерархического представления МРОСЛ ДП-модели:

- $U$  – конечное непустое множество учётных записей пользователей;
- $S$  – конечное непустое множество субъектов (процессов) учётных записей пользователей;
- $E = O \cup C$  – конечное непустое множество сущностей, где  $O$  – множество сущностей-объектов (файлов),  $C$  – множество сущностей-контейнеров (каталогов). При этом следует обратить внимание, что в формальных моделях управления доступом под «контейнером», как правило, понимается составная сущность (например, каталог в файловой системе), состоящая из других сущностей-объектов или сущностей-контейнеров, к которым по отдельности возможно осуществление управления доступом. В контексте системного ПО «контейнер», как правило, основанная на виртуализации технология (например, Docker или Podman) изоляции процессов ОС и доступных им ресурсов. Поэтому далее, во избежание путаницы, в случаях, когда речь идет о каталогах файловой системы, используется термин «сущность-контейнер»;
- $R$  – множество ролей;
- $NR$  – множество запрещающих ролей;
- $AR$  – множество административных ролей;
- $(LI, \leq)$  – решётка уровней целостности, при этом заданы минимальный  $i_{low} = \otimes LI$  и максимальный  $i_{high} = \oplus LI$  элементы решётки, соответственно;
- $i_u: U \rightarrow LI$  – функция, задающая для каждой учётной записи пользователя её уровень целостности – максимальный разрешенный уровень целостности субъектов, функционирующих от её имени;

- $i_e: E \rightarrow LI$  – функция, задающая уровень целостности для каждой сущности;
- $i_r: R \cup NR \cup AR \rightarrow LI$  – функция, задающая для каждой роли, запрещающей роли или административной роли её уровень целостности;
- $i_s: S \rightarrow LI$  – функция, задающая для каждого субъекта его текущий уровень целостности.

Тогда соответствующие специальным меткам (флагам) сущностей и ролей функции задаются следующим образом:

- **IRELAX**:  $C \cup R \cup NR \cup AR \rightarrow \{true, false\}$  – функция, задающая способ получения доступа на запись к сущностям-контейнерам, ролям, запрещающим ролям и административным ролям с учетом или без учета их уровня целостности. Если доступ на запись к сущности-контейнеру или роли  $c \in C \cup R \cup NR \cup AR$  разрешён субъекту  $s \in S$  только с текущим уровнем целостности большим или равным уровня целостности этой сущности-контейнера ( $i_s(s) \geq i_e(c)$ ) или роли ( $i_s(s) \geq i_r(c)$ ), то по определению выполняется равенство  $IRELAX(c) = false$ , в противном случае выполняется равенство  $IRELAX(c) = true$  (например, такое значение соответствующего флага у каталога «/tmp», доступ на запись к которому необходимо обеспечить процессам с любым текущим уровнем целостности). При этом, даже если  $IRELAX(c) = true$ , то субъекту  $s$  разрешено переименовывать или удалять непосредственно содержащуюся в сущности-контейнере или роли  $c$  сущность или роль  $e \in E \cup R \cup NR \cup AR$  с уровнем целостности не выше, чем текущий уровень целостности этого субъекта (соответственно,  $i_s(s) \geq i_e(e)$  или  $i_s(s) \geq i_r(e)$ );
- **SSI**:  $E \cup R \cup NR \cup AR \rightarrow \{true, false\}$  – функция, задающая порядок получения доступа на чтение или использования права доступа на выполнение к сущностям, ролям, запрещающим ролям и административным ролям с учетом или без учета их уровня целостности. Если доступ на чтение или использование права доступа на выполнение к сущности или роли  $e \in E \cup R \cup NR \cup AR$  разрешён субъекту только с текущим уровнем целостности большим или равным уровня целостности этой сущности ( $i_s(s) \geq i_e(e)$ ) или роли ( $i_s(s) \geq i_r(e)$ ), то по определению выполняется равенство  $SSI(e) = true$  (например, такое значение соответствующего флага целесообразно задать некоторым файлам с высоким уровнем целостности из каталогов «/etc» и «/dev»), в противном случае выполняется равенство  $SSI(e) = false$ ;
- **SILEV**:  $O \rightarrow \{true, false\}$  – функция, задающая порядок активизации субъекта из сущности-объекта с учетом уровней целостности этого объекта и уровня целостности учетной записи пользователя, от имени которой активизируется субъект (это позволяет процессам в сессии учетной записи пользователя с низким уровнем целостности запускать некоторые процессы, которым для выполнения их функций необходим высокий текущий уровень целостности; например, с помощью соответствующего флага помечается исполняемый файл консольной утилиты `passwd`, запускаемой для изменения пароля низкоцелостной учетной записи пользователя, образ которого хранится в обладающем высоким уровнем целостности файле «/etc/shadow»);
- **ПНН**:  $C \cup R \cup NR \cup AR \rightarrow \{true, false\}$  – функция, определяющая способ задания уровня целостности при создании в сущностях-контейнерах, ролях, запрещающих ролях и административных ролях с наследованием или без наследования их уровня целостности. Если при создании в сущности-контейнере или в роли  $c \in C \cup R \cup NR \cup AR$  необходимо наследование их уровня целостности (с учетом возможной их пометки с помощью функции **IRELAX**), то по определению выполняется равенство  $ПНН(c) =$

true, в противном случае, когда на создаваемые сущности или роли устанавливается минимальный уровень целостности  $i\_low$ , выполняется равенство  $INH(c) = false$ .

При этом в модели говорится, что если значение функции IRELAX, SSI, SILEV или INH от сущности или какой-либо роли равно true, то эта сущность или роль помечена с помощью соответствующей функции.

Также в МРОСЛ ДП-модели по сравнению с ее предыдущими редакциями добавляются три специальные административные роли: `chmac_role`, `inherit_integrity_role` и `setmac_role`. Первая – `chmac_role` соответствует привилегии `PARSEC_CAP_CHMAC` ОС Astra Linux и позволяет обладающему ею как текущей субъекту понижать уровни целостности сущностей, когда они не выше текущего уровня целостности этого субъекта. Вторая – `inherit_integrity_role` соответствует привилегии `PARSEC_CAP_INHERIT_INTEGRITY` и обеспечивает субъекту возможность создавать в сущности-контейнере (каталоге) новые сущности с наследованием уровня целостности от этой сущности-контейнера, как если бы она была помечена с помощью функции INH. Третья – `setmac_role` соответствует привилегии `PARSEC_CAP_SETMAC` и разрешает субъекту активизировать нового субъекта с текущим уровнем целостности меньшим, чем у активизирующего субъекта (по умолчанию их текущие уровни целостности должны быть равными).

Таким образом, перечисленные новые функции и роли применяются в модели как для уточнения порядка администрирования МКЦ, так и для задания порядка наследования уровня целостности от родительской сущности-контейнера (каталога) при создании в нем новой сущности (файла или подкаталога).

Так при администрировании МКЦ изменение значений функций INH, SSI или IRELAX от сущности (функций INH и IRELAX только от сущности-контейнера) разрешено субъекту с текущим уровнем целостности не ниже уровня целостности этой сущности. Понижение уровня целостности сущности разрешено только субъекту, обладающему текущим уровнем целостности не ниже уровня целостности этой сущности и обладающему текущими специальными административными ролями `root_role` (специальной ролью, соответствующей полномочиям суперпользователя root в ОС семейства Linux) и `chmac_role` (как аналогом привилегии `PARSEC_CAP_CHMAC`). При этом для повышения или назначения несравнимого уровня целостности этой сущности или изменения ее параметров, задаваемых функцией SILEV, дополнительно требуется, чтобы субъект был доверенным (имел максимальный текущий уровень целостности  $i\_high$ ) и обладал текущей специальной административной ролью `admin_cap_role`.

Механизм наследования уровней целостности в МРОСЛ ДП-модели описывается следующим образом. При создании в сущности-контейнере по умолчанию новая сущность получает минимальный уровень целостности  $i\_low$ . Исключениями являются случаи, когда сущность-контейнер помечена с помощью функции IRELAX или INH, или создание в ней осуществляется субъектом, обладающим текущей специальной административной ролью `inherit_integrity_role`. Если сущность-контейнер помечена с помощью функции IRELAX, то уровень целостности новой сущности устанавливается равным наибольшей нижней границе значений уровней целостности сущности-контейнера и текущего уровня целостности осуществляющего создание субъекта. Если сущность-контейнер не помечена с помощью функции IRELAX, но помечена с помощью функции INH, или создание в ней осуществляется субъектом, обладающим текущей специальной административной ролью `inherit_integrity_role`, то новая сущность наследует уровень целостности от сущности-контейнера. Кроме того, если сущность-контейнер, в которой осуществляется создание, помечена INH, то создаваемая сущность-контейнер также помечается INH.

Еще одно нововведение в МРОСЛ ДП-модели коснулось механизма перемещения сущности, которому в ОС семейства Linux соответствует, например, применение консольной утилиты `mv`. Этот механизм, по сути, близок к механизмам переименования сущности, а также создания или

удаления «жестких» ссылок (hard link) на сущности-объекты. Поскольку явно он не был описан в предыдущих редакциях модели, а при его применении необходимо учитывать требования МКЦ, было решено учесть его особенности в правиле переименования сущности вида `rename_entity(x, y, old_name, name, z, z')`. Это правило позволяет субъекту  $x$  переименовать или переместить сущность  $y$ , входящую в состав сущности-контейнера  $z$ , в сущность-контейнер  $z'$  (при переименовании  $z$  и  $z'$  совпадают), к которым субъект  $x$  должен иметь доступы на запись и обладать либо текущей специальной административной ролью `root_role`, либо текущими ролями или административными ролями, имеющими к ним право доступа на выполнение `execute`, и одновременно не обладать текущими запрещающими ролями, имеющими к  $z$  и  $z'$  это право доступа. Поскольку на сущность-объект может быть несколько «жестких» ссылок в одной сущности-контейнере и, следовательно, несколько имён, то в правило добавлен параметр, указывающей старое имя сущности, подлежащее замене. Также в правиле этого вида проверяется наличие у сущности  $y$  уровня целостности, не превосходящего текущего уровня целостности субъекта  $x$ . Выполнение этого условия для случая, когда сущность-контейнер  $z'$  помечена с помощью функции `IRELAX`, проверяется непосредственно, для остальных случаев обеспечивается за счёт наличия у  $x$  доступа на запись к сущности-контейнеру  $z'$ , в состав которого будет входить  $y$ .

В результате рассмотренные в разделе новые элементы второго уровня иерархического представления МРОСЛ ДП-модели позволили в ее рамках спроектировать и проанализировать использующие МКЦ технологии, которые рассматриваются в последующих разделах.

### **3. Адаптированная к МКЦ технология контейнерной виртуализации**

Как уже было отмечено, МРОСЛ ДП-модель, являющаяся основой механизма МКЦ ОС Astra Linux, достаточно выразительная, чтобы учитывать многие существенные особенности функционирования системного ПО, в том числе применяемые в нем технологии контейнерной виртуализации. Также она позволяет использовать при моделировании произвольную решётку уровней целостности, что в свою очередь дает возможность разрабатывать и внедрять в ОС Astra Linux базирующиеся на МКЦ новые технологии защиты.

Одной из них стала контейнерная виртуализация (в первую очередь технология Docker), которая в сочетании с МКЦ позволяет изолировать недоверенное ПО, снизить риски влияния уязвимостей в таком ПО на безопасность остального системного и прикладного ПО.

Функционирующее на уровне целостности, соответствующем выделенной неиерархической категории, недоверенное ПО (например, браузер, который обрабатывает самые разные потенциально «опасные» данные из сети Интернет), даже если подвергнется атаке нарушителя или заражению вирусом, не будет представлять опасности для доверенных высокоцелостных компонент ОС. На рис. 1 приведена схема данного примера, где недоверенное ПО запускается в контейнере-«песочнице» на неиерархическом уровне целостности «Виртуализация» `0x00000002` (в соответствующей маске бит ненулевой только второй бит), а доверенное ПО – на максимальном уровне целостности «Высокий», используемом в ОС Astra Linux по умолчанию – `0x0000003F` (то есть соответствующее ему десятичное значение – 63).

Важно отметить, что такая технология успешно защищает системные компоненты, имеющее уровень целостности «Высокий» (`0x0000003F`), которые часто используют процессы от имени привилегированных учетных записей пользователей, например, администраторов ОС. Однако файлы, с которыми обычно работают процессы от имени непривилегированных учетных записей пользователей имеют уровень целостности «Низкий» (`0x00000000`), а на промежуточном неиерархическом уровне целостности «Виртуализация» – `0x00000002`, и они остаются подвержены атакам, в том числе с использованием вирусов-«шифровальщиков». Появление таких сценариев атак совпало с дальнейшим развитием МКЦ в ОС Astra Linux релиза 2021 г., которое привнесло в решетку уровней целостности линейный (иерархический) уровень целостности. Этот уровень целостности стал указываться после неиерархических

категорий, например, так: 0x00000002:-128. Его использование позволило усовершенствовать адаптированную к МКЦ технологию запуска контейнеров в ОС Astra Linux для противодействия «межконтейнерным» атакам и для защиты от эксплуатации уязвимостей ПО в контейнерах, функционирующих в сессиях непривилегированных пользователей.

Так «межконтейнерные» атаки происходят, когда нарушитель использует уязвимость в одном контейнере для доступа к ресурсам или привилегиям другого контейнера, функционирующего на той же хостовой ОС. Ранее при запуске нескольких контейнеров на одном уровне целостности «Виртуализация» (0x00000002) в ОС Astra Linux один из контейнеров мог потенциально атаковать другой контейнер для захвата управления над ним или получения несанкционированного доступа к его данным или ресурсам (рис. 2).

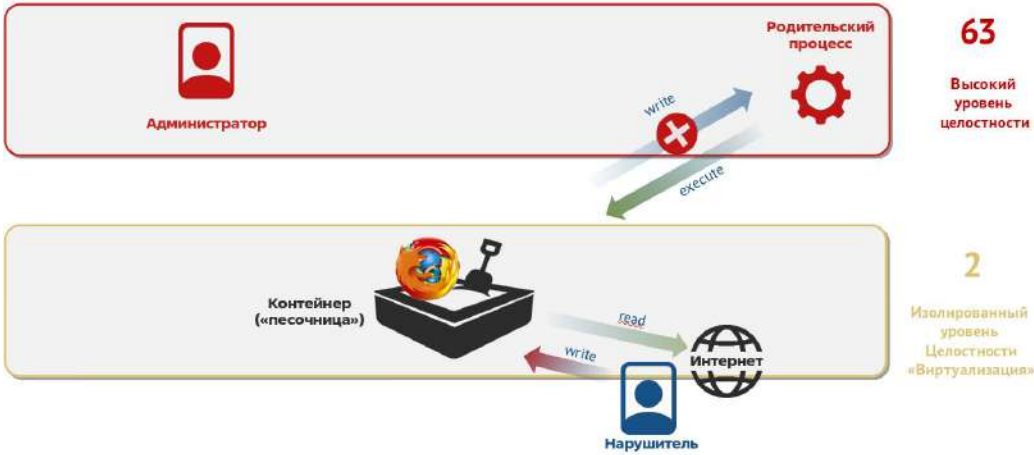


Рис. 1. Схема изоляция недоверенного ПО на выделенном неиерархическом уровне целостности.

Fig. 1. Scheme of isolating untrusted software at a dedicated non-hierarchical integrity level.



Рис. 2. Схема «межконтейнерной» атаки.

Fig. 2. Scheme of "inter-container" attack.

Применение линейных уровней целостности, например, -128 и -10, позволяет выполнить запуск этих контейнеров на разных уровнях, что защищает контейнер с большим уровнем целостности (на рис. 3 это 0x00000002:-10) от атаки из контейнера с меньшим уровнем целостности (на рис. 3 это 0x00000002:-128), так как при попытках получения соответствующего доступа на запись из второго контейнера это будет запрещено механизмом МКЦ. При этом изоляция второго контейнера от первого не осуществляется, то есть предполагается, что в первом контейнере функционирует менее «опасное» ПО, чем во втором.



Рис. 3. Схема защиты от «межконтейнерной» атаки.  
Fig. 3. Protection scheme against "inter-container" attack.

Кроме того, с использованием реализованного в механизме МКЦ флага, соответствующего рассмотренной в предыдущем разделе функции IRELAX, возможна пометка общего каталога (например, «/home/<user>/Downloads»), смонтированного внутрь запущенных на разных уровнях целостности контейнерах. Это даст возможность таким контейнерам обмениваться данными как между собой, так и с другими процессами учетной записи пользователя, от имени которых они все функционируют.

Вместе с тем далеко не всегда нарушитель нацелен на захват управления над ОС в целом. Иногда ему достаточно зашифровать данные непривилегированного пользователя, чтобы достигнуть экономических целей своей атаки. Ранее при таком сценарии при запуске контейнера в сессии непривилегированного пользователя и реализации атаки вида «побег из контейнера» (на рис. 4 он имеет уровень целостности «Низкий» 0x00000000:0) нарушитель мог получить доступ ко всем данным (файлам или каталогам) соответствующего пользователя, так как они имеют тот же неиерархический уровень целостности «Низкий» (0x00000000:0).

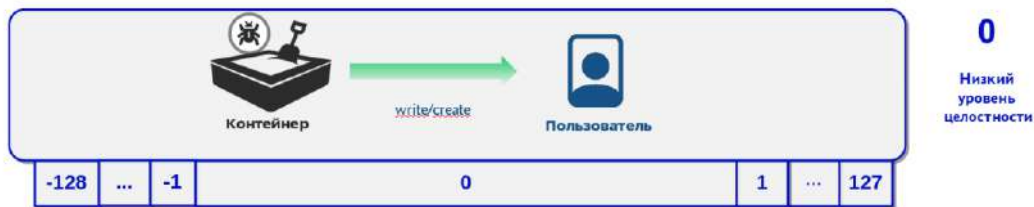


Рис. 4. Пример атаки из контейнера на уровне целостности «Низкий».  
Fig. 4. Example of an attack from a container at «Low» integrity level.

Однако, если запускать контейнер, управление над которым может потенциально захватить нарушитель, на пониженном линейном уровне целостности (например, на 0x00000000:-128), то механизм МКЦ не позволит нарушителю получить доступ на запись к данным, находящимся на уровне целостности «Низкий» 0x00000000:0. Таким образом, существенно снижается риск успешного выполнения атак вирусов-«шифровальщиков» при захвате нарушителем контейнера, функционирующего от имени учетной записи непривилегированного пользователя.

Рассмотрим обратную ситуацию, когда надо защитить контейнер от других процессов, функционирующих от имени некоторой общей для них учетной записи пользователя. Ведь все чаще даже в сессиях непривилегированного пользователя в контейнерах запускается ПО, которое надо обеспечить дополнительной защитой (например, банковское ПО или ПО, устанавливаемое для доступа к государственным автоматизированным системам). Для этого с использованием механизма МКЦ предлагается запускать соответствующие «защищаемые» контейнеры на положительном линейном уровне целостности (на рис. 5 это 0x00000002:1).

Ранее положительный линейный уровень целостности не использовался, т.к. сам запуск процессов на таком уровне был невозможен. Прежде всего это было связано с тем, что согласно требованиям МКЦ [1], во-первых, уровень целостности любого подкаталога или файла, содержащегося в каталоге, должен быть не выше уровня целостности этого «родительского»

каталога (в том числе, корневого каталога «/»), по умолчанию линейный уровень целостности которого был равен 0). Во-вторых, уровень целостности процесса должен быть не выше уровня целостности исполняемого файла, из которого он был запущен. Таким образом, линейный уровень целостности любого процесса не мог превосходить 0.

Исходя из этого, для запуска «защищаемых» контейнеров на положительном линейном уровне целостности потребуются назначение положительного линейного уровня целостности (например, 127) не только соответствующим образам этих контейнеров, но и всем находящимся выше их в иерархии файловой системы каталогов вплоть до корневого каталога «/».

Подводя итог, рассмотренные технологии являются примером того, как важна при использовании контейнерной виртуализации основанная на применении механизма МКЦ многоуровневая защита. Следует отметить, что целью проведенного исследования было не обоснование преимуществ контейнерной виртуализации для обеспечения безопасности функционирования различного ПО в ОС Astra Linux, а выработка технологии, позволяющей эффективно использовать для этого механизм МКЦ.

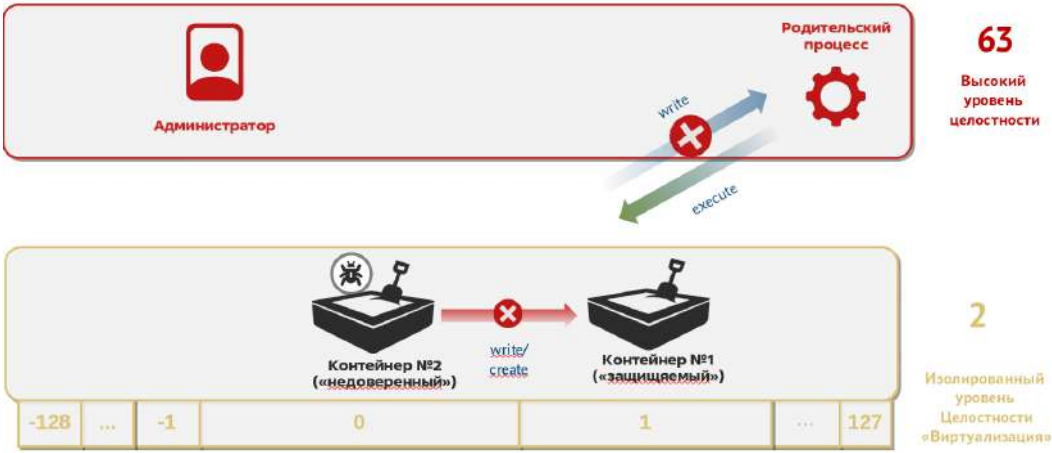


Рис. 5. Пример запуска «защищаемого» контейнера на положительном линейном уровне целостности.

Fig. 5. Example of running a "protected" container at a positive linear integrity level.

При этом можно отметить следующие достоинства данной технологии:

- Рассматриваемая технология базируется на использовании механизма МКЦ, который в отличие от многих других механизмов защиты (например, замкнутая программная среда или блокировка интерпретаторов) работает по умолчанию, начиная с основного (называемого «Усиленный» или «Воронеж») режима защиты ОС Astra Linux. При этом замкнутая программная среда или блокировка интерпретаторов ограничивают состав разрешенного для использования ПО, а МКЦ – нет;
- Контейнер позволяет упаковать в него прикладное ПО со всем необходимым окружением в максимальные короткие сроки. При том, что одновременный запуск различного ПО вне контейнеров на различных уровнях целостности может привести к неразрешимым противоречиям при их доступе к общим ресурсам ОС (файлам, каталогам, сокетам и др.), так как может потребоваться установка для них несовместимых параметров МКЦ;
- При использовании контейнерной виртуализации могут появляться дополнительные уязвимости, в том числе в составе компонент ядра ОС (хотя они встречаются достаточно редко). Однако для нарушителя проэксплуатировать эти уязвимости будет

гораздо сложнее, когда контейнер функционирует на отрицательном линейном уровне целостности. При этом с учетом изоляции контейнеров средствами ОС для выявления аномального «поведения» атакованных нарушителем контейнеров в перспективе возможно использование адаптированных к МКЦ методов машинного обучения.

#### **4. Технологии и сценарии непосредственного запуска прикладного ПО на промежуточных или отрицательных уровнях целостности**

На момент написания настоящей статьи, в ОС Astra Linux практически не используются промежуточные неиерархические уровни целостности, а линейный уровень целостности не применяется вовсе. Это негативно влияет на безопасность ОС, так как расширяет поверхность атаки, позволяя нарушителю эксплуатировать уязвимости конкретного прикладного ПО для распространения атаки на всю ОС. Поэтому рассмотренную в предыдущем разделе технологию запуска контейнеров на промежуточном неиерархическом или ненулевом линейном уровне целостности целесообразно адаптировать для запуска прикладного ПО непосредственно, то есть без применения контейнеров.

Основной сложностью при выработке технологий и сценариев запуска ПО на промежуточном неиерархическом или ненулевом линейном уровне целостности часто являлась некорректная работа ПО с механизмом МКЦ, что приводило к отказу от использования этих уровней целостности. В результате проведенного исследования были выявлены типовые ошибки, возникающие при работе такого ПО, что позволило предложить способы их устранения.

Рассмотрим первый сценарий: запуск прикладного ПО на промежуточных неиерархических уровнях целостности. В рамках его исследования были проанализированы 14 популярных графических приложений (например, файловый менеджер *fly-fm*, медиаплеер *vlc*, браузеры *chromium* и *firefox*, графический редактор *gimp* и другие), которые запускались в ОС Astra Linux релиза 2024 г. (1.8.1) на уровне защиты «Воронеж». Тестирование этого ПО показало, что в целом оно корректно функционирует на промежуточных уровнях целостности без необходимости значительных доработок или настройки со стороны администратора ОС. Однако основной возникающей здесь трудностью стали ошибки доступа ПО к сессионной шине межпроцессного взаимодействия D-Bus. Подсистема безопасности PARSEC реализована таким образом, что ПО, запущенное на уровне целостности, отличном от уровня целостности, с которым был осуществлен вход пользователя, не имеет доступа к шине D-Bus. Это приводит, например, к невозможности записи в некоторые файлы, а также запуска другого ПО. Хотя иногда такое ПО, не имея доступа к шине D-Bus, частично обходит это ограничение, используя резервные механизмы. Например, вместо штатного требующего доступа к D-Bus меню «Сохранить как» в файловом менеджере *fly-fm*, такое ПО может задействовать аналогичные технологии из сред графических оболочек GNOME или KDE Plasma. Также ПО для своей дальнейшей успешной работы может потребовать первоначальной настройки или запуска на максимальном уровне целостности «Высокий» (по умолчанию 63), что усложняет автоматизацию его работы на других уровнях целостности, или ПО может потребовать предварительной пометки некоторых каталогов флагами МКЦ IINH или IRELAX.

Для обеспечения корректного взаимодействия, функционирующего на промежуточных неиерархических уровнях целостности ПО с шиной D-Bus, можно использовать одну из следующих технологий:

1. Запускать, если это возможно, процессы ПО с использованием утилиты *dbus-launch*, устанавливающей для ПО переменные среды, позволяющие ему подключиться к шине D-Bus.
2. Удалять переменную окружения `DBUS_SESSION_BUS_ADDRESS` для запускаемых процессов ПО, при отсутствии которой автоматически создается новая сессионная шина D-Bus, к которой ПО сможет подключиться.

3. Запускать несколько дополнительных сессионных шин – по одной для каждого из несравнимых неиерархических уровней целостности (а также одну для отрицательных уровней целостности). При этом нужную шину передавать запускаемому процессу ПО через переменную окружения `DBUS_SESSION_BUS_ADDRESS`.

Все три технологии допустимы для использования, однако в рамках настоящего исследования была применена именно третья, как показавшая совместимость с большинством тестируемого ПО. Тем не менее, ее нельзя считать полностью универсальной, и исследования по повышению ее эффективности будут продолжены.

Рассмотрим второй сценарий: запуск прикладного ПО на отрицательных линейных уровнях целостности. В отличие от неиерархического уровня целостности, применение отрицательных линейных уровней может быть полезно не столько в сессии «высокоцелостного» привилегированного администратора ОС, сколько в сессии «обычного» непривилегированного пользователя, процессы от имени учетной записи которого функционируют на нулевом неиерархическом уровне целостности. Аналогично контейнерам непосредственный запуск ПО на отрицательном линейном уровне целостности позволяет защитить данные непривилегированного пользователя от эксплуатации уязвимостей в ПО, например, заражения вирусами, в том числе вирусами-«шифровальщиками». Тем не менее такая изоляция процессов ПО создает сложности. Например, по умолчанию процесс, запущенный на отрицательном линейном уровне целостности, не имеет прав на запись к большинству файлов и каталогов, что может ограничить его функциональность.

В связи с этим в ходе исследования была разработана технология, позволяющая запускать прикладное ПО на отрицательных линейных уровнях целостности, обеспечивая при этом необходимые права доступа ПО к ресурсам ОС без угроз для безопасности остального ПО. Для этого, как и в случае с запуском ПО на промежуточных неиерархических уровнях целостности, используется пометка некоторых каталогов флагами МКЦ `INH` или `IRELAX`, в том числе следующих подкаталогов домашних каталогов пользователей: `«/home/<user>/cache»`, `«/home/<user>/config»`, `«/home/<user>/config/session»`, `«/home/<user>/config/autostart»`, `«/home/<user>/local/share»`, `«/home/<user>/local/share/applications»`, `«/home/<user>/Загрузки»` и других подобных каталогов. Кроме того, потребовалось назначение минимального уровня целостности `0x00000000:-128` файлам `«/dev/null»`, `«/dev/zero»` и ряду других файлов из каталога `«/dev»`, доступ на запись к которым необходимо предоставлять практически всем процессам. И, как было отмечено ранее, было предложено запускать дополнительную сессионную D-Bus на отрицательном уровне целостности `0x00000000:-128`.

В целом применение для обоих сценариев технологий настроек механизма МКЦ ОС Astra Linux позволило обеспечить функционирования выбранного для тестирования ПО в обоих сценариях его запуска: на промежуточном неиерархическом или отрицательном линейных уровнях целостности. Данные технологии также включают настройку рабочего стола администратора системы и непривилегированного пользователя для удобства автоматического запуска ими ПО на соответствующих уровнях целостности. При этом в дальнейшем еще потребуются исследования по улучшению этих технологий, в частности по интеграции сессионной шины D-Bus с механизмом МКЦ.

## **5. Настройка МКЦ на основе правил профилей LSM-модуля AppArmor**

Как уже было отмечено, AppArmor – это LSM-модуль, реализующий дискреционное управление доступом, позволяющий назначать права доступа и ограничивать доступ к ресурсам ОС семейства Linux конкретному ПО посредством соответствующих ему профилей, загружаемых в этот модуль ядра ОС [21]. Каждый профиль AppArmor состоит из правил, большая часть из которых, как показали исследования, реализуемы механизмом МКЦ посредством его соответствующей настройки. Примерами реализуемых МКЦ правил профилей являются назначение права или, наоборот, запрет на чтение/запись/исполнение файлов

(правила вида «г»), «w», «x» и другие). Имеются нереализуемые МКЦ правила, например, правила взаимодействия с сессионной шиной D-Bus (правила вида «dbus»), контроля ресурсов (правило вида «limit») и некоторые другие. Ряд из этих правил, которые нельзя реализовать механизмом МКЦ в общем случае (например, правила вида «mount», устанавливающие разрешения на монтирование каталогов друг на друга), можно выполнить для конкретных наиболее востребованных сценариев (например, механизм МКЦ запрещает монтирование каталога с меньшим уровнем целостности на каталог с большим или несравнимым уровнем целостности). Часть непосредственно нереализуемых механизмом МКЦ правил можно выполнить штатными средствами ОС. Например, с помощью ограничивающего для ПО доступные ему системные вызовы механизма `seccomp` можно реализовать правила на блокировку файлов (правила вида «k») или на разрешение отображения в памяти исполняемого файла (правила вида «m»).

Наиболее точно механизм МКЦ позволяет выразить правила профилей ПО, устанавливающих права доступа к файлам или каталогам в предположение, что это ПО будет функционировать на уровнях целостности меньших максимального уровня целостности «Высокий», то есть на промежуточных неиерархических, нулевом или отрицательных линейных уровнях целостности. Рассмотрим примеры, которые стали основой технологии применения профилей AppArmor для настройки механизма МКЦ:

- Правила, устанавливающие запрет на чтение к файлам или каталогам (вида «g»), могут быть реализованы назначением им максимального уровня целостности «Высокий» (например, `0x0000003F:0`) и флага SSI;
- Правила, устанавливающие разрешения на создание, удаление, запись, дозапись в файл или каталог (вида «w» или «a»), могут быть реализованы установкой уровня целостности файла или каталога равным уровню целостности процессов того ПО, которому необходимо разрешить к ним доступ (это также позволяет запретить рассматриваемые доступы к файлам и каталогам процессам, имеющим меньшие уровни целостности);
- Правила, устанавливающие разрешения на исполнение файла (вида «x»), могут быть реализованы назначением ему уровня целостности не ниже уровня целостности процессов того ПО, которому необходимо разрешить доступ на исполнение к этому файлу;
- Правила, устанавливающие разрешения на изменение дискреционных прав доступа к файлам или каталогам (вида «chmod»), не могут быть непосредственно реализованы механизмом МКЦ, но этот механизм в целом позволяет запретить изменение этих прав к файлам или каталогам процессу, обладающему меньшим или несравнимым чем у них уровнем целостности.

В контексте рассматриваемой технологии также представляет интерес применение используемой для настройки AppArmor утилиты `aa-logprof`. Эта утилита в процессе работы тестируемого ПО анализирует сообщения, получаемые от находящегося в состоянии обучения (Complain) AppArmor, после чего предлагает правила для соответствующего ПО профиля, которые, с одной стороны, позволяют ПО функционировать, а, с другой стороны, установят запреты и разрешения для безопасной работы этого ПО. Разработка аналога утилиты `aa-logprof` для настройки механизма МКЦ, позволит ускорить решение этой задачи и уже осуществляется авторами.

## 6. Заключение

В настоящей статье изложены результаты очередного этапа проектирования и развития ключевого для безопасности ОС Astra Linux механизма защиты МКЦ. При этом рассмотрены основные новые элементы соответствующего МКЦ второго уровня иерархического

представления МРОСЛ ДП-модели, на основе которой осуществляется разработка и обоснование безопасности всех механизмов управления доступом данной ОС. В первую очередь это функции для задания специальных флагов МКЦ, устанавливаемых на файлы или каталоги, а также роли, соответствующие используемым для управления механизмом МКЦ привилегиям ОС.

С практической точки зрения изложены технологии и сценарии применения адаптированных к МКЦ технологий контейнерной виртуализации или непосредственного запуска ПО на промежуточных неиерархических или отрицательных линейных уровнях целостности. Проанализированы возникающие здесь технические сложности (например, связанные с взаимодействием процессов ПО с сессионной шиной D-Bus), а также способы их преодоления. Также описана технология настройки механизма МКЦ на основе правил профилей LSM-модуля AppArmor. В целом эти технологии и сценарии позволяют повысить безопасность ОС, сократить потенциально доступную для нарушителя поверхность атаки, и обеспечить дополнительную защиту как процессов, функционирующих от имени учетных записей привилегированных администраторов ОС, так и «обычных» непривилегированных пользователей (например, защитить их данные от вирусов-«шифровальщиков»).

В дальнейшем планируется продолжить эти исследования, в том числе в направлении как внедрения разработанных технологий непосредственно в релиз ОС Astra Linux, так и развития механизма МКЦ для его применения в доменной инфраструктуре и сетевых файловых системах.

## Список литературы / References

- [1]. ГОСТ Р 59453.1-2021 «Защита информации. Формальная модель управления доступом. Часть 1. Общие положения». М.: Стандартинформ. 16 с. / GOST R 59453.1-2021 «Information protection. Formal access control model. Part 1. General principles», 2021 (in Russian).
- [2]. Bishop M. Computer Security: Art and Science, 2nd edition. Pearson Education Inc., 2018, 1440 p.
- [3]. Девянин П.Н. Модели безопасности компьютерных систем. Управление доступом и информационными потоками. Учебное пособие для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Горячая линия – Телеком, 2020. 352 с.: ил. / P.N. Devyanin. Security models of computer systems. Control for access and information flows. Hotline-Telecom, 2020, 352 p. (in Russian).
- [4]. Bell D.E., LaPadula L.J. Secure Computer Systems: Unified Exposition and Multics Interpretation. Bedford, Mass.: MITRE Corp., 1976. MTR-2997 Rev. 1.
- [5]. ГОСТ Р 53113.1-2008 «Информационная технология. Защита информационных технологий и автоматизированных систем от угроз информационной безопасности, реализуемых с использованием скрытых каналов. Часть 1. Общие положения». М.: Стандартинформ. 12 с. / GOST R 53113.1-2008 «Information technology. Protection of information technologies and automated systems against security threats posed by use of covert channels. Part 1. General principles», 2008 (in Russian).
- [6]. Sandhu R. Role-Based Access Control / Advanced in Computers. Academic Press, 1998. Vol. 46.
- [7]. Biba K.J. Integrity Considerations for Secure Computer Systems. Bedford, Mass.: MITRE Corp., 1975. MTR-3153.
- [8]. Conover M. Analysis of the Windows Vista security model / Technical Report, Symantec Corp., 2008, 18 p.
- [9]. Операционная система специального назначения Astra Linux Special Edition. Доступно по ссылке: <https://astragroup.ru/software-services/os/>, 16.10.2024. / Astra Linux Special Edition operating system. Available at: <https://astragroup.ru/software-services/os/>, accessed 16.10.2024.
- [10]. Девянин П.Н., Тележников В.Ю., Третьяков С.В. Основы безопасности операционной системы Astra Linux Special Edition. Управление доступом. Учебное пособие. М., Горячая линия – Телеком, 2022, 148 стр. / Devyanin P.N., Telezhnikov V.Y., Tret'yakov S.V. Astra Linux Special Edition security basics. Access control. Hotline-Telecom, 2022, 148 p. (in Russian).
- [11]. Девянин П.Н., Леонова М.А. Приемы по доработке описания модели управления доступом ОССН Astra Linux Special Edition на формализованном языке метода Event-B для обеспечения ее автоматизированной верификации с применением инструментов Rodin и ProB // Прикладная дискретная математика. 2021. № 52. С. 83-96. / P. N. Devyanin, M. A. Leonova, “The techniques of formalization

- of OS Astra Linux Special Edition access control model using Event-B formal method for verification using Rodin and ProB», Prikl. Diskr. Mat., 2021, no. 52, pp. 83–96 (In Russian).
- [12]. ГОСТ Р 59453.2-2021 «Защита информации. Формальная модель управления доступом. Часть 2. Рекомендации по верификация формальной модели управления доступом». М.: Стандартинформ. 12 с./ GOST R 59453.2-2021 «Information protection. Formal access control model. Part 2. Recommendations on verification of formal access control model», 2021 (in Russian).
- [13]. Девянин П.Н. Результаты переработки уровней ролевого управления доступом и мандатного контроля целостности формальной модели управления доступом ОС Astra Linux. Труды ИСП РАН, том 35, вып. 5, 2023, стр. 7-22 / Devyanin P.N. The results of reworking the levels of role-based access control and mandatory integrity control of the formal model of access control in Astra Linux. Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS, vol. 35, issue 5, 2023, pp. 7-22 (in Russian).
- [14]. Девянин П.Н. О разработке проекта национального стандарта ГОСТ Р «Защита информации. Формальная модель управления доступом. Часть 3. Рекомендации по разработке». Труды ИСП РАН, том 36, вып. 3, 2024, стр. 63-82 / Devyanin P.N. On the development of the draft standard GOST R “Information protection. Formal access control model. Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS, vol. 36, issue 3, 2024, pp. 63-82 (in Russian).
- [15]. Wan Z., Lo D., Xia X., L. Cai. Practical and effective sandboxing for Linux containers / Empir Software Eng, 2019, Vol. 24, pp. 4034–4070.
- [16]. N. Lopes, R. Martins, M.E. Correia, S. Serrano, F. Nunes. Container Hardening Through Automated Sec-comp Profiling // In Proceedings of the 2020 6th International Workshop on Container Technologies and Container Clouds, 2020, pp. 31–36.
- [17]. J.-A. Kabbe. Security analysis of Docker containers in a production environment // Norwegian University of Science and Technology, 2017, 91 p.
- [18]. N. Li. Usable Mandatory Integrity Protection for Operating Systems // In proc of IEEE Symposium on Security and Privacy, 2007, pp.164-178.
- [19]. Mandatory Integrity Control. Available at: <https://learn.microsoft.com/en-us/windows/win32/secauth/mandatory-integrity-control>, accessed 16.10.2024.
- [20]. H. Chen, N. Li, Z Mao. Analyzing and Comparing the Protection Quality of Security Enhanced Operating Systems // In proc of the Network and Distributed System Security Symposium, 2009, 16 p.
- [21]. AppArmor Core Policy Reference. Available at: [https://gitlab.com/apparmor/apparmor/-/wikis/AppArmor\\_Core\\_Policy\\_Reference](https://gitlab.com/apparmor/apparmor/-/wikis/AppArmor_Core_Policy_Reference), accessed 21.10.2024.
- [22]. Девянин П.Н., Хорошилов А.В., Тележников В.Ю. Формирование методологии разработки безопасного системного программного обеспечения на примере операционных систем. Труды ИСП РАН, том 33, вып. 5, 2021, стр. 25-40 / Devyanin P.N., Telezhnikov V.Y., Khoroshilov V.V. Building a methodology for secure system software development on the example of operating systems. Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS, vol. 33, issue 5, 2021, pp. 25-40 (in Russian).

## **Информация об авторах / Information about authors**

Петр Николаевич ДЕВЯНИН – член-корреспондент Академии криптографии России, доктор технических наук, профессор, научный руководитель ООО "РусБИТех-Астра" («Группа Астра»). Область интересов: теория информационной безопасности, формальные модели безопасности компьютерных систем, разработка безопасного программного обеспечения, операционные системы семейства Linux.

Petr Nikolaevich DEVYANIN – Dr. Sci. (Tech.), corresponding member of Russian Academy of Cryptography, professor, scientific director in RusBITech-Astra (Astra Linux). Field of Interest: information security theory, formal security models of computer systems, secure software development, operating systems of Linux family.

Алексей Александрович СТАРОСТИН – старший инженер ООО "РусБИТех-Астра" («Группа Астра»). Область интересов: формальные модели безопасности компьютерных систем, искусственный интеллект, операционные системы семейства Linux.

Alexey Alexandrovich STAROSTIN – senior engineer in RusBITech-Astra (Astra Linux). Field of Interest: formal security models of computer systems, artificial intelligence, operating systems of Linux family.

Денис Сергеевич ПАНОВ – инженер ООО "РусБИТех-Астра" («Группа Астра»). Область интересов: формальные модели безопасности компьютерных систем, операционные системы семейства Linux, разработка безопасного программного обеспечения.

Denis Sergeevich PANOV – engineer in RusBITech-Astra (Astra Linux). Field of Interest: formal security models of computer systems, operating systems of Linux family, secure software development.

Семен Владимирович УСАЧЕВ – разработчик ООО «Яндекс». Область интересов: разработка безопасного программного обеспечения, операционные системы семейства Linux, бэкенд-разработка, теория компиляторов, формальные языки и грамматики.

Semen Vladimirovich USACHEV – developer in Yandex. Field of Interest: secure software development, operating systems of Linux family, backend development, compiler theory, formal languages and grammars.





## TSAR: инструмент для оценки статических анализаторов

<sup>1</sup> К.А. Чибисов, ORCID: 0009-0008-4371-5475 <chibisov@ispras.ru>

<sup>1</sup> Р.А. Бучацкий, ORCID: 0000-0001-8522-1811 <ruben@ispras.ru>

<sup>1,2</sup> А.Д. Тимонин, ORCID: 0009-0006-7453-0209 <timonin.a@phystech.edu>

<sup>2</sup> В.И. Лазарь, ORCID: 0009-0003-1958-3621 <lazar.v@phystech.edu>

<sup>1,3</sup> Д.М. Журихин, ORCID: 0009-0003-0239-2220 <zhur@ispras.ru>

<sup>1,3</sup> А.А. Белеванцев, ORCID: 0000-0003-2817-0397 <abel@ispras.ru>

<sup>1</sup> Институт системного программирования им. В.П. Иванникова РАН,  
Россия, 109004, г. Москва, ул. А. Солженицына, д. 25.

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт,  
141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9.

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1.

**Аннотация.** В статье представляется новый инструмент TSAR, предназначенный для оценки эффективности статических анализаторов. TSAR включает в себя три основных компонента: систему анализа статических анализаторов, генератор тестов, базирующийся на Common Weakness Enumeration (CWE), и механизмы трансформации кода (мутатора) для усложнения работы анализаторов. Система анализа позволяет выявлять слабые места в инструментах статического анализа, в то время как генератор тестов создает специфические случаи на основе известных уязвимостей. Трансформации кода позволяют создавать сложные структуры, затрудняющие анализ и призванные проверить устойчивость анализаторов к обнаружению реальных уязвимостей. Данный инструмент предоставляет исследователям и разработчикам возможность для более глубокой оценки качества статических анализаторов программного обеспечения для их дальнейшего улучшения.

**Ключевые слова:** статический анализ; тесты; генератор тестов; трансформации; классификации уязвимостей CWE; компиляторная инфраструктура MLIR; проект LLVM; компилятор clang; анализатор cppcheck; тестовый набор Juliet; статический анализатор clang-tidy.

**Для цитирования:** Чибисов К.А., Бучацкий Р.А., Тимонин А.Д., Лазарь В.И., Журихин Д.М., Белеванцев А.А. TSAR: инструмент для оценки статических анализаторов. Труды ИСП РАН, том 37, вып. 2, 2025 г., стр. 79–96. DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(2)-6.

## TSAR: Tool for Static Analyzers Ranking

<sup>1</sup> K.A. Chibisov, ORCID: 0009-0008-4371-5475 <chibisov@ispras.ru>

<sup>1</sup> R.A. Buchatskiy, ORCID: 0000-0001-8522-1811 <ruben@ispras.ru>

<sup>1,2</sup> A.D. Timonin, ORCID: 0009-0006-7453-0209 <timonin.a@phystech.edu>

<sup>2</sup> V.I. Lazar, ORCID: 0009-0003-1958-3621 <lazar.v@phystech.edu>

<sup>1,3</sup> D.M. Zhurikhin, ORCID: 0009-0003-0239-2220 <zhur@ispras.ru>

<sup>1,3</sup> A.A. Belevantsev, ORCID: 0000-0003-2817-0397 <abel@ispras.ru>

<sup>1</sup> *Ivannikov Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences,  
25, Alexander Solzhenitsyn st., Moscow, 109004, Russia.*

<sup>2</sup> *Moscow Institute of Physics and Technology,  
9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia.*

<sup>3</sup> *Lomonosov Moscow State University,  
GSP-1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia.*

**Abstract.** The article presents a new tool, TSAR, designed for evaluating the effectiveness of static analyzers. TSAR includes three main components: a static analyzer assessment system, a test generator based on the Common Weakness Enumeration (CWE), and code transformation mechanisms (mutators) to challenge the analyzers. The assessment system identifies weaknesses in static analysis tools, while the test generator creates specific cases based on known vulnerabilities. Code transformations create complex structures that complicate analysis and intended to test the analyzers' ability in detecting real vulnerabilities. This tool provides researchers and developers with an opportunity for a deeper assessment of the quality of software static analyzers for their further improvement.

**Keywords:** static analysis; tests; test generator; transformations; CWE; MLIR; LLVM; clang; cppcheck; Juliet; clang static analyzer; clang-tidy.

**For citation:** Chibisov K.A., Buchatskiy R.A., Timonin A.D., Lazar V.I., Zhurikhin D.M., Belevantsev A.A. TSAR: Tool for Static Analyzers Ranking. *Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS*, vol. 37, issue 2, 2025, pp. 79-96 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(2)-6.

### 1. Введение

Современное программное обеспечение становится всё более сложным и многогранным, что делает его устойчивость к уязвимостям критически важной задачей для разработчиков и специалистов в области безопасности. Статический анализ кода зарекомендовал себя как один из ключевых методов обнаружения потенциальных уязвимостей на ранних этапах разработки. С увеличением сложности программных систем и разнообразия языков программирования возрастает необходимость в эффективных инструментах анализа кода. Однако множество статических анализаторов и их различные подходы к выявлению уязвимостей затрудняют выбор наилучшего инструмента для конкретной задачи.

Для обеспечения качественной защиты программного обеспечения недостаточно только использовать статические анализаторы, необходимо также регулярно оценивать их эффективность и точность. В связи с этим становится важным создание инструментов, позволяющих проводить объективную оценку различных статических анализаторов и выявлять их слабые места. Актуальными также остаются задачи генерации тестов, формирующих специфические случаи для анализа, и выявление возможностей для усовершенствования самих анализаторов.

В данной статье мы представляем TSAR (Tool for Static Analyzers Ranking) – новый инструмент, разработанный для комплексной оценки статических анализаторов. TSAR включает в себя три ключевых компонента: систему для анализа эффективности статических анализаторов, генератор тестов, основывающийся на классификации уязвимостей CWE

(Common Weakness Enumeration) [1], и механизмы трансформации кода, направленные на усложнение работы анализаторов.

TSAR может помочь в выявлении недостатков статических анализаторов, связанных с отсутствием различных методов анализа, таких как внутривпроцедурный анализ потоков данных и управления, межпроцедурный контекстно-чувствительный анализ, чувствительный к путям выполнения анализ и анализ помеченных данных. Эти усилия направлены на усовершенствование статических анализаторов и, как следствие, на повышение общей безопасности программного обеспечения.

В работе продемонстрированы возможности TSAR как средства для оценки и улучшения статических анализаторов, а также представлены результаты его применения на реальных примерах.

## **2. Обзор существующих решений**

### **2.1 Методы оценки статических анализаторов**

В данном разделе рассматриваются современные методы оценки статических анализаторов, основанные на обзоре ряда научных исследований.

В работе [2] предложен подход к тестированию статических анализаторов путем генерации случайных программ. Авторы аргументируют, что традиционные тестовые наборы могут быть предвзятыми и не отражать полноту возможных сценариев, с которыми может столкнуться анализатор.

Для создания синтаксически корректных, но семантически непредсказуемых программ на языке C, авторы использовали генератор Csmith [3]. Этим проверяли возможности статических анализаторов обрабатывать неконтролируемое множество программных конструкций и выявление потенциальных ошибок в их работе. Для тестирования подхода авторы использовали фреймворк для анализа и трансформации программ Frama-C. В процессе тестирования были обнаружены уязвимости и неточности в работе анализатора, что подчеркивает важность использования случайной генерации в процессе их оценки.

С помощью предложенного авторами подхода можно проверять анализаторы на устойчивость к нетривиальным и редко встречающимся конструкциям для обнаружения скрытых дефектов, которые могут не проявиться при использовании стандартных тестовых наборов. Однако сгенерированные программы могут быть слишком синтетическими и не отражать реальные сценарии использования. Также отсутствие контекста и семантического значения может затруднять интерпретацию результатов.

В исследовании [4] проведен сравнительный анализ открытых статических анализаторов для обнаружения уязвимостей в коде на C/C++. Авторами были рассмотрены наиболее популярные открытые анализаторы, такие как Cppcheck [5], Infer [6], Clang Static Analyzer [7] и OCLint [8].

Для оценки анализаторов был использован тестовый набор Toyota ITS [9], охватывающий значительное количество различных типов уязвимостей из списка CWE, включая переполнения буфера, утечки памяти и другие. Авторы разработали фреймворк, который выполняет запуск набора статических анализаторов по всем тестовым случаям. Для каждого тестового случая автоматически анализируется, были ли обнаружены соответствующие уязвимости в файле манифеста с использованием инструментов статического анализа. По результатам анализа генерируется отчет, содержащий различные статистические данные, в том числе точность, полнота и время выполнения для каждого инструмента, а также для каждой категории уязвимостей. Соответствие между дефектами, выявленными инструментом, и дефектами в тестовом наборе ITS устанавливалось на основе номера строки в исходном коде. Этот подход позволяет эффективно обрабатывать инструменты

статического анализа, которые используют различные таксономии слабых мест, минимизируя риск неправильной классификации отдельных дефектов.

По итогам исследования были сделаны выводы, что ни один из анализаторов не продемонстрировал абсолютного превосходства по всем показателям; существуют значительные различия в специализации и эффективности инструментов в зависимости от типа уязвимостей.

К ограничениям исследования можно отнести, что оценка анализаторов ограничена выбранным набором тестовых случаев и может не охватывать все возможные уязвимости. Также некоторые инструменты могут быть настроены для улучшения результатов, что не всегда учитывалось.

В работе [10] предложен метод дифференциального тестирования для оценки корректности и точности статических анализаторов. Метод заключается в сравнении выходных данных различных анализаторов при обработке одного и того же исходного кода для выявления расхождений в результатах, которые могут указывать на проблемы с корректностью или точностью одного, или нескольких инструментов.

Процесс тестирования заключается в генерации исходных кодов на языке C с использованием различных техник, включая мутацию существующих программ с дальнейшим анализом эталонных результатов и автоматическим обнаружением противоречий.

Метод позволил обнаружить ранее неизвестные дефекты в ряде популярных анализаторов и показал эффективность в автоматизированном выявлении проблем без необходимости в предварительно размеченных данных, что минимизирует человеческий фактор.

Метод требует наличия нескольких анализаторов для сравнения, которые должны поддерживать одинаковые языки и конструкции, а также не гарантирует выявление всех возможных дефектов, особенно если ошибки присутствуют во всех сравниваемых инструментах.

В исследовании [11] авторами была представлена методика оценки статических анализаторов с использованием дифференциального мутационного анализа.

Мутационный анализ позволяет сделать целенаправленные изменения (мутации) в исходном коде для создания новых вариантов программ. А дифференциальный подход позволяет сравнивать результаты анализа исходной и мутированной программы для выявления несоответствий. Это позволяет оценивать чувствительность статических анализаторов к определенным изменениям в коде.

Авторы использовали различные типы мутаций, имитирующих потенциальные ошибки или уязвимости. Экспериментальные результаты представляют собой набор сравнений инструментов для трех языков: Solidity (самый популярный язык для смарт-контрактов), Java и Python. Для оценки анализаторов выполнялись автоматический запуск инструментов статического анализа на оригинальном и мутированном коде и сравнение результатов.

Результаты мутационного анализа подтвердили целесообразность использования нескольких инструментов: за исключением одного из анализаторов для Java, все исследуемые инструменты уникально обнаружили более 1000 мутаций, при этом для Java и Python не было выявлено ни одной мутации, обнаруженной всеми инструментами.

Метод позволил идентифицировать области, в которых анализаторы недостаточно чувствительны к изменениям или, наоборот, дают ложные срабатывания. Стоит отметить, что процесс анализа может быть ресурсозатратным из-за большого числа вариантов мутированного кода, а также требующим тщательной проработки типов мутаций для обеспечения релевантности результатов.

В работе [12] предлагается автоматизированный и воспроизводимый подход для оценки эффективности пяти открытых и одного коммерческого статического анализатора кода на языке C, используя эталонный набор данных, состоящий из 27 открытых проектов с 192 известными уязвимостями безопасности (CVE). Исследование было проведено с целью

определить, можно ли использовать выбранный набор данных для оценки таких анализаторов, и какая степень детализации кода (относительно выбранного набора данных) является подходящей для приближенного обнаружения уязвимостей.

Результаты исследования показали, что ни один из анализируемых инструментов не обеспечивает полного покрытия всех типов уязвимостей. Эффективность обнаружения существенно варьируется в зависимости от категории уязвимости и особенностей кода. Некоторые инструменты продемонстрировали высокую точность в определенных областях, но оказались менее эффективными в других. Авторы отмечают, что сложные конструкции языка C, такие как указатели и динамическое выделение памяти, представляют значительные трудности для статического анализа. Они также подчеркивают важность контекстной информации и межпроцедурного анализа для повышения точности обнаружения уязвимостей.

## 2.2 Открытые инструменты оценки статических анализаторов

В этом разделе обсуждаются доступные тестовые наборы и инструменты для оценки статических анализаторов кода, которые применяют различные CWE для оценки качества анализа.

Инструмент для сравнения статических анализаторов OSSF CVE Benchmark [13] использует проекты с открытым исходным кодом с известными уязвимостями CVE. Анализатор тестируется сначала на коде до применения исправления, устраняющего уязвимость, и затем после. Тестирование на коде реальных проектов позволяет понять практическую ценность анализаторов, но в то же время не дает информации о том, какие техники использует анализатор. Кроме того, разметка данных на основе баз уязвимостей CVE может быть выбрана так, что покрывается только один вид анализа, например, анализ на уровне синтаксического дерева разбора.

Тестовый набор Juliet [14] включает программы на языках C/C++/Java, сгенерированные на основе шаблонов, а также написанные вручную. Этот набор покрывает суммарно 116 различных CWE. Каждый тест имеет градацию сложности, начиная от простой функции с линейным потоком управления и заканчивая межпроцедурными программами и программами, использующими несколько единиц трансляции. Juliet активно используется индустрией и хорошо позволяет оценить различные анализаторы исходного кода. Из недостатков можно выделить то, что не всегда понятно, как конкретный тест был получен, и какие возможности анализатора он пытается проверить в конкретном тесте.

Тестовый набор C/C++ программ Toyota ITC [9], в отличие от Juliet, имеет значительно меньшее покрытие CWE, но каждый тест объясняет, почему он так построен и какой аспект анализатора он проверяет. Это позволяет более точно говорить о покрытии различных аспектов анализа. Основным недостатком данного набора является то, что он полностью написан вручную и преимущественно проверяет возможности внутрипроцедурного анализа статических анализаторов.

Проект saveourtool [15] предоставляет утилиту для запуска произвольных анализаторов, хранения результатов анализа, сравнения результатов, а также представления статистики за все запуски анализаторов на веб-сервере. Данная утилита не предоставляет своих тестовых наборов, но может быть использована для ведения статистики анализаторов на наборах тестов, таких как Juliet и Toyota ITC. Утилита требует добавления анализатора в свою инфраструктуру для запуска его на каждом тесте, что не всегда удобно для анализаторов, которые анализируют один большой проект за раз, а не отдельные файлы в этом проекте.

Рассмотренные инструменты и тестовые наборы предоставляют различные подходы к оценке качества анализаторов кода. OSSF CVE Benchmark позволяет оценить практическую ценность анализаторов на реальных проектах, но не дает информации о техниках анализа. Набор тестов Juliet активно используется в индустрии и хорошо покрывает различные CWE,

но не всегда понятно, как конкретные тесты были получены. Тестовый набор Toyota ITS предоставляет более детальное объяснение каждого теста, но имеет меньшее покрытие CWE. Проект *saveourtool* предоставляет утилиту для ведения статистики анализаторов, но требует добавления анализатора в свою инфраструктуру.

### **3. Инструмент для оценки статических анализаторов**

В данном разделе описана общая схема предложенного инструмента для оценки статических анализаторов TSAR. Детальное описание реализации каждого компонента приведено в последующих разделах 4 и 5.

Из проведенного обзора существующих решений становится очевидным, что при сравнении статических анализаторов необходимо учитывать несколько ключевых факторов. Во-первых, важна метаинформация о тестах, которая позволяет лучше понять контекст и природу уязвимостей, что, в свою очередь, способствует более глубокому анализу и точному выявлению проблем. Во-вторых, необходимо обеспечивать поддержку нескольких языков программирования, поскольку многие современные разработки используют различные технологии в своих проектах, включая C, C++ и Java. В-третьих, внедрение контекстной информации, в частности межпроцедурного анализа, становятся очевидными для повышения точности выявления уязвимостей.

На основе идей использования мутационных техник для оценки статических анализаторов, предложенных в работах [10] и [11], а также подходов, акцентирующих внимание на многообразии тестов на основе CWE из работы [4], и успеха тестового набора Juliet [14], был разработан инструмент TSAR. Этот инструмент включает в себя три основных компонента:

- Шаблоны, основанные на CWE: система шаблонов, которая обеспечивает глубокое покрытие различных категорий уязвимостей. Эта структура позволяет легко адаптировать и расширять наборы тестов, что делает их более релевантными для анализа современных программных решений.
- Мутатор шаблонов (*tsar*): этот компонент отвечает за трансформацию шаблонов и генерацию тестовых программ на языках C, C++ и Java. Использование мутационных техник позволяет не только выявить слабые места статических анализаторов, но и улучшить качество тестов, увеличивая их сложность и разнообразие.
- Утилита для сбора результатов анализа (*metalyzer*): этот инструмент не только агрегирует результаты анализа, но и предоставляет возможности для их сравнения между разными анализаторами. Метаинформация, собранная в процессе, позволяет лучше понять эффективность анализаторов в различных контекстах.

Идея шаблонов исходит из концепции, что в каждом тесте есть структура, специфичная для определенной ошибки, и варианты потока, создаваемые с целью проверки ключевых особенностей анализа, таких как межпроцедурность, чувствительность к путям, а также к полям структур и другим аспектам. Это сходство с подходом Juliet и ГОСТ Р 71207-2024 [16] обеспечивает более гибкую и целенаправленную проверку функциональности анализаторов. Именно поэтому в TSAR шаблоны разрабатываются вручную экспертами, которые лучше понимают особенности различных уязвимостей, в то время как мутации предоставляют поточные варианты тестов. Эта структура позволяет инструменту адаптироваться к специфическим требованиям анализа кода.

На рис. 1 представлена общая схема работы инструмента TSAR. Мутатор шаблонов (*tsar*) – это ядро инфраструктуры инструмента TSAR. Он использует шаблоны, написанные с использованием инфраструктуры MLIR [17] и построенные вокруг различных CWE, для генерации тестовых программы на языках C, C++ и Java. Эти программы применяются для проверки и анализа инструментов статического анализа кода. Результаты анализа сохраняются в формате, подходящем для экспорта в утилиту *metalyzer*: SARIF [18] или

простой текстовый вывод анализатора. `metalyzer` импортирует информацию о тестовом наборе, результатах анализа и выполняет сравнение анализаторов, что позволяет оценить эффективность и точность различных анализаторов кода. Стоит отметить, что `metalyzer` не запускает анализаторы самостоятельно, а работает с уже готовыми результатами анализа.

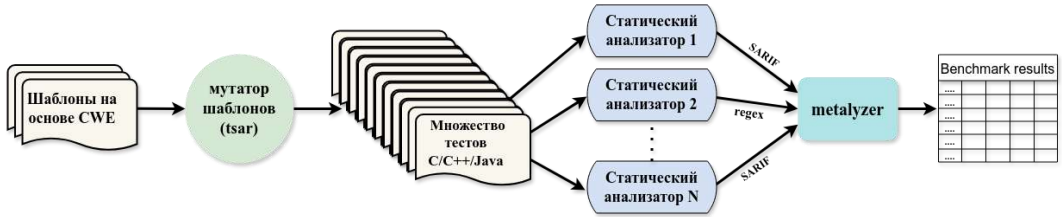


Рис. 1. Схема инструмента для оценки статических анализаторов TSAR.  
Fig. 1. Diagram of TSAR tool for ranking static analyzers.

#### 4. Генератор тестов

В данном разделе рассмотрены устройства мутатора шаблонов и генератора тестов `tsar`. `tsar` – это утилита на основе инфраструктуры MLIR, предназначенная для мутации шаблонов и генерации программ на языках C, C++ и Java.

MLIR (Multi-Level Intermediate Representation) [17] – компиляторная инфраструктура для разработки промежуточных представлений для дальнейшего анализа, оптимизации и генерации кода. Является частью проекта LLVM.

Инфраструктура MLIR предлагает абстракции для разработки произвольных промежуточных представлений с иерархической структурой, аналогичной LLVM IR. Основные компоненты MLIR включают: операции, задающие семантику выполнения; регионы как контейнеры для операций; блоки, представляющие линейные последовательности операций. Взаимосвязь между этими элементами создает рекурсивную структуру: операция включает регион, регион состоит из блоков, каждый блок содержит операции, и так далее. Объединение различных операций, типов и атрибутов формирует диалект, который может быть представлен как библиотека для конкретного промежуточного представления. MLIR поддерживает более сорока встроенных диалектов для различных сценариев. Одной из ключевых особенностей MLIR является возможность определения пользовательских диалектов с использованием специализированного предметно-ориентированного языка.

Применение MLIR обусловлено стремлением иметь свой высокоуровневый язык описания шаблонов, который будет более выраженным по сравнению с C и C++, а также позволит эффективно разрабатывать трансляторы в другие языки программирования, такие как Java или Go.

Инфраструктура MLIR предоставляет диалект `EmitC`, который соответствует указанным требованиям. `EmitC` [19] – это строго типизированный диалект, схожий с языком C, предназначенный для трансляции операций из более абстрактных диалектов в операторы самого `EmitC` с последующей генерацией программ на языках C и C++. Этот диалект служит конечной точкой в дереве диалектов MLIR, что означает невозможность выполнения трансляции из него в другие диалекты выше по иерархии. Трансляция возможна только напрямую в языки C/C++ с использованием инструмента `CppEmitter`. Каждая операция, атрибут и другие сущности в `EmitC` должны иметь аналоги в диалектах выше по иерархии. В противном случае такие элементы будут считаться "мертвыми", так как их невозможно будет транслировать через механизм преобразования диалектов. `EmitC` предоставляет возможность конвертации множества различных операций из других диалектов MLIR в операции своего диалекта, что делает его важным инструментом для генерации программ на языках C и C++.

В утилите `tsar` каждая трансформация кода работает с операциями из диалекта `EmitC` или собственного диалекта `tsar`. Диалект `tsar` был создан для преодоления ограничений архитектуры `EmitC` и предназначен для управления процессом генерации программ, а также для описания сгенерированных программ. В нем используется специальная разметка, которая обеспечивает детерминированное изменение шаблонов, что необходимо для проверки конкретных видов анализа. Каждая трансформация добавляет в шаблон тег, описывающий тип анализа, что позволяет эффективно находить ошибки в новых мутациях.

Создание диалекта `tsar` позволило реализовать операции и атрибуты, которые не требуют аналогов в других диалектах, избегая при этом изменений в архитектуре `EmitC`. `EmitC` имеет свои задачи и направления развития, тогда как `tsar` сосредоточен на предоставлении механизмов для реализации запутываний, усложняющих внутреннее представление программ. Это достигается благодаря созданию уникальных атрибутов, операций и пассивов, выполняющих соответствующие трансформации.

Трансляция MLIR шаблонов осуществляется передачей аргументов командной строки утилите `tsar`, отвечающих за включение конкретных мутаций. Мутации в свою очередь выполняют преобразования на основе разметки или известных паттернов в шаблоне. Затем результат мутации транслируется в запрашиваемый язык, например, `C`.

Для наглядности рассмотрим процесс генерации программы на языке `C`, используя утилиту `tsar` и шаблон на диалектах MLIR, представленного в листинге 1, в процессе генерации которого не включались мутации.

```
1  tsar.tags ["flow-sensitive"]
2  emitc.func @cwe369_div_zero_simple() -> () {
3      %dividend = emitc.literal "42" : i32
4      // Источник нуля
5      %zero = tsar.transform_region() : () -> i32 {
6          %zero = emitc.literal "0" : i32
7          tsar.transform_out %zero : i32
8      }
9      // Блок, в котором фактически выполняется деление
10     tsar.transform_region(%dividend, %zero) : (i32, i32) -> () {
11         %data = "emitc.variable"() { value = 2 : i32 } : () -> !emitc.lvalue<i32>
12
13         "emitc.assign"(%data, %zero) {
14             tsar.source = #tsar.source<"CWE-369">,
15             tsar.cfwrap = #tsar.cfwrap<"useless_if"> } : (!emitc.lvalue<i32>, i32) -> ()
16         %data_load = emitc.load %data : !emitc.lvalue<i32>
17
18         tsar.transform_region(%dividend, %data_load) {
19             tsar.cfwrap = #tsar.cfwrap<"useless_if"> } : (i32, i32) -> () {
20             // Операция деления
21             %div_res = emitc.expression { tsar.sink = #tsar.sink<"CWE-369"> } : i32 {
22                 %div_res = emitc.div %dividend, %data_load : (i32, i32) -> i32
23                 emitc.yield %div_res: i32
24             }
25
26             %mask = emitc.literal "\\\"%d\\n\\\" : !emitc.ptr<i8>
27             emitc.call_opaque "printf"(%mask, %div_res) : (!emitc.ptr<i8>, i32) -> ()
28         }
29     }
30     emitc.return
31 }
```

Листинг 1. Шаблон на диалектах MLIR на примере CWE-369 (Деление на ноль).  
Listing 1. Template using MLIR dialects for CWE-369 (Divide by zero).

В листинге 1 представлен пример шаблона с описанием ошибки деления на ноль (CWE-369) на диалекте MLIR EmitC (префикс `emitc`) и разработанном диалекте `tsar`.

Для контроля над трансформациями, а также для описания сгенерированного кода в диалекте `tsar` реализованы следующие инструкции и атрибуты:

- `tsar.transform_region` – определяет регион, который необходимо рассматривать как единое целое при выполнении преобразований.
- `tsar.tags` – теги, которые представляют метаданные о конечном шаблоне.
- `#tsar.cfwrap<"useless_if">` – атрибуты такого вида указывают, какая оптимизация может быть применена к конкретной инструкции. В данном случае присваивание на 13 строке будет обернуто в `if(true)`.
- `#tsar.sink/source<"CWE-369">` – атрибуты, определяющие сток и исток ошибки. "CWE-369" является идентификатором ошибки.

Трансляция шаблона, представленного в листинге 1, в код на C приведена в листинге 2.

```
1 // TSAR_TAGS: flow-sensitive
2 void cwe369_div_zero_simple() {
3     int32_t v1 = 2;
4     // TSAR_SOURCE;CWE-369
5     v1 = 0;
6     int32_t v2 = v1;
7     // TSAR_SINK;CWE-369
8     int32_t v3 = 42 / v2;
9     printf("%d\n", v3);
10    return;
11 }
```

Листинг 2. Сгенерированная тестовая программа на языке C для CWE-369 (Деление на ноль).  
Listing 2. Generated C test program for CWE-369 (Divide by zero).

Здесь комментарии описывают данные, необходимые для формирования информации об ошибке, а также о тестируемых методах анализа. `TSAR_SOURCE` и `TSAR_SINK` были получены в результате раскрытия атрибутов `#tsar.source` и `#tsar.sink` соответственно, а `TSAR_TAGS` из `tsar.tags`.

К ограничениям утилиты `tsar` можно отнести неполную поддержку конструкций языков. Так, например, нельзя объявить структуру и классы в языках C/C++/Java, но можно ссылаться на поля в известных структурах, а также нет возможности называть переменные более осмысленно.

Отметим, что в утилите `tsar` реализована трансляция в язык Java, применение которой к листингу 1 представлено в листинге 3. Однако в рамках данной работы сравнительное тестирование статических анализаторов, применимых к программам на языке Java, не будет рассмотрено, так как это тема для дальнейшего исследования.

Для расширения поддержки языков в инструменте TSAR мы рассмотрели три подхода, различающихся по сложности:

1. Создание диалектов, аналогичных EmitC, со своими операторами, атрибутами и транслятором. Этот метод предоставляет максимальную гибкость и расширяемость, позволяя учитывать все особенности конструкций языков, их типов и других аспектов. Однако он требует значительных усилий, так как для каждого нового языка необходимо создавать отдельный диалект.
2. Адаптация транслятора EmitC для операций языков Java, Go, Kotlin и другие. Этот подход проще, так как не требует создания новых диалектов. Однако он

ограничивается поддержкой лишь базовых конструкций, соответствующих подмножеству операций EmitC.

3. Добавление новых операций и атрибутов в диалект `tsar`. Этот вариант предполагает модификацию общей концепции, однако такой подход делает диалект более гибким и функциональным.

```
1 public class defaultWrapperClassName {
2     // TSAR_TAGS: fLow-sensitive
3     public static void cwe369_div_zero_simple() {
4         int v1 = 2;
5         // TSAR_SOURCE;CWE-369
6         v1 = 0;
7         int v2 = v1;
8         // TSAR_SINK;CWE-369
9         int v3 = 42 / v2;
10        StdSupport.printf("%d\n", v3);
11        return;
12    }
13 }
```

Листинг 3. Сгенерированная тестовая программа на языке Java для CWE-369 (Деление на ноль).

*Listing 3. Generated Java test program for CWE-369 (Divide by zero).*

Каждый из перечисленных методов имеет свои преимущества и недостатки. Наиболее перспективным решением является использование гибридного подхода, объединяющего лучшие практики всех трёх методов. Это позволит разработать универсальную и эффективную инфраструктуру в рамках инструмента TSAR.

## 5. Трансформации кода

В данном разделе приведены примеры трансформаций, реализованных в инструменте TSAR. В работах [20-22] рассматриваются различные техники обфускации (запутывания) исходного кода программ. Обфускация имеет значительное преимущество в том, что она сохраняет семантику исходной программы, одновременно усложняя анализ для статических и динамических анализаторов. Данное свойство является особенно важным при разработке трансформаций, которые должны будут сохранять семантику исходного шаблона.

В утилите `tsar` в настоящее время реализованы несколько техник трансформации исходного кода на основе предложений из вышеупомянутых работ:

- Замена литерала на переменную, содержащую значение литерала.
- Аутлайнинг – вынос участков кода в отдельную функцию. Для контроля над аутлайнингом используется механизм `tsar.transform_region`.
- Добавление явного приведения типа при присвоении данных переменной.
- Добавление бесполезного присваивания.
- Обертка инструкций в бесполезные инструкции потока управления: `if(true); switch`, который всегда переходит на одну и ту же метку; `for`, выполняющий всегда одну итерацию цикла и т.д.
- Перестановка веток `then` и `else` в инструкции `if`.
- Вставка операций `goto/try-catch`.
- Замена переменной на сумму двух других переменных.

Трансформации реализованы в виде пассивов в инфраструктуре MLIR. Реализация пассивов в MLIR является ключевым аспектом для выполнения трансформаций и оптимизаций кода. Каждый пассив определяется как класс, наследуемый от базового класса `mlir::OperationPass`, с переопределением метода `runOnOperation`, который отвечает за выполнение логики трансформации на операциях. MLIR поддерживает множество диалектов, что позволяет создавать как универсальные, так и специализированные пассивы, а возможность параметризации пассивов обеспечивает гибкость в их настройке. Кроме того, MLIR предлагает инструменты для тестирования, что упрощает создание тестов для проверки корректности работы пассивов и отладки. Также MLIR позволяет комбинировать несколько трансформаций в одном проходе компиляции.

На примере из листинга 1 проиллюстрирована работа трансформаций аутлайнинга, перестановки веток `if`, а также оборачивания инструкций в конструкции `if(true)`.

Для оборачивания инструкций в `if(true)` и аналогичные структуры применяется трансформация под названием `tsar-wrap-in-useless-cf`, которая оборачивает инструкции с атрибутом `#tsar.cfwrap<useless_if>`. Результаты применения указанных трансформаций к шаблону из листинга 1 представлены в листинге 4.

```
1 // TSAR_TAGS: flow-sensitive;path-sensitive
2 void cwe369_div_zero_simple() {
3     int32_t v1 = 2;
4     if (1) {
5         // TSAR_SOURCE;CWE-369;
6         v1 = 0;
7     }
8     int32_t v2 = v1;
9     if (1) {
10        // TSAR_SINK;CWE-369;
11        int32_t v3 = 42 / v2;
12        printf("%d\n", v3);
13    }
14    return;
15 }
```

Листинг 4. Шаблон из листинга 1 после применения `tsar-wrap-in-useless-cf`.  
Listing 4. Template from listing 1 after applying `tsar-wrap-in-useless-cf`.

Заметим, что исток и сток ошибки были обернуты в конструкцию `if(1)` (строки 4 и 9), а в `TSAR_TAGS` был добавлен новый тег `path-sensitive`, который указывает, что анализатор должен поддерживать анализ, чувствительный к путям исполнения, для выявления ошибки.

Далее перейдем к последовательному применению трансформации, которая меняет блоки `then` и `else` в инструкции `if`. Эта трансформация, обозначенная как `tsar-invert-if-else`, приводит к результатам, представленным в листинге 5. В данном случае в `TSAR_TAGS` не произошло значительных изменений, поскольку тег `path-sensitive` уже был установлен.

Далее рассмотрим применение аутлайнинга к исходному шаблону из листинга 1, за выполнение которого в утилите `tsar` отвечает трансформация, обозначенная как `tsar-outline-transform-regions`. Пример работы демонстрируется в листинге 6.

В результате применения аутлайнинга исток и сток ошибки были перенесены в функции `cwe369_div_zero_simple_1` (строка 6) и `cwe369_div_zero_simple_2` (строка 13) соответственно. Кроме того, в `TSAR_TAGS` был добавлен новый тег `inter-procedure`, который указывает на необходимость поддержки межпроцедурного анализа в анализаторе.

## 6. Тестирование

В данном разделе рассматривается автоматизация генерации тестов на основе заданных шаблонов, а также представляется пример тестирования и сравнения различных анализаторов.

```
1 // TSAR_TAGS: flow-sensitive;path-sensitive
2 void cwe369_div_zero_simple() {
3     int32_t v1 = 2;
4     if (!1) {
5     } else {
6         // TSAR_SOURCE;CWE-369;
7         v1 = 0;
8     }
9     int32_t v2 = v1;
10    if (!1) {
11    } else {
12        // TSAR_SINK;CWE-369;
13        int32_t v3 = 42 / v2;
14        printf("%d\n", v3);
15    }
16    return;
17 }
```

Листинг 5. Последовательное применение tsar-invert-if-else к листингу 4.  
Listing 5. Consecutive application of tsar-invert-if-else to listing 4.

```
1 // TSAR_TAGS: flow-sensitive;inter-procedure
2 static int32_t cwe369_div_zero_simple_0() {
3     return 0;
4 }
5
6 static void cwe369_div_zero_simple_1(int32_t v1, int32_t v2) {
7     // TSAR_SINK;CWE-369
8     int32_t v3 = v1 / v2;
9     printf("%d\n", v3);
10    return;
11 }
12
13 static void cwe369_div_zero_simple_2(int32_t v1, int32_t v2) {
14     int32_t v3 = 2;
15     // TSAR_SOURCE;CWE-369
16     v3 = v2;
17     int32_t v4 = v3;
18     cwe369_div_zero_simple_1(v1, v4);
19     return;
20 }
21
22 void cwe369_div_zero_simple() {
23     int32_t v1 = cwe369_div_zero_simple_0();
24     cwe369_div_zero_simple_2(42, v1);
25     return;
26 }
```

Листинг 6. Применение tsar-outline-transform-regions к шаблону из листинга 1.  
Listing 6. Application of tsar-outline-transform-regions on template from listing 1.

В предыдущем разделе была проанализирована структура шаблона и механизмы применения трансформаций к нему. Теперь мы рассмотрим последовательное усложнение шаблона и генерацию множества тестовых программ из одного шаблона за счет применения различных

трансформаций. Для этого в исходный шаблон вводятся специальные комментарии для MLIR следующего формата:

- `// target: c, cpp` – языки, которые поддерживаются в данном шаблоне.  
`// @base@: --tsar-wrap-in-useless-cf @out1@` – применить к `@base@` трансформацию и записать результат в `@out1@` для последующих трансформаций.

Каждая строка комментария интерпретируется таким образом, что она генерирует тесты для всех языков, указанных в разделе `target`.

В конечном шаблоне данная разметка может выглядеть как показано в листинге 7.

```
1 // target: c, cpp
2
3 // @base@: -- @base@
4 // @base@: --tsar-wrap-in-useless-cf @out1@
5 // @base@: --tsar-outline-transform-regions @out2@
6
7 // @out1@: --tsar-invert-if-else @out3@
8 // @out3@: --tsar-wrap-in-useless-cf @out4@
9 // @out4@: --tsar-outline-transform-regions @out5@
10
11 // @out1@: --tsar-wrap-in-useless-cf @out6@
12 // @out6@: --tsar-invert-if-else @out7@
13 // @out7@: --tsar-outline-transform-regions @out8@
14
15 // @out2@: --tsar-wrap-in-useless-cf @out9@
16 // @out9@: --tsar-invert-if-else @out10@
17 // @out10@: --tsar-wrap-in-useless-cf @out11@
18 // @out9@: --tsar-wrap-in-useless-cf @out12@
19 // @out12@: --tsar-invert-if-else @end@
20
21 <MLIR TEMPLATE>
```

Листинг 7. Пример разметки для генерации в MLIR шаблоне.

Listing 7. Example of markup for interpretation in MLIR template.

В результате интерпретации указанных комментариев будет сгенерировано 14 программ для языка C и 14 программ для языка C++.

На текущий момент в TSAR представлены шаблоны для множества классов уязвимостей, таких как CWE-125 (Out-of-bounds read), CWE-134 (Use of Externally-Controlled Format String), CWE-369 (Divide by zero), CWE-401 (Missing Release of Memory after Effective Lifetime), CWE-415 (Double free), CWE-416 (Use after free), CWE-476 (Null pointer dereference), CWE-563 (Assignment to Variable without Use), CWE-763 (Release of Invalid Pointer or Reference), CWE-788 (Access of memory location after the end of buffer) и CWE-824 (Access of Uninitialized Pointer) в сумме составляющие более тысячи тестовых программ на языках C и C++.

Для оценки эффективности предложенного подхода были протестированы следующие анализаторы: clang-tidy [23] с включенными статическими детекторами Clang Static Analyzer (CSA) [7] и cppcheck [5]. Анализаторы запускались с применением собственных инструментов для анализа проектов, после чего результаты импортировались в утилиту metalyzer для дальнейшего сравнения. Сравнение проводилось путем отображения ошибок, выявленных каждым анализатором, в соответствующие им классы уязвимостей CWE. Отображение ошибок для cppcheck и clang-tidy было основано на работе [24], описывающее сопоставление предупреждений анализаторов на соответствующие CWE, а также ручную.

Под истинным срабатыванием (TP, True Positive) будем понимать, когда ожидаемая ошибка в конкретной тестовой программе совпадает с выводами анализатора. Точность вычислялась

как отношение истинных срабатываний (TP) к количеству тестов. Сравнение осуществлялось с учетом классов CWE, допустимых номеров строк, где могла быть ошибка, а также соответствующих файлов. Результаты тестирования представлены в табл. 1.

Из анализа представленных данных в таблице следует, что сделать однозначный вывод о превосходстве одного анализатора над другими невозможно. Все анализаторы демонстрировали наличие ошибок в определенных классах уязвимостей (CWE), и ни один из них не смог полноценно покрыть все представленные CWE.

Табл. 1. Сравнение статических анализаторов на тестовом наборе tsar.  
Table 1. Static analyzers performance on TSAR benchmark suite.

CWE\Анализатор	cppcheck		clang-tidy + CSA		Количество тестов
	TP	Точность	TP	Точность	
CWE-125	56	49%	90	79%	114
CWE-134	0	0%	42	100%	42
CWE-369	122	32%	140	36%	384
CWE-401	13	37%	23	66%	35
CWE-415	24	10%	84	37%	229
CWE-416	26	39%	26	39%	66
CWE-476	2	5%	40	100%	40
CWE-563	110	100%	110	100%	110
CWE-763	29	21%	98	70%	140
CWE-788	54	96%	56	100%	56
CWE-824	126	100%	126	100%	126

Одной из уникальных особенностей тестового набора TSAR является наличие тегов, которые описывают конкретные сгенерированные программы. Это позволяет более точно оценить возможности статических анализаторов. В частности, при анализе CWE-369 на основании тегов было выявлено, что CSA не обнаружил уязвимость во всех программах, содержащих тег float. Данный факт указывает на ограничения анализа clang-tidy при обработке данных типа float. Пример теста, в котором был использован тег float, представлен в листинге 8.

```
1 // TSAR_TAGS: float;flow-sensitive
2 void cwe369_div_zero_simple_float() {
3     float v1 = 2.0F;
4     // TSAR_SOURCE;CWE-369
5     v1 = 0.0F;
6     float v2 = v1;
7     // TSAR_SINK;CWE-369
8     int32_t v3 = (int32_t) 42.0F / (int32_t) v2;
9     printf("%d\n", v3);
10    return;
11 }
```

Листинг 8. Тест с тегом float, на котором clang-tidy не нашел ошибку деления на ноль.  
Listing 8. Test with float tag where clang-tidy was unable to find divide by zero.

Этот тест был получен путем изменения типа переменной с `int` на `float` в идентичных тестах. В то время как CSA успешно выявил ошибку во всех вариациях теста с тегом `int`, в случае с тегом `float` анализатор не сумел обнаружить ту же уязвимость. Это свидетельствует о потенциальных слабостях в механизмах анализа CSA, связанных с определенными типами данных.

В ходе анализа CWE-788 было выявлено, что `cppcheck` не справился с двумя межпроцедурными тестами. Единственным отличительным тегом в этих тестах был `general-type-in-outline`, который применял более общие типы данных вместо изначально заданных.

```
1 // TSAR_TAGS: inter-procedure;general-type-in-outline
2 static void cwe788_out_of_bounds_write_0(int *v1) {
3     // TSAR_SINK;CWE-788
4     strcpy(v1, "This string is too long for the buffer");
5     return;
6 }
7
8 void cwe788_out_of_bounds_write() {
9     // TSAR_SOURCE;CWE-788
10    int8_t v1[10];
11    cwe788_out_of_bounds_write_0(v1);
12    printf("%s\n", v1);
13    return;
14 }
```

Листинг 9. Тест с межпроцедурным анализом и использованием указателя общего типа.

*Listing 9. Test with interprocedural analysis and more general pointer type.*

Например, в листинге 9 на строке 3 в качестве типа аргумента функции использовался `int8_t *v1` вместо `int8_t v1[10]`. Это указывает на то, что `cppcheck` полагался на тип данных, а не на межпроцедурный анализ. Согласно стандарту C, компилятор не учитывает различия в типах указателей при передаче аргументов функции.

Также при анализе CWE-415 (Double Free) было выявлено, что CSA не обнаружил уязвимость во всех тестовых программах, содержащих тег `try-catch` (листинг 10).

```
1 // TSAR_TAGS: class;try-catch
2 class MyTask {};
3 int32_t cwe415_double_free() {
4     MyTask *task = nullptr;
5     try {
6         task = new MyTask;
7         delete task;
8         throw(1);
9     } catch (...) {
10        // TSAR_SINK;CWE-415
11        delete task;
12    }
13    return 0;
14 }
```

Листинг 10. Тест с тегом `try-catch`, на котором CSA не нашел ошибку повторного освобождения.

*Listing 10. Test with try-catch tag where CSA was unable to find double free.*

Текущий анализ в CSA не может [25] корректно обработать поведение механизма исключений C++ и их влияние на потоки выполнения и деструкторы. `throw` просто останавливает анализ во избежание ошибок и некорректных результатов.

## 7. Заключение

В данной статье представлен новый инструмент TSAR, предназначенный для оценки эффективности статических анализаторов. TSAR включает три ключевых компонента: шаблоны на MLIR, построенные вокруг различных классов уязвимостей из CWE; мутатор шаблонов (tsar), который выполняет трансформации шаблонов и генерирует тестовые программы на языках C, C++ и Java; утилита для сбора результатов анализа и сравнения анализаторов (metalyzer).

Инструмент TSAR направлен на выявление недостатков статических анализаторов, особенно в тех случаях, когда анализаторы не охватывают определенные методы анализа, такие как внутрипроцедурный и межпроцедурный анализ, чувствительный к путям выполнения анализ и анализ помеченных данных.

Тестирование различных статических анализаторов на тестах, сгенерированных на основе шаблонов CWE, позволили выявить конкретные недостатки в методах анализа и указать области для улучшения.

В рамках дальнейшей работы планируется увеличить в TSAR покрытие различных CWE, расширить количество доступных трансформаций, улучшить поддержку языка Java, а также сделать процесс написания шаблонов более доступным. Этого планируется достичь путем использования более высокоуровневых диалектов MLIR или даже языка программирования C, обеспечивая трансляцию до диалекта EmitC через ClangIR (промежуточное представление Clang, которое является диалектом MLIR для языков C/C++). Данные улучшения направлены на повышение точности и эффективности TSAR как инструмента для анализа и тестирования статических анализаторов, что, в свою очередь, должно способствовать улучшению качества тестируемого программного обеспечения.

## Список литературы / References

- [1]. CWE, Common Weakness Enumeration, <https://cwe.mitre.org>, accessed 01.12.2024.
- [2]. Cuoq, P. et al. (2012). Testing Static Analyzers with Randomly Generated Programs. In: Goodloe, A.E., Person, S. (eds) *NASA Formal Methods. NFM 2012. Lecture Notes in Computer Science*, vol 7226. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-28891-3\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-642-28891-3_12)
- [3]. Yang X. et al. Finding and understanding bugs in C compilers // *Proceedings of the 32nd ACM SIGPLAN conference on Programming language design and implementation*. – 2011. – С. 283-294.
- [4]. Arusoae A., Ciobăca S., Craciun V., Gavrilut D. and Lucanu D., "A Comparison of Open-Source Static Analysis Tools for Vulnerability Detection in C/C++ Code," *19th International Symposium on Symbolic and Numeric Algorithms for Scientific Computing (SYNASC)*, Timisoara, Romania, 2017, pp. 161-168, doi: 10.1109/SYNASC.2017.00035.
- [5]. Marjamaki D., "Cpacheck - a tool for static c/c++ code analysis", <http://cppcheck.wiki.sourceforge.net/>
- [6]. Calcagno C. et al. Moving fast with software verification // *NASA Formal Methods Symposium*. – Cham : Springer International Publishing, 2015. – С. 3-11.
- [7]. Clang, "Clang Static Analyzer", <https://clang-analyzer.lldvm.org/>
- [8]. OCLint - A static source code analysis tool to improve quality and reduce defects for C, C++ and Objective-C, <https://github.com/oclint/oclint>, accessed 01.12.2024.
- [9]. Shiraishi S., Mohan V., Marimuthu H. Test suites for benchmarks of static analysis tools // *2015 IEEE International Symposium on Software Reliability Engineering Workshops (ISSREW)*. – IEEE, 2015. – С. 12-15.
- [10]. Christian Klinger, Maria Christakis, and Valentin Wüstholtz. 2019. Differentially testing soundness and precision of program analyzers. In *Proceedings of the 28th ACM SIGSOFT International Symposium on Software Testing and Analysis (ISSTA 2019)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 239–250. <https://doi.org/10.1145/3293882.3330553>
- [11]. Groce A. et al., "Evaluating and Improving Static Analysis Tools Via Differential Mutation Analysis," *2021 IEEE 21st International Conference on Software Quality, Reliability and Security (QRS)*, Hainan, China, 2021, pp. 207-218, doi: 10.1109/QRS54544.2021.00032.
- [12]. Stephan Lipp, Sebastian Banescu, and Alexander Pretschner. 2022. An empirical study on the effectiveness of static C code analyzers for vulnerability detection. In *Proceedings of the 31st ACM*

- SIGSOFT International Symposium on Software Testing and Analysis (ISSTA 2022). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 544–555
- [13]. The OpenSSF CVE Benchmark, <https://github.com/ossf-cve-benchmark/ossf-cve-benchmark>, accessed 01.12.2024.
- [14]. Boland T., Black P. E. Juliet 1.1 C/C++ and java test suite // *Computer*. – 2012. – Т. 45. №. 10. С. 88-90.
- [15]. saveourtool: Test framework for Static Analyzers and Compilers, <https://github.com/saveourtool>, accessed 01.12.2024.
- [16]. ГОСТ Р 71207-2024 – Защита информации. Разработка безопасного программного обеспечения. Статический анализ программного обеспечения. Общие требования. <https://protect.gost.ru/document1.aspx?control=31&baseC=6&page=3&month=2&year=2024&search=&id=257752>
- [17]. Lattner C. et al. MLIR: A compiler infrastructure for the end of Moore's law // *arXiv preprint arXiv:2002.11054*. – 2020.
- [18]. Static Analysis Results Interchange Format (SARIF), <https://docs.oasis-open.org/sarif/sarif/v2.1.0/sarif-v2.1.0.html>, accessed 01.12.2024.
- [19]. 'emitc' Dialect to generate C/C++ from MLIR, <https://mlir.llvm.org/docs/Dialects/EmitC/>, accessed 01.12.2024.
- [20]. Banescu S., Pretschner A. A tutorial on software obfuscation // *Advances in Computers*. – 2018. – Т. 108. – С. 283-353.
- [21]. Jing D. Improvement of Vulnerable Code Dataset Based on Program Equivalence Transformation // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2022. – Т. 2363. – №. 1. – С. 012010.
- [22]. Li Y. et al. A closer look into transformer-based code intelligence through code transformation: Challenges and opportunities // *arXiv preprint arXiv:2207.04285*. – 2022.
- [23]. Clang Tidy, <https://clang.llvm.org/extra/clang-tidy/>, accessed 01.12.2024.
- [24]. Charoenwet W. et al. An empirical study of static analysis tools for secure code review // *Proceedings of the 33rd ACM SIGSOFT International Symposium on Software Testing and Analysis*. – 2024. – С. 691 - 703.
- [25]. Treat C++ 'throw' as a sink jrose-apple // committed on Aug 18, 2012 <https://github.com/llvm/llvm-project/commit/a4309c941c622f45f5fe58faaa0227a7f8b4da16>, accessed 01.12.2024.

## **Информация об авторах / Information about authors**

Кирилл Алексеевич ЧИБИСОВ – инженер отдела компиляторных технологий ИСП РАН. Научные интересы: статический анализ программ, компиляторные технологии, оптимизации.

Kirill Alekseevich CHIBISOV – engineer at Compiler Technology department of ISP RAS. Research interests: static analysis, compiler technologies, optimizations.

Рубен Артурович БУЧАЦКИЙ – кандидат технических наук, научный сотрудник отдела компиляторных технологий ИСП РАН. Научные интересы: статический анализ программ, компиляторные технологии, оптимизации.

Ruben Arturovich BUCHATSKIY – Cand. Sci. (Tech.), researcher at Compiler Technology department of ISP RAS. Research interests: static analysis, compiler technologies, optimizations.

Андрей Дмитриевич ТИМОНИН – лаборант отдела компиляторных технологий ИСП РАН. Научные интересы: статический анализ программ, компиляторные технологии, оптимизации.

Andrey Dmitrievich TIMONIN – laboratory assistant at Compiler Technology department of ISP RAS. Research interests: static analysis, compiler technologies, optimizations.

Владислав Игоревич ЛАЗАРЬ – студент МФТИ, Научные интересы: статический анализ программ, компиляторные технологии, оптимизации.

Valdislav Igorevich LAZAR – a student at MIPT. Research interests: static analysis, compiler technologies, optimizations.

Дмитрий Михайлович ЖУРИХИН – старший научный сотрудник ИСП РАН, преподаватель МГУ. Сфера научных интересов: статический анализ программ, оптимизация программ, машинное обучение.

Dmitry Mikhailovich ZHURIKHIN – senior researcher at ISP RAS, lecturer at MSU. Research interests: static analysis, program optimization, machine learning.

Андрей Андреевич БЕЛЕВАНЦЕВ – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ИСП РАН, профессор МГУ. Сфера научных интересов: статический анализ программ, оптимизация программ, параллельное программирование.

Andrey Andreevich BELEVANTSEV – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., leading researcher at ISP RAS, Professor at MSU. Research interests: static analysis, program optimization, parallel programming.

DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(2)-7



## Алгоритм выбора семантических мутаций в фаззинге по принципу серого ящика

<sup>1</sup> Г.Р. Райкин, ORCID: 0009-0004-7783-7818 <gregra@mail.ru>

<sup>2</sup> М.С. Пелевин, ORCID: 0009-0007-5762-2918 <maks.pelevin@gmail.com>

<sup>1</sup> В.М. Ицыксон, ORCID: 0000-0003-0276-4517 <itsyksen@yandex.ru>

<sup>1</sup> Университет ИТМО,

Россия, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д.49, л. А.

<sup>2</sup> СПбГЭТУ «ЛЭТИ»,

Россия, 197022, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5, л. Ф.

**Аннотация.** С развитием современных информационных систем динамический анализ становится неотъемлемой частью процесса разработки программного обеспечения. Одной из самых эффективных и распространённых техник в этой области является фаззинг-тестирование (фаззинг). Суть этого метода состоит в передаче исследуемой программе большого количества случайных и неожиданных входных данных. Инструменты мутационного фаззинга генерируют тестовые данные, применяя модификации (мутации) к удачным из уже использованных вариантов, повышая таким образом число обнаруженных поведений и покрытие кода. Сами мутации при этом чаще всего выбираются случайным образом. В данной работе предложен метод повышения эффективности мутационного фаззинга с помощью адаптивной стратегии выбора мутации. Предложенный метод апробирован на широко используемых Java-пакетах и продемонстрировал статистически значимый прирост количества найденных ошибок и числа различных поведений (трасс исполнения) тестируемых программ.

**Ключевые слова:** динамический анализ; тестирование; фаззинг; структурный фаззинг; эволюционный фаззинг; задача о многоугольнике бандите.

**Для цитирования:** Райкин Г.Р., Пелевин М.С., Ицыксон В.М. Алгоритм выбора семантических мутаций в фаззинге по принципу серого ящика. Труды ИСП РАН, том 37, вып. 2, 2025 г., стр. 97–114. DOI: 10.15514/ISPRAS–2025–37(2)–7.

## Semantic Mutation Strategy in Grey-Box Fuzzing

<sup>1</sup> G.R. Raykin, ORCID: 0009-0004-7783-7818 <gregra@mail.ru>

<sup>2</sup> M.S. Pelevin, ORCID: 0009-0007-5762-2918 <maks.pelevin@gmail.com>

<sup>1</sup> V.M. Itsykson, ORCID: 0000-0003-0276-4517 <itsykson@yandex.ru>

<sup>1</sup> ITMO University,

Kronverksky Pr. 49, bldg. A, St. Petersburg, 197101, Russia.

<sup>2</sup> Saint Petersburg Electrotechnical University LETI,

Professora Popova St., 5, St. Petersburg, 197022, Russia.

**Abstract.** With the advancement of modern information technology, dynamic analysis is becoming an essential part of software development. Fuzz testing is one of the most efficient and widely used techniques in this field. The core idea behind this approach is to input a large amount of random data into the program under the test. Mutation-based fuzzing tools generate test data by applying modifications (mutations) to successful variants that have already been identified, thus increasing the number of detected behaviors and code coverage. A common mutation strategy is to randomly select a mutation operator with a predefined probability. This paper proposes a method to improve the effectiveness of mutation fuzzing through an adaptive mutation selection strategy. This approach was tested on commonly used Java packages and showed a statistically significant improvement in the number of errors detected and the diversity of program behaviors (execution traces).

**Keywords:** dynamic analysis; software testing; fuzzing; structural fuzzing; evolutionary fuzzing; multi-armed bandit problem.

**For citation:** Raykin G.R., Pelevin M.S., Itsykson V.M. Semantic mutation strategy in grey-box fuzzing. *Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS*, vol. 37, issue 2, 2025. pp. 97-114 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(2) - 7.

### 1. Введение

Фаззинг (фаззинг-тестирование) – один из наиболее распространенных методов динамического анализа и тестирования ПО, в основе которого лежит передача тестируемой системе разнообразных входных данных, сгенерированных псевдослучайным образом. Такой подход позволяет проверить поведение системы в большом количестве различных ситуаций, в том числе не предусмотренных ее разработчиками.

Для обеспечения качества генерируемых фаззером входных данных, используется структурный фаззинг, позволяющий генерировать псевдослучайные данные с использованием информации о структурах данных и форматах представления данных. Например, при генерации может учитываться грамматика некоторого языка [1], формат файла [2], спецификация протокола передачи данных [3] и т.д. Однако, зачастую одной корректности входных данных недостаточно для задействования существенной части тестируемой логики, и для проведения объемлющего тестирования необходимо использовать свойства тестируемой программы, которые не отражены в модели [4]. Обнаружению и эксплуатации таких свойств посвящено множество исследований и разработок [5].

В зависимости от способа взаимодействия с тестируемой системой, техники фаззинга условно делят на фаззинг по методу черного, белого и серого ящика. Данная работа фокусируется на фаззинге по методу серого ящика, который предполагает запуск инструментированного кода тестируемой программы и использование информации о трассах исполнения.

Основой всех алгоритмов фаззинга по методу серого ящика является мутационный цикл обратной связи [6]. Эта схема предполагает сохранение наиболее результативных (например, с точки зрения покрытия кода или частотности обнаружения соответствующего поведения) входных данных, и последующую генерацию на основе успешных предыдущих попыток

посредством их незначительного изменения (мутации). Качество и результативность генерируемых фаззером входных данных при этом определяются эффективностью мутаций, проводимых в цикле обратной связи.

При структурном фаззинге применяются мутации, которые меняют исходное значение таким образом, чтобы результат не нарушал заданную моделью спецификацию [7]. Большинство инструментов фаззинга применяют мутации в случайном порядке, таким образом цикл обратной связи культивирует результативные входные значения, а процесс мутаций остается неизменным на всем протяжении тестирования.

В данной работе предложен метод повышения эффективности мутационного фаззинга по методу серого ящика с помощью адаптивной стратегии мутаций. Суть метода состоит в том, чтобы ввести в алгоритм мутационного фаззинга второй цикл обратной связи, который позволит оценивать эффективность мутаций и взвешивать вероятности их применения на основе этой информации. Предложенный метод был реализован на базе эволюционного фаззера и апробирован на широко используемых Java-пакетах. Апробация показала статистически значимый прирост количества найденных ошибок и увеличение числа поведений тестируемых программ в сравнении со случайными мутациями при тестировании с одним и тем же количеством запусков.

## **2. Алгоритм эволюционного фаззинга**

Используемый в данной работе фаззер реализует модифицированный эволюционный алгоритм ( $\mu+1$ ) [8]. Данный алгоритм поддерживает популяцию  $\mu$  особей (в данном случае в качестве особей выступают входные значения тестируемой программы), каждой из которых ставится в соответствие показатель приспособленности (в контексте задачи фаззинга в качестве приспособленности используется некоторая оценка потенциала значения для дальнейшей эволюции). На каждом шаге алгоритма из популяции выбирается один представитель с вероятностью, пропорциональной показателю приспособленности. К выбранному значению применяется мутация, получившаяся в результате новая особь получает оценку приспособленности, и если этот показатель превосходит минимальное значение из популяции, он добавляется в популяцию на место наименее приспособленного представителя (рис. 1).

В качестве точки входа фаззер использует методы классов в Java проекте. Особенностью такого подхода является необходимость генерации экземпляров объектов произвольных типов в соответствии с сигнатурой тестируемого метода и структурная мутация этих данных в соответствии с их типами. Для этого в фаззере используется рекурсивное представление данных, которое позволяет описать объекты произвольной структуры и мутации, соответствующие их семантике.

Представление значений в фаззере устроено следующим образом. Фаззер содержит внутреннее представление и специальные наборы мутаций для строк, битовых векторов, чисел с плавающей точкой и байтовых буферов. Данные разных типов могут объединяться в составные объекты, а наборы данных одного типа – в коллекции, для коллекций и составных объектов также предусмотрены мутации, меняющие порядок их содержимого или структуру. Мутация данных происходит рекурсивно: сначала мутационный оператор применяется к структуре объекта или коллекции, затем к их содержимому и так далее. Таким образом, фаззер не только генерирует данные в рамках автоматически выведенной спецификации, но и направляет процесс эволюции значений, основываясь на характере их использования.

## **3. Задача выбора мутаций**

Анализ эффективности мутационных операторов на примере фаззера AFL показал, что результативность мутаций с точки зрения генерации входных данных, раскрывающих новые поведения, различна, и их соотношение отличается в зависимости от тестируемой

программы [9]. Эмпирический анализ используемого в данной работе фаззера также показывает, что соотношение эффективностей мутаций может меняться с течением времени. Исходя из этих наблюдений, можно сделать вывод о неэффективности мутационных стратегий с предопределенным соотношением вероятностей выбора.

MU\_PLUS\_ONE\_FUZZING(mutations,  $\mu$ ,  $t_{\text{limit}}$ ):

```
1  population ← init_population( $\mu$ )
2  while  $t_{\text{elapsed}} < t_{\text{limit}}$  :
3      seed ← sample(population)
4      mutation ← sample(mutations)
5      mutated_seed ← mutate(seed, mutation)
6      fitness ← execute(mutated_seed)
7      if fitness > population.worst.fitness:
8          if population.size =  $\mu$ :
9              population.remove_worst_seed()
10         population.add(seed, fitness)
```

Рис. 1. Упрощенный алгоритм эволюционного фаззинга ( $\mu+1$ ).

Fig. 1. Simplified ( $\mu+1$ ) evolutionary fuzzing algorithm.

Ниже приведен обзор существующих подходов к выбору мутаций в контексте требований, предъявленных разрабатываемому алгоритму ввиду особенностей использования фаззера:

- Предполагается, что процесс выбора мутаций происходит независимо от выбора мутируемых данных. Это требование обусловлено тем, что алгоритм выбора данных для мутации является предметом многочисленных исследований, и добавление стратегии выбора мутаций не должно ограничивать его дальнейшую модификацию.
- Алгоритм выбора мутаций не должен требовать какого-либо предобучения. Идея использования предобученных на большом количестве программ алгоритмов обсуждается в литературе, однако, применимость и переносимость таких решений очень сложно проверить, поэтому такой подход не получил распространения.
- Выбор мутаций не должен требовать значительных вычислительных ресурсов. Эффективность модификации алгоритма фаззинга должна компенсировать сокращение скорости работы (и, соответственно, количества запусков), к которому она приводит. Проверить такое свойство чрезвычайно сложно ввиду того, что время запуска может существенно варьироваться в зависимости от тестируемой системы и условий эксперимента.

## **4. Обзор существующих алгоритмов выбора мутаций**

### **4.1 Метод тепловых карт**

Метод тепловых карт или «горячих байтов» состоит в том, чтобы найти в кодирующей входное значение последовательности байт таких позиции, что изменение значений в них с большей вероятностью приводит к раскрытию новых поведений и задействованию большего объема тестируемой логики [10,11]. Фокусирование мутаций на «горячих» позициях позволяет повысить эффективность мутаций и сократить количество ненужных запусков тестируемой программы.

Одним из главных ограничений этого метода является необходимость хранить и анализировать информацию о «температуре» наборов данных, особенно если фаззер работает с входными данными большого объема. Кроме того, техника тепловых карт требует, чтобы мутации были параметризованы конкретной позицией, к которой они применяются, что ограничивает использование этого подхода для структурированных значений, а также усложняет задание пользовательских мутаций. Для некоторых семантических мутаций, используемых в данной работе, этот подход не применим.

### **4.2 Оптимизация роем частиц**

Метод оптимизации роем частиц (Particle Swarm Optimization – PSO) – это метаэвристический алгоритм глобальной оптимизации, вдохновленный социальным поведением животных. Он заключается в управлении популяцией частиц, перемещающихся в пространстве возможных решений задачи, итеративно приближаясь таким образом к оптимальному решению.

В рамках алгоритма MOpt [9], реализованного в одном из наиболее широко используемых инструментов фаззинга AFL++, для поиска эффективного соотношения вероятностей выбора мутаций используется модифицированный PSO. В роли частиц в нем выступают мутации, а в качестве пространства решений – вероятности их выбора.

Другой инструмент, применяющий алгоритм оптимизации роем частиц – PSOFuzz [12] использует в качестве частицы однопоточный фаззер, а в качестве пространства решений – соотношения вероятностей выбора мутаций. Таким образом, в качестве роя частиц выступает фаззер, работающий в многопоточном режиме, а искомым оптимумом – набор одновременно применяемых стратегий мутации.

Недостатком этого метода является то, что он требует большого количества обновлений и, соответственно, времени работы для обнаружения приемлемого решения. Также алгоритму PSO свойственна высокая вычислительная сложность, которая влияет на скорость работы фаззера, ввиду чего анализ его производительности показывает противоречивые результаты [13].

### **4.3 Марковский процесс принятия решения**

Наличие цикла обратной связи позволяет формализовать фаззинг по принципу серого ящика как марковский процесс принятия решений. Эта модель описывает задачу оптимизации как задачу поиска оптимальной стратегии принятия решений агентом, находящимся в некоторой среде, которая меняется в зависимости от предпринимаемых им действий. Взаимодействие агента и среды заключается в том, что агент выбирает одно из доступных действий, после чего среда с некоторой вероятностью меняет свое состояние, и в результате изменения состояния агент получает вознаграждение. Вознаграждение определяется определяющей средой функцией награды.

В контексте выбора мутаций в фаззинге в качестве агента выступает планировщик мутаций, который на каждом шаге выбирает одну из доступных мутаций или планировщик

мутируемых значений, который выбирает очередное значение из популяции, а в качестве среды – набор поведений или трасс исполнения тестируемой программы. Таким образом, изменение состояния среды происходит в тот момент, когда очередная мутация приводит появлению входного значения, которое раскрывает неизвестное ранее поведение.

Этот формализм позволяет применить к выбору мутаций ряд мощных методов оптимизации, в частности Q-обучение и нейронные сети [14-16]. Однако, на текущий момент, алгоритмы фаззинга, основанные на глубоком обучении показывают недостаточно впечатляющие результаты и нуждаются в дополнительных исследованиях [17].

### 4.3 Задача о многоруком бандите

Еще одну модель, которая хорошо подходит для описания процесса фаззинга и, в частности, выбора мутаций, рассматривает задача о многоруком бандите [18]. Аналогично марковскому процессу принятия решений, эта модель описывает агента, которому доступно несколько действий (их также называют руками или рычагами). Каждое действие с некоторой вероятностью генерирует вознаграждение. Цель агента – максимизировать выигрыш, полученный за ограниченное число действий.

Задача о многоруком бандите демонстрирует дилемму исследования и эксплуатации (exploration-exploitation problem): чтобы максимизировать выигрыш, агент должен одновременно изучить распределения вероятностей выигрышей, соответствующих разным действиям, и использовать накопленные знания, выбирая наиболее перспективные действия.

В различных предметных областях применяется множество вариаций и обобщений задачи однорукого бандита. Нестационарная задача о многоруком бандите – обобщение, описывающее агента в динамической среде, свойства которой меняются со временем. Также существует вариант задачи, при котором на среду оказывает влияние некоторая дополнительная информация – контекст. В этом случае, агент должен не только изучить фиксированные свойства среды, основываясь на своих предыдущих действиях, но и выявить закономерности между вариантами контекста и состояниями среды. Такой вариант задачи называют задачей о контекстном многоруком бандите. Наконец, можно рассмотреть многопользовательскую задачу о многоруких бандитах, в которой несколько агентов существуют в одной среде, а изменение среды определяется совокупностью их решений. В зависимости от задач, которые решают агенты, выделяют конкурентную и коллаборативную задачу о многоруких бандитах.

Модель задачи о многоруком бандите можно применить для описания процесса фаззинга различными способами. Наиболее популярный из них – задача выбора значений из корпуса данных [19-21]. В качестве «рук» при этом используются мутируемые значения, а награда вычисляется по результатам исполнения тестируемой программы.

Алгоритм MobFuzz [22] рассматривает выбор значений и выбор мутации как две независимые задачи, описывая таким образом процесс фаззинга как нестационарную многопользовательскую задачу о многоруких бандитах. Аналогичный подход используется в SeamFuzz [23]: этот алгоритм разбивает входные значения на группы и решает задачу выбора мутаций для каждой из групп независимо.

Алгоритмы решения вариантов задачи о многоруком бандите получили широкое распространение в фаззинге благодаря своей экономичности, быстрой сходимости и способности адаптироваться к изменяющимся условиям среды. В данной работе был выбран именно этот подход, так как он соответствует всем описанным выше требованиям: позволяет решать задачу выбора мутаций независимо от выбора мутируемых данных, а также не требует предобучения и существенных вычислительных ресурсов.

## 5. Выбор мутаций как задача о многоруком бандите

Рассмотрим задачу выбора мутаций в эволюционном фаззинге по методу серого ящика. Агентом в этой модели выступит планировщик, а действиями – выбираемые мутации. Среда задается тестируемой системой и набором ее поведений. Цель агента – выбирать мутации таким образом, чтобы за ограниченное число запусков обнаружить в тестируемой программе как можно больше ошибок и уникальных поведений. Ошибками в данном случае считаются необработанные исключения, они индексируются названием исключения и вершиной стека вызовов. Это некоторое допущение, так как в общем случае разные ошибки могут приводить к одному и тому же исключению, и наоборот, одна и та же ошибка может проявляться разным образом, тем не менее, такой подход позволяет однозначно идентифицировать позиции в коде, в которых возникают ошибки. Различные поведения индексируются трассами исполнения, для оптимизации расхода памяти каждой трассе присваивается хеш-код. Таким образом, выбор мутации влечет один из четырех исходов: обнаружение новой ошибки, обнаружение нового поведения, повторение уже известной ошибки и повторение уже известного корректного поведения.

В данной работе задача выбора мутаций решается независимо от выбора значений (вероятность выбора удачного значения для мутации рассматривается как вероятностное свойство среды), в рамках дальнейшей работы модель может быть приведена к коллаборативной задаче о многоруких бандитах с помощью добавления второго агента, выбирающего исходные значения.

### 5.1 Свойства процесса фаззинга

Алгоритмы решения вариантов задачи о многоруком бандите опираются на известные свойства среды, с которой взаимодействует агент. Следовательно, и для решения задачи выбора мутаций важно определить характеристики, которыми может руководствоваться планировщик мутаций. Были выделены следующие особенности:

- Распределение вероятностей «успехов» мутаций определяется тестируемой программой, поэтому не стоит закладывать в решение предположения о конкретных распределениях.
- Так как обнаружение нового поведения раскрывает новую тестируемую логику, свойства которой могут отличаться от протестированной до этого, можно сказать, что распределение вероятностей «успехов» мутаций меняется скачкообразно по мере раскрытия новых поведений.
- Количество запусков тестируемой программы, необходимое для обнаружения следующей ошибки или следующего нового поведения, растет экспоненциально [24], при этом количество запусков, воспроизводящих известные ошибки, растет линейно (рис. 2-4).
- Запуски, воспроизводящие ошибки, требуют больше времени и ресурсов, чем те, которые завершаются корректно, поэтому предпочтительнее выполнять больше корректно завершающихся исполнений.

### 5.2 Жадный алгоритм решения задачи о многоруком бандите

Эпсилон-жадный ( $\epsilon$ -greedy) алгоритм решения задачи о многоруком бандите реализует самый простой способ решения проблемы исследования и эксплуатации: большую часть времени жадно выбирает действие, которое приносит наибольшую награду, но с некоторой вероятностью принимает «исследовательские» решения, выбирая случайное действие.

Пусть  $A$  – множество возможных действий,  $R_t(a)$  – рейтинг действия  $a$  на момент времени  $t$ , основанный на количестве успехов. На каждом шаге алгоритм разыгрывает случайное  $\xi_t \in$  из нормального распределения, и в зависимости от его значения выбирает действие.

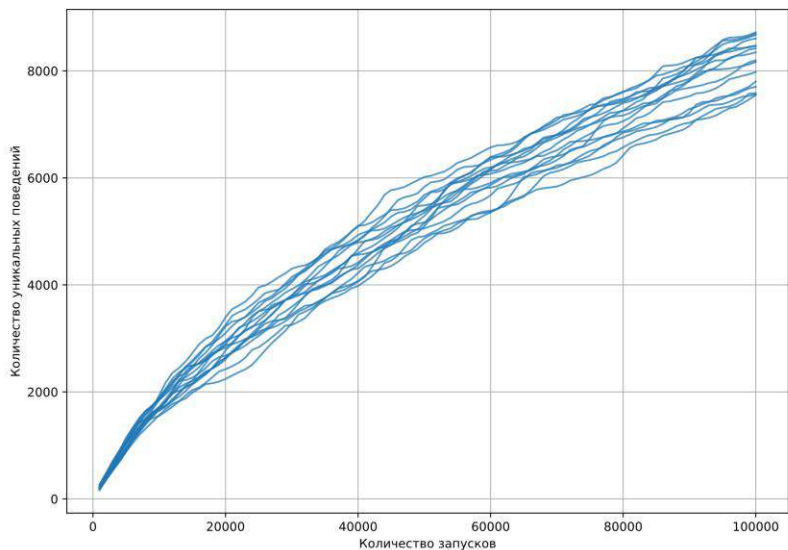


Рис. 2. Зависимость количества обнаруженных уникальных поведений от числа запусков на примере реальной программы (результаты нескольких прогонов).  
Fig. 2. Dependence of the number of detected unique behaviors on the number of runs while testing a real program (results of several runs).

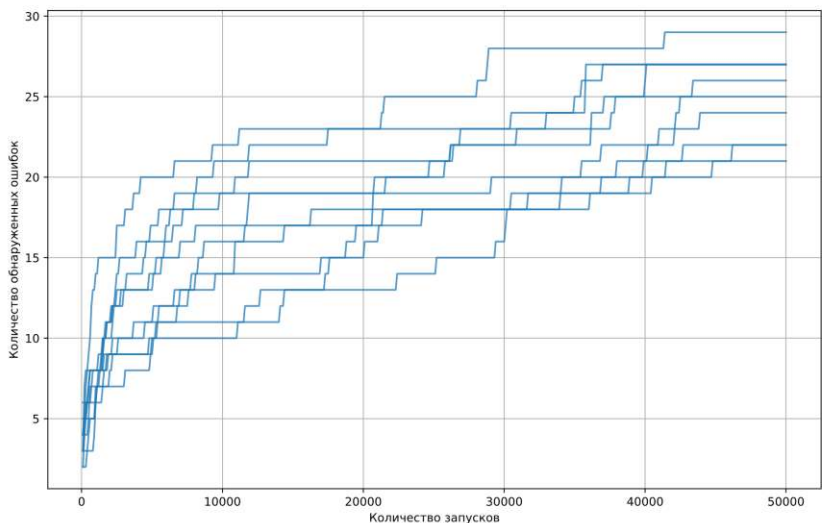


Рис. 3. Зависимость количества найденных ошибок от числа запусков на примере реальной программы.  
Fig. 3. Dependence of the number of errors found on the number of runs while testing a real program

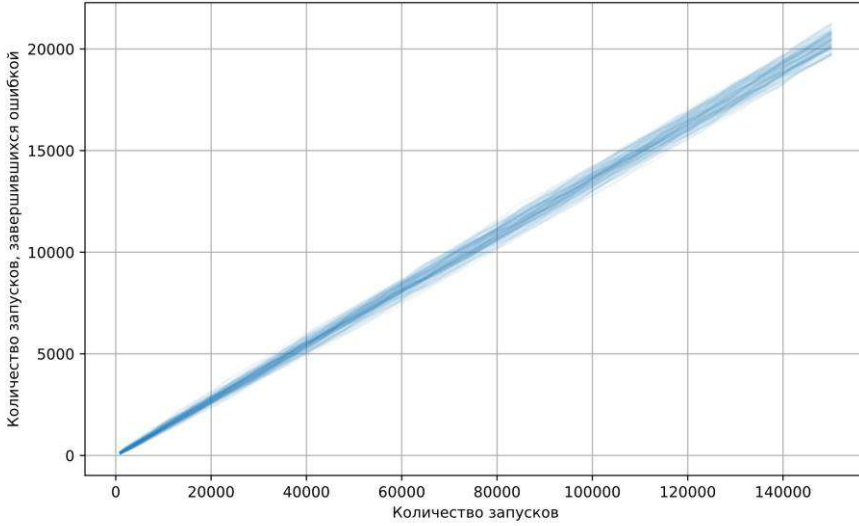


Рис. 4. Зависимость количества запусков, завершившихся ошибкой, от числа запусков на примере реальной программы.

Fig. 4. Dependence of the number of error reproducing runs on the number of runs while testing a real program.

Таким образом, параметр  $\varepsilon$  задает соотношение вероятностей исследования и эксплуатации:

$$a_t = \begin{cases} \operatorname{argmax}_a R_t(a), & \text{если } \xi_t \geq \varepsilon, \\ a_{\leftarrow}^{\text{random}}, & \text{если } \xi_t < \varepsilon, \end{cases}$$

Идею жадного алгоритма удалось применить для сокращения исполнений, завершающихся ошибкой. Для этого при вычислении «рейтинга» мутации также семплируется  $\xi_t \in$ , и рейтинг вычисляется как:

$$\varepsilon\_greedy_t = \begin{cases} 1.0, & \text{если } \xi \geq \varepsilon, \\ \frac{n_t(m)}{e_t^r(m)}, & \text{если } \xi < \varepsilon. \end{cases}$$

Здесь  $n_t(m)$  – количество применений мутации  $m$  на момент времени  $t$ ,  $e_t^r(m)$  – количество применений мутации  $m$ , в результате которых была воспроизведена уже известная ошибка. Таким образом, величина  $\frac{n_t(m)}{e_t^r(m)}$  обратно пропорциональна вероятности воспроизведения ошибки.

Узким местом этого подхода остается параметр  $\varepsilon$ , определяющий вероятность того, что алгоритм примет «рискованное» решение. Эмпирически было выбрано значение  $\varepsilon = 0.2$  как наиболее удачное.

### 5.3 Семплирование Томпсона

Семплирование Томпсона – один из наиболее эффективных и широко используемых методов решения задачи о многоруком бандите. Согласно некоторым исследованиям, в алгоритмах фаззинга этот подход превосходит аналоги, такие как Exp3 и UCB (Upper Confidence Bounds) [25, 26].

Алгоритм семплирования Томпсона разыгрывает вероятности выбора действий из бета-распределения, параметры которого итеративно подбираются по мере работы.

Бета-распределение определяется двумя параметрами  $\alpha, \beta > 0$ , и плотность его вероятности определяется как

$$f(x) = \frac{1}{B(\alpha, \beta)} x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1}$$

Бета-функция  $B(\alpha, \beta)$  имеет вид:

$$B(\alpha, \beta) = \int_0^1 x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1} dx.$$

Соответственно, первый и второй моменты случайной величины, принадлежащей бета-распределению, определяются как

$$E[\xi_B] = \frac{\alpha}{\alpha + \beta}$$

$$D[\xi_B] = \frac{\alpha\beta}{(\alpha + \beta)^2(\alpha + \beta + 1)}$$

Таким образом, в случае многоруких бандитов Бернулли (таких, что каждое действие приводит к успеху или неудаче), если сопоставить  $\alpha$  количество успехов, а  $\beta$  – количество неудач, математическое ожидание такого распределения будет стремиться к средней награде, полученной засчет этого действия, а дисперсия будет сокращаться по мере обучения. Более того, даже при изменении распределений оптимальных вероятностей, алгоритм может «переучить» распределение и адаптироваться к новым условиям.

С точки зрения мутаций в фаззинге, успехом можно считать обнаружение нового поведения тестируемой программы (как корректного, так и ошибочного), а неудачей – воспроизведение уже известного поведения. Тогда алгоритм решает задачу поиска новых поведений.

Для выбора мутаций алгоритм семплирования Томпсона был модифицирован с учетом описанных зависимостей числа поведений от числа исполнений следующим образом:

$$\alpha = v_t(m) \cdot e_t(m)$$

$$\beta = \log(v_t^r(m) \cdot e_t^r(m))$$

Здесь  $v_t(m)$  – количество уникальных корректных поведений тестируемой программы,  $v_t^r(m)$  – количество вызовов, повторяющих известные корректные поведения,  $e_t(m)$  – количество уникальных ошибок и  $e_t^r(m)$  – количество воспроизведений известных ошибок мутацией  $m$  на момент времени  $t$ .

## 5.4 Итоговое решение

Итоговый алгоритм объединяет описанные выше методы и стремится одновременно сократить количество воспроизведений ошибок и максимизировать количество обнаруженных поведений:

$$p_t(m) = \sqrt{\frac{e_t(m)}{M \vee t}} (\varepsilon\_greedy_t(m) + B(\alpha, \log \beta))$$

Коэффициент  $\sqrt{\frac{e_t(m)}{M \vee t}}$  отвечает за скачкообразное изменение свойств среды. Он используется в алгоритме AdSwitch, который решает нестационарную задачу о многоруком бандите, детектируя «точки изменения» среды [27]. В качестве таких точек в данном случае выступают ошибки ( $e_t(m)$  – количество уникальных ошибок, обнаруженных мутацией  $m$  на момент времени  $t$ ,  $M \vee$  – количество самих мутаций).

Таким образом, алгоритм принимает следующий вид (рис. 6): после каждого запуска тестируемой программы помимо обновления популяции, обновляется и вероятность выбора примененной мутации. Такой подход позволяет не только культивировать удачные входные данные по мере работы, но и накапливать информацию о более перспективных мутациях, адаптируясь к возможным скачкообразным изменениям их результативности.

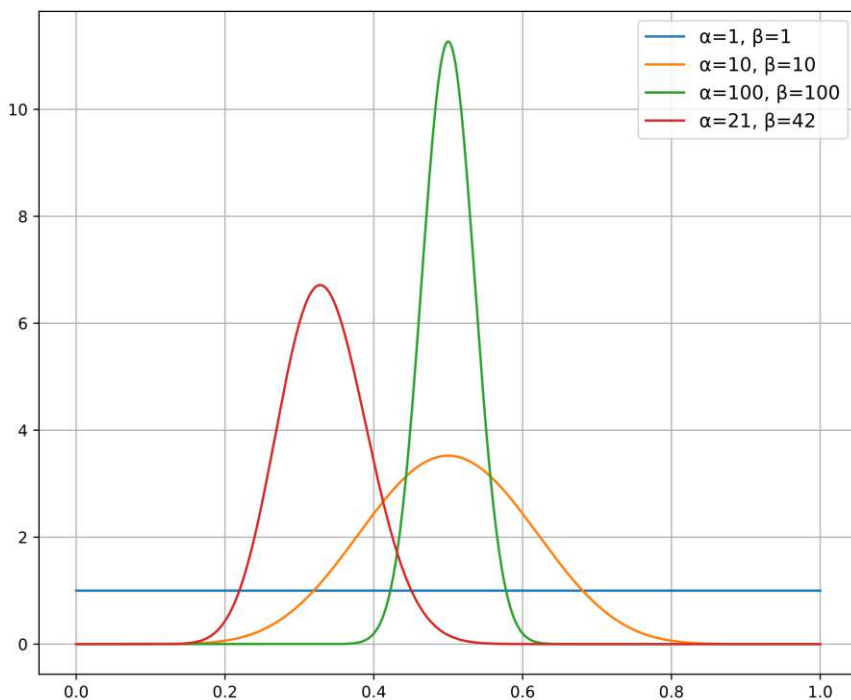


Рис. 5. Плотность вероятности бета-распределения при разных значениях параметров.  
Fig. 5. Probability density function of beta distribution for different parameter values.

## 6. Апробация результатов

### 6.1 Задача оценки алгоритмов фаззинга

Оценка алгоритмов фаззинга — комплексная задача, которой посвящено множество исследований [28-30].

Прежде всего, важно учесть разнообразие программ, к которым должен быть применим алгоритм. Привлекательной идеей кажется использование для тестирования синтетических программ. Однако, тестирование синтетических программ как способ оценки эффективности алгоритмов фаззинга показало низкую эффективность по сравнению с использованием реальных программ [31].

Следующим важным фактором является продолжительность работы. При прочих равных, предпочтительным считается тот алгоритм, который быстрее достигает высоких значений целевых метрик. Однако, однозначно оценить эту «скорость» невозможно — алгоритмы могут демонстрировать различные результаты в зависимости от отведенных временных

промежуток. Например, AFL разбивает процесс тестирования на несколько последовательных этапов, каждый из которых решает разные задачи.

```
MU_PLUS_ONE_ADAPTIVE_MUTATIONS_FUZZING(mutations,  $\mu$ ,  $t_{\text{limit}}$ ):
1  popultion  $\leftarrow$  init_population( $\mu$ )
2  for mutation in mutations :
3      new_traces[mutation]  $\leftarrow$  0
4      known_traces[mutation]  $\leftarrow$  0
5      new_errors[mutation]  $\leftarrow$  0
6      known_errors[mutation]  $\leftarrow$  0
7      rate[mutation]  $\leftarrow$  1
8  while  $t_{\text{elapsed}} < t_{\text{limit}}$  :
9      seed  $\leftarrow$  sample(population)
10     mutation  $\leftarrow$  sample_proportional(mutations, )
11     mutated_seed  $\leftarrow$  mutate(seed, mutation)
12     feedback  $\leftarrow$  execute(mutated_seed)
13     if feedback.trace is new:
14         new_traces[mutation]  $\leftarrow$  new_traces[mutation] + 1
15     else:
16         known_traces[mutation]  $\leftarrow$  known_traces[mutation] + 1
17     if feedback.error is new:
18         new_errors[mutation]  $\leftarrow$  new_errors[mutation] + 1
19     else:
20         known_errors[mutation]  $\leftarrow$  known_errors[mutation] + 1
21     rate[mutation]  $\leftarrow$  update_mutation_rate(mutation)
22     if fitness > population.worst.fitness:
23         if population.size =  $\mu$ :
24             population.remove_worst_seed()
25         population.add(seed, fitness)
```

Рис. 6. Модифицированный алгоритм эволюционного фаззинга ( $\mu+1$ ) с адаптивным выбором мутаций.

Fig. 6. Modified ( $\mu+1$ ) evolutionary fuzzing algorithm with adaptive mutation scheduling.

Одной самодостаточной метрики для оценки качества фаззинга не существует, поэтому при интерпретации результатов необходимо учитывать совокупность нескольких показателей. Самым приоритетным из них считается количество обнаруженных ошибок. Некоторые фаззеры ставят целью обнаружение определенных типов ошибок и уязвимостей.

Еще одним значимым параметром является покрытие кода. Покрытие может быть описано несколькими метриками: покрытием строк, ветвлений, инструкций и т.д. Для оценки эффективности фаззинга рекомендуется использовать хотя бы две из них: покрытие строк и ветвлений. Покрытие строк явно показывает, какая доля кода была выполнена, но не отражает число поведений. Покрытие ветвлений, в свою очередь, лучше отражает число поведений, но не дает информации о том, какая часть кода была задействована. Таким

образом, только комбинация этих метрик позволяет достаточно полно оценить покрытие кода сгенерированными фаззером тестами.

Еще одной сложностью является то, что ввиду стохастической природы фаззинга, результаты тестирования могут значительно различаться от запуска к запуску. В связи с этим, оценивать результативность фаззера можно только на основе многочисленных запусков в одних и тех же условиях.

Сделать предположения о распределении значений описанных метрик не представляется возможным, поэтому для анализа результатов используются непараметрические методы: U-критерий Манна-Уитни и величина эффекта Варга-Делани [32].

Критерий Манна-Уитни – непараметрический ранговый критерий, который предназначен для сравнения двух выборок и проверки нулевой гипотезы – предположения о том, что значения метрик распределены одинаково. Если нулевая гипотеза отвергается с достаточно низким уровнем значимости  $p$  (обычно используется значение 0.05), можно сделать вывод о достоверности результатов эксперимента. Важным достоинством критерия Манна-Уитни является то, что он подходит для сравнения выборок небольшого объема. Факта опровержения нулевой гипотезы недостаточно, чтобы сделать вывод о степени выраженности различий выборок, поэтому также оценивают величину эффекта. Наиболее широко используемой при оценке фаззинга является величина эффекта Варга и Делани [33]:

$$\hat{A}_{12} = \left( \frac{R_1}{n_1} - \frac{n_1 + 1}{2} \right) / n_2$$

где  $R_1$  и  $R_2$  – суммы рангов значений выборок, а  $n_1$  и  $n_2$  – объемы выборок.

Интерпретировать значение размера эффекта можно как вероятность того, что алгоритм 1 покажет большее значение оцениваемой метрики, чем алгоритм 2. Например,  $\hat{A}_{12} = 0.5$  значит, что алгоритмы работают одинаково, а  $\hat{A}_{12} = 0.75$  значит, что первый алгоритм превосходит второй с вероятностью 75%.

## 6.2 Результаты

Реализованный алгоритм был апробирован на широко используемых Java-пакетах разного назначения (табл. 1-2).

На каждом выбранном пакете фаззер был запущен 30 раз с фиксированным числом запусков. Все эксперименты продемонстрировали значение  $p < 0.05$ , благодаря чему в соответствии с тестом Манна-Уитни делается вывод о статистической значимости результатов.

Результаты указывают на то, что предложенный алгоритм увеличивает количество обнаруженных ошибок и уникальных поведений тестируемых программ по сравнению со случайным выбором мутаций, как с точки зрения медианных значений, так и с точки зрения величины эффекта. В ходе экспериментов не было обнаружено ни одной программы, на которой разработанный алгоритм выбора мутаций показал бы худшие результаты, чем случайный выбор.

## 7. Заключение

В работе предложен новый метод планирования семантических мутаций в фаззинге по методу серого ящика, который основан на модели динамической задачи о многоруком бандите и учитывает особенности процесса фаззинга. Предложенный алгоритм продемонстрировал статистически значимое увеличение количества обнаруживаемых поведений и числа найденных ошибок при тестировании широко используемых Java-пакетов различного назначения.

Табл.1. Количество ошибок, найденных ошибок в протестированных пакетах.  
Table 1. Number of errors found in tested packages.

	Медианное число ошибок при случайном выборе мутаций	Медианное число ошибок при адаптивном выборе мутаций	$\hat{A}_{12}$
fastjson2 (~ 1.9 млн. строк кода)	25	31	0.81
commons-math3 (~ 431 тыс. строк кода)	3	3	0.65
closure-compiler (~ 600 тыс. строк кода)	1	2	0.74
jsoup (~ 49 тыс. строк кода)	6	7	0.86
Guava (~ 1 млн. строк кода)	17	22	0.74

Табл.2. Количество воспроизведенных поведений (трасс исполнения) протестированных пакетов.  
Table 2. Number of behaviors (execution traces) detected in tested packages.

	Медианное число поведений при случайном выборе мутаций	Медианное число поведений при адаптивном выборе мутаций	$\hat{A}_{12}$
fastjson2 (~ 1.9 млн. строк кода)	~ 19 тыс.	~ 29 тыс.	0.81
commons-math3 (~ 431 тыс. строк кода)	~ 181 тыс.	~ 185 тыс.	0.65
closure-compiler (~ 600 тыс. строк кода)	~ 13 тыс.	~ 18 тыс.	0.74
jsoup (~ 49 тыс. строк кода)	~ 44 тыс.	~ 45 тыс.	0.86
Guava (~ 1 млн. строк кода)	80	95	0.74

Разработанный подход легко может быть интегрирован в существующие инструменты фаззинга благодаря тому, что он не зависит от других систем фаззинга, а также не требует значительных вычислительных ресурсов и какого-либо предобучения.

В качестве перспективных направлений развития данного подхода можно выделить:

- Комбинирование с алгоритмами выбора значений. Существует множество алгоритмов выбора входных значений, комбинация которых с алгоритмом выбора мутаций с учетом описанных в данной работе наблюдений о характере процесса фаззинга может повысить результативность фаззинга.

- Позиционирование мутаций: упомянутый выше метод тепловых карт показывает высокую эффективность в фаззинге бинарных данных, но не подходит в явном виде для структурного фаззинга. Адаптированный для структурного фаззинга метод тепловых карт позволит распознавать перспективные точки приложения мутаций и направлять процесс фаззинга более эффективно.
- Выбор мутационных стратегий в соответствии со структурой тестируемого кода. Наблюдения показывают, что эффективные мутационные стратегии различны в зависимости от тестируемых программ, однако на текущий момент нет исследований о том, с чем связано это различие. Исследование зависимости эффективности стратегий фаззинга от структуры тестируемых программ может пролить свет на эту проблему и позволить существенно повысить результативность инструментов фаззера с помощью их гибкой настройки.

## Список литературы / References

- [1]. M. Eberlein, Y. Noller, T. Vogel, and L. Grunske, «Evolutionary Grammar-Based Fuzzing», ArXiv, 2020. Accessed: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:220961614>.
- [2]. R. Dutra, R. Gopinath, and A. Zeller, «FormatFuzzer: Effective Fuzzing of Binary File Formats», CoRR, 2021. Accessed: <https://arxiv.org/abs/2109.11277>.
- [3]. X. Zhang et al., «A Survey of Protocol Fuzzing», ACM Comput. Surv., v. 57, No. 2, Oct. 2024, doi:10.1145/3696788.
- [4]. H. Han, D. Oh, and S. K. Cha, «CodeAlchemist: Semantics-Aware Code Generation to Find Vulnerabilities in JavaScript Engines», Proceedings 2019 Network and Distributed System Security Symposium, 2019. Accessed: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:142503428>.
- [5]. V. J. Manès et al., «The Art, Science, and Engineering of Fuzzing: A Survey», IEEE Transactions on Software Engineering, v. 47, No. 11, pp. 2312–2331, 2021, doi: 10.1109/TSE.2019.2946563.
- [6]. M. Eberlein, Y. Noller, T. Vogel, and L. Grunske, «Evolutionary Grammar-Based Fuzzing». 2020 г.
- [7]. Н. Ерохина, «Метод мутации сложноструктурированных входных данных при фаззинг-тестировании JavaScript интерпретаторов», Труды Института системного программирования РАН, т. 35, вып. 5, сс. 55–66, 2024, doi: 10.15514/ISPRAS-2022-35(5)-4.
- [8]. A. Slowik, and H. Kwasnicka, «Evolutionary algorithms and their applications to engineering problems», Neural Computing and Applications, v. 32, No. 16, pp. 12363–12379, Mar. 2020, doi: 10.1007/s00521-020-04832-8.
- [9]. C. Lyu et al., «MOPT: Optimized Mutation Scheduling for Fuzzers», в 28th USENIX Security Symposium (USENIX Security 19), Santa Clara, CA: USENIX Association, Aug. 2019, pp. 1949–1966. Accessed: <https://www.usenix.org/conference/usenixsecurity19/presentation/lyu>.
- [10]. T. D. Nguyen, L. H. Pham, and J. Sun, «Fuzzing with Quantitative and Adaptive Hot-Bytes Identification». Доступно на: <https://arxiv.org/abs/2307.02289>.
- [11]. L. Binosi, L. Rullo, M. Polino, M. Carminati, and S. Zanero, «Rainfuzz: Reinforcement-Learning Driven Heat-Maps for Boosting Coverage-Guided Fuzzing», в International Conference on Pattern Recognition Applications and Methods, 2023. Доступно на: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:257361890>.
- [12]. C. Chen, V. Gohil, R. Kande, A.-R. Sadeghi, and J. Rajendran, «PSOFuzz: Fuzzing Processors with Particle Swarm Optimization». Accessed: <https://arxiv.org/abs/2307.14480>.
- [13]. P. Jauernig, D. Jakobović, S. Picsek, E. Stapf, and A. Sadeghi, «DARWIN: Survival of the Fittest Fuzzing Mutators», Jan. 2023, doi: 10.14722/ndss.2023.23159.
- [14]. K. Böttinger, P. Godefroid, and R. Singh, «Deep Reinforcement Fuzzing», CoRR, 2018. Accessed: <http://arxiv.org/abs/1801.04589>.
- [15]. D. She, R. Krishna, L. Yan, S. Jana, and B. Ray, «MTFuzz: fuzzing with a multi-task neural network», в Proceedings of the 28th ACM Joint Meeting on European Software Engineering Conference and Symposium on the Foundations of Software Engineering, в ESEC/FSE '20. ACM, Nov. 2020. doi: 10.1145/3368089.3409723.

- [16]. K. Gong, W. Yang, B. Cui, and C. Chen, «DRLFCuzzer: fuzzing with Deep-Reinforcement-Learning under Format Constraints», in 2022 2nd International Conference on Electronic Information Engineering and Computer Technology (EIECT), Oct. 2022, pp. 374–380. doi: 10.1109/EIECT58010.2022.00080.
- [17]. S. Li et al., «Deep Learning for Coverage-Guided Fuzzing: How Far are We?», IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, pp. 1–13, 2022, doi: 10.1109/TDSC.2022.3200525.
- [18]. A. Slivkins, «Introduction to Multi-Armed Bandits», CoRR, 2019. Accessed: <http://arxiv.org/abs/1904.07272>.
- [19]. V. Gohil, R. Kande, C. Chen, A.-R. Sadeghi, and J. Rajendran, «MABFuzz: Multi-Armed Bandit Algorithms for Fuzzing Processors». 2023.
- [20]. T. Yue et al., «EcoFuzz: Adaptive Energy-Saving Greybox Fuzzing as a Variant of the Adversarial Multi-Armed Bandit», в 29th USENIX Security Symposium (USENIX Security 20), USENIX Association, Aug. 2020, pp. 2307-2324. Accessed: <https://www.usenix.org/conference/usenixsecurity20/presentation/yue>.
- [21]. Z. Huang, X. Song, Y. Luo, J. Yang, and B. Cui, «Syzballer: Kernel Fuzzing Based on Basic Block Weight and Multi-armed Bandit», in 2022 IEEE 8th International Conference on Computer and Communications (ICCC), Dec. 2022, pp. 2364–2369. doi: 10.1109/ICCC56324.2022.10065711.
- [22]. G. Zhang et al., «MobFuzz: Adaptive Multi-objective Optimization in Gray-box Fuzzing», в Proceedings 2022 Network and Distributed System Security Symposium, в NDSS 2022. Internet Society, 2022. doi: 10.14722/ndss.2022.24314.
- [23]. M. Lee, S. Cha, и H. Oh, «Learning Seed-Adaptive Mutation Strategies for Greybox Fuzzing», в 2023 IEEE/ACM 45th International Conference on Software Engineering (ICSE), 2023, pp. 384–396. doi: 10.1109/ICSE48619.2023.00043.
- [24]. M. Böhme, and B. Falk, «Fuzzing: on the exponential cost of vulnerability discovery», 2020, pp. 713–724. doi:10.1145/3368089.3409729.
- [25]. S. Karamcheti, G. Mann, and D. S. Rosenberg, «Adaptive Grey-Box Fuzz-Testing with Thompson Sampling», CoRR, 2018. Accessed: <http://arxiv.org/abs/1808.08256>.
- [26]. N. Gupta, O.-C. Granmo, и A. Agrawala, «Thompson Sampling for Dynamic Multi-armed Bandits», Machine Learning and Applications, Fourth International Conference on, v. 1, pp. 484–489, 2011, doi: 10.1109/ICMLA.2011.144.
- [27]. P. Auer et al., «Achieving Optimal Dynamic Regret for Non-stationary Bandits without Prior Information», в Proceedings of the Thirty-Second Conference on Learning Theory, A. Beygelzimer and D. Hsu, Ed., in Proceedings of Machine Learning Research, vol. 99. PMLR, 2019, pp. 159–163. Accessed <https://proceedings.mlr.press/v99/auer19b.html>.
- [28]. M. Eceiza, J. L. Flores, and M. Iturbe, «Improving fuzzing assessment methods through the analysis of metrics and experimental conditions», Computers & Security, v. 124, p. 102946, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cose.2022.102946>.
- [29]. Y. Li et al., «UNIFUZZ: A Holistic and Pragmatic Metrics-Driven Platform for Evaluating Fuzzers», в 30th USENIX Security Symposium (USENIX Security 21), USENIX Association, Aug. 2021, pp. 2777–2794. Доступно на: <https://www.usenix.org/conference/usenixsecurity21/presentation/li-yuwe>.
- [30]. D. Paaßen, S. Surminski, M. Rodler, and L. Davi, «My Fuzzer Beats Them All! Developing a Framework for Fair Evaluation and Comparison of Fuzzers», CoRR, 2021. Accessed: <https://arxiv.org/abs/2108.07076>.
- [31]. J. Bundt, A. Fasano, B. Dolan-Gavitt, W. Robertson, and T. Leek, «Evaluating Synthetic Bugs», в Proceedings of the 2021 ACM Asia Conference on Computer and Communications Security, в ASIA CCS '21. Virtual Event, Hong Kong: Association for Computing Machinery, 2021, pp. 716–730. doi: 10.1145/3433210.3453096.
- [32]. Arcuri and L. Briand, «A Hitchhiker's guide to statistical tests for assessing randomized algorithms in software engineering», Software Testing, Verification and Reliability, v. 24, No. 3, pp. 219–250, 2014, doi: <https://doi.org/10.1002/stvr.1486>.
- [33]. A. Vargha and H. Delaney, «A Critique and Improvement of the "CL" Common Language Effect Size Statistics of McGraw and Wong», Journal of Educational and Behavioral Statistics – J EDUC BEHAV STAT, v. 25, No. 2, pp. 101-132, 2000, doi: 10.2307/1165329.

## **Информация об авторах / Information about authors**

Григорий Романович РАЙКИН – аспирант института компьютерных наук ИТМО. Сфера научных интересов: статический и динамический анализ программ, фаззинг, формальная спецификация программ.

Grigoriy Romanovich RAYKIN – postgraduate student at the ITMO Institute of Computer Science. Research interests: static and dynamic software analysis, fuzzing, formal software specification.

Максим Сергеевич ПЕЛЕВИН – магистр факультета компьютерных технологий и информатики СПбГЭТУ "ЛЭТИ". Сфера научных интересов: динамический и статический анализ программ, фаззинг.

Maksim Sergeevich PELEVIN – master of the Faculty of Computer Science and Technology at ETU "LETI". Research interests: dynamic and static software analysis, fuzzing.

Владимир Михайлович ИЦЫКСОН – кандидат технических наук, доцент института прикладных компьютерных наук ИТМО. Сфера научных интересов: статический и динамический анализ программ, верификация программного обеспечения, методы обнаружения дефектов в исходном коде, методы автоматизации тестирования программ.

Vladimir Mikhailovich ITSYKSON – Cand. Sci. (Tech.), associate professor of the Institute of Applied Computer Science ITMO. Research interests: static and dynamic software analysis, software verification, methods for detecting defects in source code, methods for automating software testing.





# Усовершенствованный поиск архитектур в автоматическом решении задач графового машинного обучения: расширение и динамическая приоритизация пространства поиска для повышения эффективности

<sup>1, 2</sup> Ф.М. Балабанов, ORCID: 0009-0005-7510-7659 <fedor.balabanov@list.ru>

<sup>1, 3, 4</sup> К.С. Лукьянов, ORCID: 0009-0009-5235-2175 <lukyanov.k@ispras.ru>

<sup>1</sup> Институт системного программирования им. В.П. Иванникова РАН,  
Россия, 109004, г. Москва, ул. А. Солженицына, д. 25.

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1.

<sup>3</sup> Московский физико-технический институт (национальный исследовательский  
университет), Россия 117303, Москва, ул. Керченская, д.1 А, корп. 1.

<sup>4</sup> Исследовательский центр доверенного искусственного интеллекта ИСП РАН,  
Россия, 109004, г. Москва, ул. А. Солженицына, д. 25.

**Аннотация.** В данной работе исследуются методы улучшения процесса автоматизированного поиска архитектур для графовых нейронных сетей (ГНС). Мы предлагаем новый подход, основанный на адаптивном изменении пространства поиска посредством выделения приоритетных направлений, что позволяет повысить эффективность поиска архитектур. Еще один предлагаемый подход расширяет пространство поиска, разрешая комбинировать различные типы графовых сверточных слоев. Основное внимание уделяется максимизации точности архитектур в расширенном пространстве поиска при фиксированном бюджете поиска по количеству моделей. Наши эксперименты проводятся на наборах данных цитирования, химических молекул и графов покупок. Результаты экспериментов показывают, что предложенный подход позволяет находить более эффективные модели без увеличения вычислительных ресурсов и демонстрирует высокую перспективность для автоматизации решений реальных задачах анализа графовых данных.

**Ключевые слова:** графовая нейронная сеть; поиск архитектур нейросетей; обучение с подкреплением.

**Для цитирования:** Балабанов Ф.М., Лукьянов К.С. Усовершенствованный поиск архитектур в автоматическом решении задач графового машинного обучения: расширение и динамическая приоритизация пространства поиска для повышения эффективности. Труды ИСП РАН, том 37, вып. 2, 2025 г., стр. 115–128. DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(2)-8.

# Improved Search in Graph AutoML: Expansion and Dynamic Prioritization in the Search Space for Enhanced Efficiency

<sup>1,2</sup> F.M. Balabanov, ORCID: 0009-0005-7510-7659 <fedor.balabanov@list.ru>

<sup>1,3,4</sup> K.S. Lukyanov, ORCID: 0009-0009-5235-2175 <lukyanov.k@ispras.ru>

<sup>1</sup> *Ivannikov Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences,  
25, A. Solzhenitsyn st., Moscow, 109004, Russia.*

<sup>2</sup> *Lomonosov Moscow State University,*

*1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia.*

<sup>3</sup> *Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University),  
building 1, 1 A, Kerzhenskaya st., Moscow, 117303, Russia.*

<sup>4</sup> *Research Center for Trusted Artificial Intelligence ISP RAS,  
25, A. Solzhenitsyn st., Moscow, 109004, Russia.*

**Abstract.** This paper explores methods for enhancing the automated architecture search process for graph neural networks. We propose a novel approach that dynamically selects a priority direction within the search space, improving the efficiency and quality of the discovered architectures. Another proposed approach expands the search space by allowing combinations of different types of graph convolutional layers. The primary focus is on maximizing the quality of architectures within the expanded search space while maintaining a fixed search budget in terms of the number of models. Our experiments are conducted on datasets from citation networks, chemical molecules, and shopping graph domains. The experimental results show that the proposed approach enables the discovery of more effective and higher-quality models without increasing computational resources, demonstrating high potential for automating solutions to real-world graph data analysis tasks.

**Keywords:** graph neural network; AutoML; neural architecture search; reinforcement learning.

**For citation:** Balabanov F.M., Lukyanov K.S. Improved search in graph AutoML: expansion and dynamic prioritization in the search space for enhanced efficiency. *Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS*, vol. 37, issue 2, 2025, pp. 115-128 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(2)-8.

## 1. Введение

Графовые нейронные сети (ГНС) – это мощный и активно развивающийся класс моделей машинного обучения, который напрямую работает с графовыми структурами данных. Графы как структура данных обладают уникальными свойствами, такими как наличие вершин и рёбер, что позволяет моделировать сложные взаимосвязи между объектами. Применение графов встречается в самых разных областях, включая анализ социальных сетей [1-2], моделирование взаимодействий молекул в химии [3-4], а также в задачах, связанных с анализом научных данных, например, на основе графов цитирования научных статей [5-6]. Эти задачи требуют извлечения глубоких и комплексных закономерностей из данных, что делает графовые нейронные сети важным инструментом для решения широкого спектра задач, где традиционные методы машинного обучения могут быть менее эффективными.

Однако разработка графовых нейронных сетей является нетривиальной задачей, требующей глубокого понимания как специфики графов, так и принципов построения нейронных сетей. Подбор архитектуры нейронной сети, а также оптимизация гиперпараметров являются ключевыми аспектами, которые напрямую влияют на качество модели. Этот процесс требует значительных временных и вычислительных ресурсов, а также высокого уровня экспертизы в области машинного обучения. В связи с этим, автоматизация процесса проектирования нейронных сетей с использованием методов автоматического поиска моделей машинного обучения AutoML (Automated Machine Learning) становится всё более актуальной.

Алгоритмы AutoML [7] предлагают решение этой проблемы, позволяя автоматизировать подбор архитектуры моделей и их гиперпараметров. Использование AutoML значительно снижает порог входа для специалистов из различных областей, предоставляя инструменты

для автоматического проектирования моделей, что особенно полезно в контексте графовых данных. Одним из главных направлений AutoML является поиск архитектур нейросетей (Neural Architecture Search, NAS), что позволяет находить оптимальные архитектуры моделей на основе данных без необходимости ручного подбора и экспериментов. NAS методы часто используют подходы обучения с подкреплением для поиска архитектур, что позволяет моделям "изучать" пространство возможных архитектур на основе сигналов обратной связи, получаемых от качеств обучаемых моделей.

Тем не менее, несмотря на значительные успехи в области NAS, существует несколько серьёзных проблем, связанных с применением этих методов применительно к графовым данным. Во-первых, пространство возможных архитектур для графовых нейронных сетей значительно шире и сложнее, чем для обычных нейронных сетей, что усложняет задачу поиска. Во-вторых, высокая вычислительная стоимость оценки производительности каждой архитектуры делает процесс поиска чрезвычайно затратным по времени и ресурсам. В результате, ускорение процесса NAS для графовых нейронных сетей является актуальной и важной научной задачей.

Целью данной работы является исследование способов ускорения процесса автоматического поиска архитектур графовых нейронных сетей при расширении пространства поиска. Мы предлагаем новый подход выделения приоритетного направления поиска, путем приоритизации свёрточных слоёв, которые себя хорошо зарекомендовали. Исследуется влияние использования различных свёрточных методов в одной архитектуре при поиске архитектур с использованием обучения с подкреплением.

В разделе 2 рассматриваются существующие методы AutoML для графовых нейронных сетей, проводится их анализ и сравнение. В разделах 3 и 4 описываются предложенные методы ускорения поиска архитектур, а также приводятся результаты экспериментов и их анализ. Наконец, в разделе 5 подводятся итоги работы и делаются выводы относительно эффективности предложенных подходов.

Наш вклад можно представить следующим образом:

- 1) Мы предлагаем новый подход расширения пространства поиска за счёт комбинирования различных типов сверток на разных слоях модели;
- 2) Мы предлагаем новый подход выделения приоритетного направления, которое может быть зафиксировано или динамически определяться по ходу работы алгоритма AutoML;
- 3) Мы показываем эффективность и ограничения применения предложенных подходов на трех доменах и для двух различных постановок задач.

## 2. Обзор

AutoML изучает методы автоматизированного поиска архитектур моделей машинного обучения, в том числе нейронных сетей [7]. Кроме задачи поиска архитектуры, перед методами AutoML может стоять задача подбора гиперпараметров, задачи предобработки и постобработки данных. Самой сложной задачей для AutoML является случай, когда необходимо управлять всем путем решения задачи: от пред обработки данных, до оптимизации гиперпараметров.

Основными проблемами при разработке методов автоматического поиска архитектур являются:

- 1) Выбор пространства поиска архитектур и способ его представления. Исследователям приходится искать компромисс между размером пространства поиска и его репрезентативностью.
- 2) Выбор способа подбора архитектур. Можно выделить два класса методов: не использующие в своей основе машинное обучение и использующие его.

От выбора этих двух составляющих будет зависеть скорость подбора достаточно точной архитектуры, и то насколько точной в сравнении со всеми возможными архитектурами она будет.

AutoML в первую очередь предназначен для неспециалистов в области машинного обучения. Он предлагает методы, которые могут гарантировать, что за выделенное время будет найдена модель, которая будет достаточно хорошо решать поставленную задачу. Например, AutoML применяется в медицинских задачах [8]. Это позволяет ученым в области медицины не погружаться глубоко в принципы создания и проектирования нейронных сетей, но при этом применять в своих исследованиях методы машинного обучения.

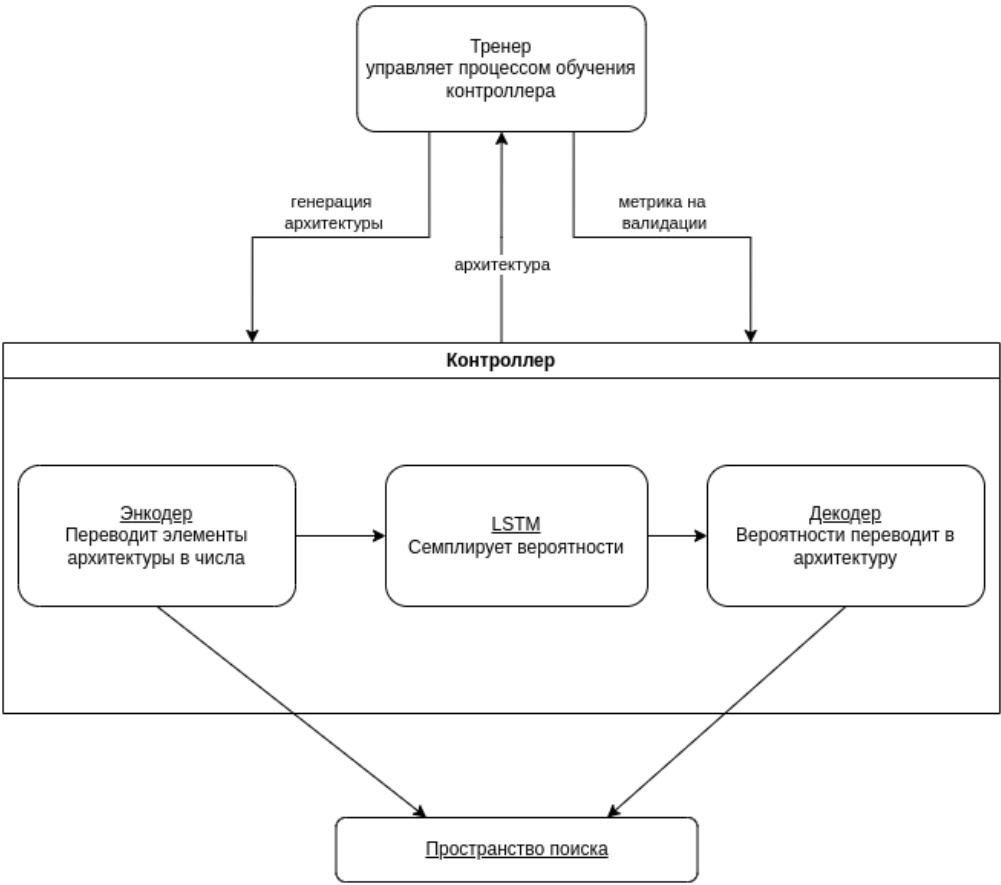


Рис. 1. Архитектура методов NAS, использующих подход обучения с подкреплением.  
Fig. 1. Architecture of NAS methods that use a reinforcement learning approach.

Один из подходов к решению задачи NAS использует обучение с подкреплением нейронной сети, генерирующей архитектуры. Изначально такие методы использовались для генерации архитектур свёрточных и рекуррентных нейронных сетей [9], но в последствии нашли себе применение и в других областях. Рассмотрим общую концепцию работы всех методов автоматического поиска архитектур нейронных сетей, использующих обучение с подкреплением (рис. 1).

Имеются три главные составляющие:

- 1) Пространство поиска отвечает за множество возможных вариантов архитектур, которые могут генерироваться контроллером. Выбор пространства поиска важная задача при поиске архитектур нейронных сетей.
- 2) Тренер отвечает за управление процессом обучения контроллера. Он путем прямого прохода по контроллеру получает архитектуру нейронной сети, измеряет для неё метрику на валидационной выборке и отдает эту метрику обратно контроллеру для обратного прохода.
- 3) Контроллер нейронной сети состоит из трёх основных частей. Энкодер контроллера отвечает за перевод элементов пространства поиска (возможные свёрточные слои, количество эпох обучения, типы пулинга и т.д.) в числа. Энкодер передает математическое представление пространства поиска рекуррентной нейронной сети (РНС), представленной одним слоем LSTM (Long Short-Term Memory — архитектура нейронной сети долгой краткосрочной памяти) [10]. РНС генерирует список вероятностей для элементов пространства поиска, в соответствии с которыми нужно их выбирать для составления искомой архитектуры нейронной сети. Декодер переводит, полученные от РНС вероятности, в итоговую архитектуру.

В терминах обучения с подкреплением агентом в данном случае является контроллер, окружающей средой – тренер, а наградой – точность архитектуры на валидационной выборке. Классические свёрточные нейронные сети, работающие с матричными данными, используют один свёрточный метод, в котором варьируется вид ядра и функция агрегирования (рис. 2).

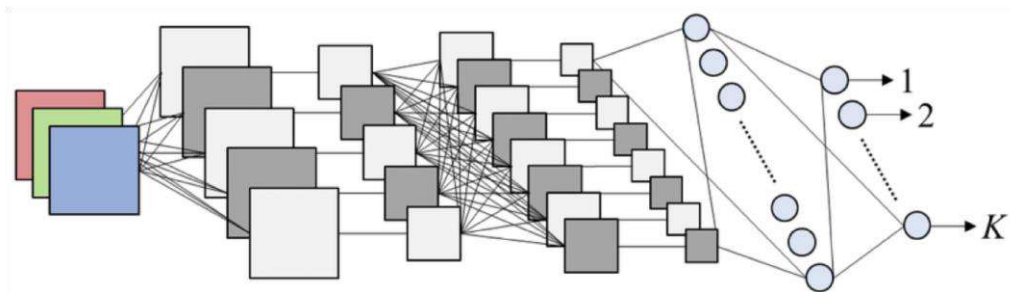


Рис. 2. Принцип работы классических свёрточных нейронных сетей.  
Fig. 2. The principle of operation of classical convolutional neural networks.

В то же время, для графовых нейронных сетей (рис. 3) было предложено более 50 различных типов свёрточных слоёв, принципиально отличающихся по принципу своей работы. К тому же каждый свёрточный метод имеет собственный набор гиперпараметров, которые нужно подбирать отдельно для каждой задачи. Указанные отличия в значительной мере увеличивают пространство поиска архитектур ГНС.

GraphNAS [12] является методом NAS, использующим обучение с подкреплением для графовых нейронных сетей. Сложности, которые возникают для метода GraphNAS и которых нет в аналогичных методах при работе с другими типами данных, такие:

- 1) Графовые данные имеют структуру, которая требует принципиально иного подхода к решению задач;
- 2) Большое пространство архитектур ГНС.

В качестве награды в обучении с подкреплением GraphNAS использует точность на валидационной выборке. Все архитектуры исследователи представили в обобщенном виде, где каждый слой нейронной сети состоит из следующих функций:

- 1) функция преобразования внутреннего представления признаков;

- 2) функция семплирования;
- 3) функция измерения корреляции вершины с её соседями;
- 4) функция агрегирования информации в вершине от её соседей;
- 5) функции, добавляющие к внутреннему представлению информацию с предыдущих слоёв;
- 6) функции внимания, учитывающие размер соседей.

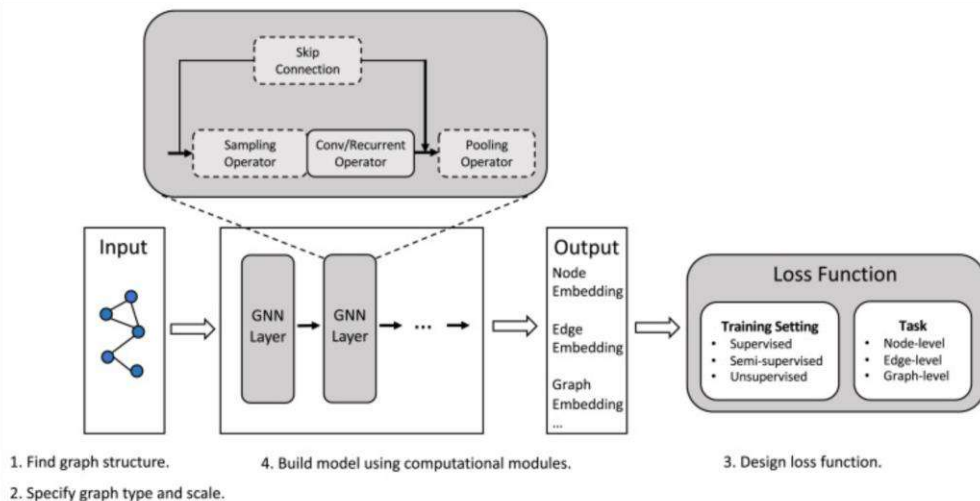


Рис. 3. Архитектура графовых нейросетей из обзорной статьи [11].  
Fig. 3. Architecture of graph neural networks from the review article [11].

Авторы статьи [13], разработавшие платформу graphgym, в своей работе нацелены на поиск способа обобщенно подходить к задачам ГНС. Они ввели и рассмотрели общее пространство проектирования ГНС; спроектировали пространство задач на графовых данных с метрикой подобия, позволяющее быстро подбирать архитектуру; разработали эффективный метод оценки пространства поиска. Результатом их работы стал набор рекомендаций по проектированию ГНС, способ переноса лучших архитектур, между похожими задачами. Корреляция между задачами вычислялась путем применения фиксированного набора архитектур к двум задачам и последующего измерения корреляции ранга Кендалла качества этих архитектур. Для поиска архитектур используется контролируемый случайный поиск.

Метод SNAG [14] улучшил методы GraphNAS и Auto-GNN добавив несколько методов ГНС, слои агрегации и уменьшив количество настраиваемых гиперпараметров. Благодаря уменьшению пространства поиска и другому его выбору, авторам удалось достичь лучших результатов.

Авторы метода SANE [15] спроектировали собственное пространство поиска архитектур ГНС, при этом они не оптимизируют гиперпараметры, потому что в ГНС структура имеет большее значение. Это позволило сделать пространство репрезентативным и не слишком большим. Особенностью данной работы является то, что используется дифференцируемая функция награды. Этот метод показал высокое качество работы.

Метод ALGNN [16] нацелен на ускорение процесса подбора модели, с помощью проектирования быстро-обучающихся ГНС. Для поиска архитектур применяют популяционный алгоритм.

Различные методы AutoML для графовых нейронных сетей отличаются выбором пространства поиска: какие обобщённые слои рассматриваются, оптимизируются ли

гиперпараметры – выбором стратегии поиска: случайный поиск, обучение с подкреплением контроллера, генетические алгоритмы, популяционные алгоритмы, дифференцируемые алгоритмы - выбор способа оценки архитектур.

В дальнейшем мы остановимся на ускорении метода GraphNAS, потому что он является базовым для многих других методов AutoML и результаты, полученные на нём, при необходимости, можно будет адаптировать под другие методы.

### 3. Конфигурация экспериментов

В данном разделе будут зафиксированы и уточнены пространство поиска архитектур ГНС, метрики, применяемые для сравнения методов, и методика проведения экспериментов.

#### 3.1 Реализация системы

Уточним реализацию NAS контроллера и тренера. Как было указано в обзоре, контроллер состоит из энкодера, декодера и одного слоя LSTM. Размерность входа и выхода слоя LSTM равна 100 для всех экспериментов. Для его обучения используется алгоритм оптимизации Adam из библиотеки pytorch с гиперпараметрами по умолчанию.

В качестве награды в процессе обучения с подкреплением тренер использует точность на валидационной выборке для сгенерированной архитектуры. Обратный проход по контроллеру тренер запускает следующим образом:

$$b = b \cdot 0.95 + r \cdot 0.05$$
$$l = - \sum_i \text{logit } s_i \cdot (r - \text{scale}(b, 0.5))$$

где  $r$  – значение награды для сгенерированной архитектуры,

$b$  – обновляемое на каждой итерации обучения контроллера значение,

$\text{logits}$  – выход логистического преобразования вероятностей, которые генерирует контроллер,

$\text{scale}(x, y)$  – функция, переводящая  $x$  в отрезок  $[-y, y]$ , где максимум и минимум соответствуют максимальному и минимальному значению награды для последних 10 сгенерированных архитектур.

#### 3.2 Пространство поиска

Пространство поиска выбрано следующим:

- 1) Методы ГНС: GCN [19], SAGE [20], GAT [21], TAG [22], GIN [23], SG [24], SSG [25], GMM [26]. Были выбраны представленные методы, потому что они являются широко-используемыми и представлены в библиотеке pytorch [17].
- 2) Количество эпох обучения для задач классификации графов - 100 - 220 с шагом 20. Количество эпох обучения для задач классификации вершин - 3000 - 8000 с шагом 500. Варианты количества эпох обучения были выбраны в соответствии с проведенными первичными тестами. В этих пределах ГНС для соответствующих задач дают стабильный результат и выходят на свою максимальную точность.
- 3) Методы пулинга для задач классификации графов: add, mean, max. Эти методы популярные и широко-используемые.

Другие гиперпараметры были фиксированы для всех генерируемых архитектур:

- 1) Алгоритм оптимизации Adam с параметрами по умолчанию из библиотеки pytorch;
- 2) Функция активации между всеми слоями - ReLu, а после последнего слоя - LogSoftmax;

3) Для гиперпараметров свёрточных слоёв использовались значения по умолчанию, заданные в библиотеке `pytorch-geometric` [18]. Для многих задач они являются самыми оптимальными.

Точность ГНС определяется в первую очередь архитектурой и в исследованиях с нашими доменами используют 2-3 графовых свёрточных слоя, поэтому в наших экспериментах архитектуры состоят из двух свёрточных слоёв.

3.3 Коллекции данных

Измерения проводились на коллекциях данных, представленных в табл. 1.

Табл. 1. Параметры коллекций данных. Количество вершин и ребер указано в среднем на граф.

Table 1. Parameters of data collections. The number of vertices and edges is indicated on average per graph.

Данные	Графы	Вершины	Рёбра	Классы	Признаки
Задача классификации вершин на данных о цитировании. Группа данных <b>Planetoid</b> .					
Cora	1	2708	10556	7	1433
CiteSeer	1	3327	9104	6	3703
PubMed	1	19717	88648	3	500
Задача классификации вершин на данных о покупках. Группа данных <b>Amazon</b> .					
Computers	1	13752	491722	10	767
Photo	1	7650	238162	8	745
Задача классификации графов химических молекул. Группа данных <b>TuDataset</b> .					
MUTAG	188	17.9	39.6	2	7
COX2	467	41.22	43.45	2	3
BZR	405	35.75	38.36	2	3

3.4 Метрики

Для сравнения эффективности поиска различных конфигураций, используется метрика показывающая, максимальную точность на валидационной выборке среди архитектур, сгенерированных методом AutoML.

3.5 Методика проведения экспериментов

Полная конфигурация экспериментов задается через `yaml` файл, в котором указывается:

- 1) Коллекция данных, с которой проводится эксперимент;
- 2) Изменять или нет вероятности выбора целевых методов;
- 3) Использовать различные методы ГНС в одной архитектуре или нет;
- 4) Количество итераций поиска архитектур;

Для коллекций данных проводились эксперименты с различными конфигурациями контроллеров. Метрики во время обучения собирались в логах и затем анализировались. Для каждой конфигурации эксперимента запускалось 600 итераций поиска архитектур.

#### 4. Метод

Для проверки, работают ли целевые методы лучше остальных, была реализована система предоставления этим методам приоритета при подборе типов свёрточных слоёв. Система имеет три варианта поведения.

**Первый вариант (basic)** является реализацией оригинального варианта алгоритма, используемого авторами статьи [12], и для нас он является базовым решением для алгоритмов, не использующих сочетания различных свёрточных методов в одной архитектуре. Он не приоритизирует никакие методы, то есть шансы выбрать каждый из методов ГНС в пространстве поиска равны. Список возможных свёрточных методов, из которых выбирает контроллер, следующий: `gin`, `gcn`, `sg`, `ssg`, `gat`, `gmm`, `tag`, `sage`.

**Второй вариант (fixed)** приоритизации фиксирует увеличение вероятности получения целевых методов при случайном выборе из пространства поиска на весь процесс обучения контроллера NAS. Рассматривалось увеличение вероятности в 4 раза, то есть при случайном выборе свёрточных методов из пространства поиска, целевые методы генерируются из него в 4 раза чаще.

**Третий вариант (dynamic)** динамически изменяет вероятность получения целевых методов при случайном выборе из пространства поиска по время обучения. На заданной итерации обучения контроллера, он перестает увеличивать вероятность получения целевых методов и делает все методы равновероятными. Для генерации архитектуры контроллер использует вероятности, полученные из РНС. Для обучения РНС контроллер использует вероятности после логистического преобразования. На выбранной итерации обучения контроллер начинает обнулять либо только вероятности, либо вероятности и выходы логистического преобразования вероятностей вместе. Поведение контроллера задается конфигурацией эксперимента.

*Два варианта алгоритма работы третьего варианта:*

---

*C* — функция семплирования архитектуры контроллером;

*mainIndexes**dupIndexes* — отвечают за индексы в *SearchSpaceGnn* соответствующие первому вхождению методов в список и повторным вхождениям методов соответственно, где *SearchSpaceGnn* — список возможных вариантов свёрточных методов для данной конфигурации эксперимента.

---

*Вариант, изменяющий только вероятности и не влияющий на обучение (dynamic-probonly):*

```
logits ← C()
logProbs ← LogSoftmax(logits)
softmaxLogits ← Softmax(logits)
for i ∈ dupIndexes do
    softmaxLogitsi = 0
endfor
probs ← Softmax(softmaxLogits)
```

---

Вариант также влияющий и на обучения (*dynamic-both*):

```
logits ← C()
minLogit ← mini{logitsi ∨ i ∈ mainIndexes}
for i ∈ dupIndexes do
    logitsi ← minLogit
endfor
probs ← Softmax(logits)
logProbs ← LogSoftmax(logits)
```

Для проверки стоит ли использовать несколько свёрточных методов в одной архитектуре или нет, через параметры пространства поиска задавалось, какое поведение нужно выбрать: генерировать один метод ГНС, который затем используется на всех свёрточных слоях, или генерировать для каждого слоя метод отдельно.

5. Полученные результаты

В табл. 2 представлены результаты экспериментов. Для каждой коллекции данных показана максимальная точность среди сгенерированных соответствующим алгоритмом AutoML архитектур. На рис. 4 сравнение вариантов алгоритмов с использованием комбинаций свёрточных методов и без них. Для каждой коллекции данных было подсчитано, сколько раз первое место по максимальной точности среди всех методов AutoML занимали методы, использующие комбинации разных свёрточных слоёв в одной архитектуре, а сколько раз не использующие. Затем эти значения были просуммированы по группам наборов данных, а получившиеся данные были отображены на рис. 4. Для построения диаграммы на рис. 5 отдельно анализировались методы, которые не используют комбинации разных свёрточных методов в одной архитектуре ГНС.

Табл. 2. Сравнительная таблица результатов экспериментов по метрике максимального значения точности, среди сгенерированных методом архитектур. Группа Planetoid: Cora, Citeseer, Pubmed. Группа Amazon: Computers, Photo. Группа TuDataset: COX2, MUTAG, BZR.

Table 2. A comparative table of experimental results on the metric of maximum accuracy, among the architectures generated by the method. Planetoid group: Cora, Citeseer, Pubmed. Amazon group: Computers, Photo. TuDataset group: COX2, MUTAG, BZR.

dataset	basic		fixed		dynamic-probsonly		dynamic-both	
	no-combinations	combinations	no-combinations	combinations	no-combinations	combinations	no-combinations	combinations
cora	0,9061	0,8950	0,8840	0,8895	0,9042	0,8987	0,9024	0,8987
citeseer	0,7508	0,7898	0,7898	0,7613	0,7703	0,7733	0,7718	0,7763
pubmed	0,8694	0,8709	0,8659	0,8661	0,8753	0,8666	0,8722	0,8709
computers	0,9128	0,9059	0,9037	0,9000	0,9004	0,9062	0,9135	0,8989
photo	0,9471	0,9562	0,9516	0,9431	0,9516	0,9510	0,9484	0,9542
cox2	0,8936	0,8723	0,8830	0,9043	0,9149	0,8511	0,9043	0,9362
mutag	0,8974	0,9487	0,9231	0,9231	0,9744	0,9231	0,9744	0,9744
bzr	0,8889	0,9136	0,9012	0,9136	0,8889	0,9259	0,8765	0,8889

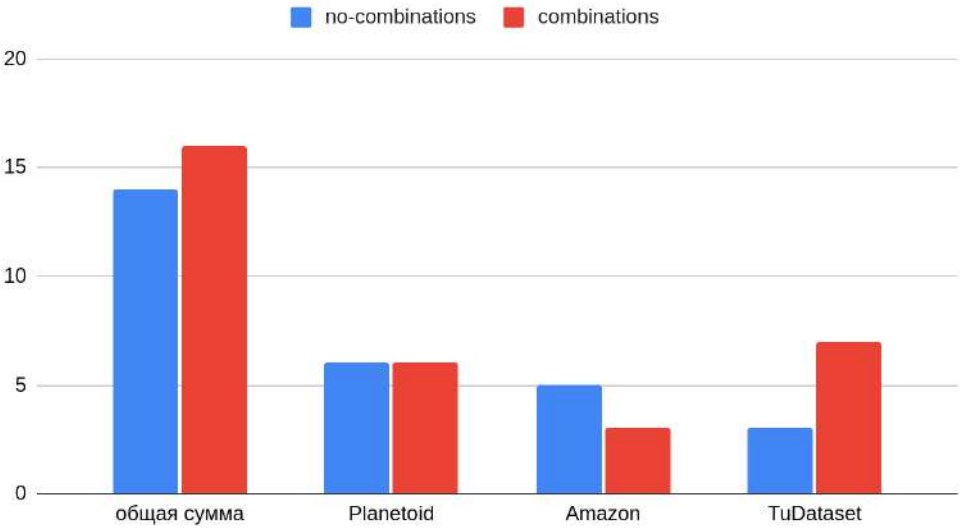


Рис. 4. Каждый столбец – суммарное количество раз, когда алгоритм с комбинациями свёрточных методов (без них), показал результат лучше, чем соответствующий алгоритм без комбинаций (с ними), на каждой из групп наборов данных.

Fig. 4. Each column is the total number of times when the algorithm with combinations of convolutional methods (without combinations) showed a better result than the corresponding algorithm without combinations (with combinations) on each of the dataset groups.

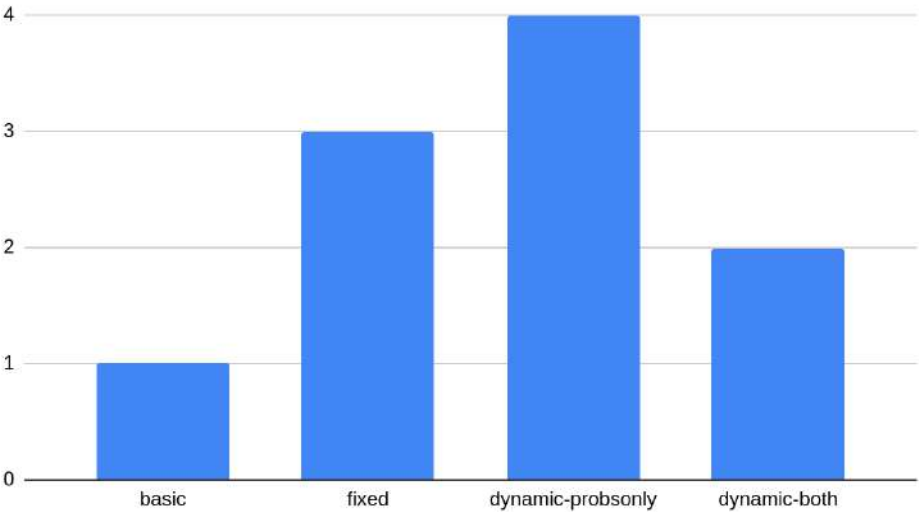


Рис. 5. Сравнение результатов алгоритмов без использования комбинаций свёрточных методов. Значение столбца – количество раз, когда этот метод показал максимальную точность среди других.

Fig. 5. Comparison of results of algorithms without using combinations of convolutional methods. The column value is the number of times this method showed the highest quality among others.

Для каждого метода было посчитано количество коллекций данных, на которых этот метод получил максимальную точность среди других методов, не использовавших комбинации свёрточных методов. Диаграмма на рис. 6 построена аналогично диаграмме на рис. 5, только для методов AutoML, которые использовали комбинации свёрточных слоёв.

Заметим, что для задачи классификации вершин комбинации свёрточных методов в одной архитектуре не улучшили качества, а для задачи классификации графов улучшили. Так же в общем случае динамический вариант алгоритма показывает более эффективные результаты, чем два других.

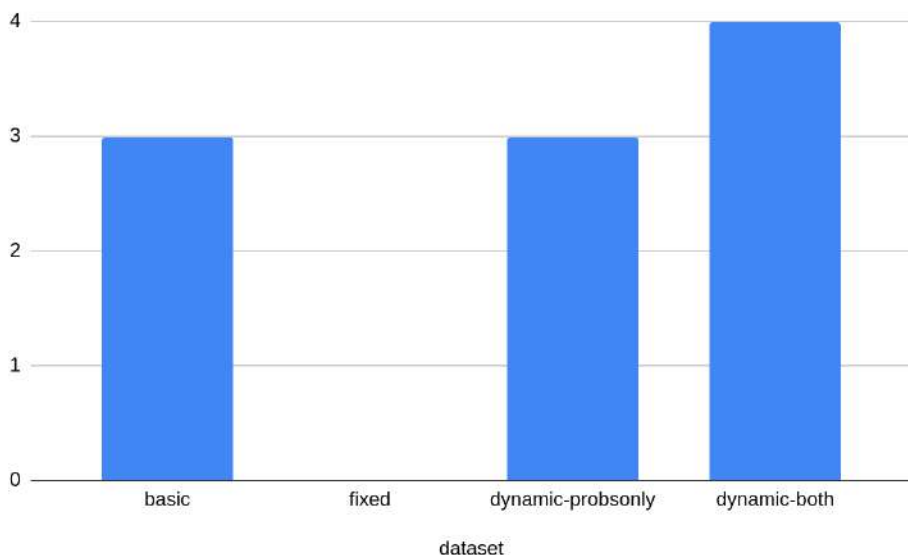


Рис. 6. Сравнение результатов алгоритмов с использованием комбинаций свёрточных методов. Значение столбца - количество раз, когда этот метод показал максимальную точность среди других.

Fig. 6. Comparison of algorithm results using combinations of convolutional methods. The column value is the number of times this method showed the highest quality among others.

## 6. Ограничения

Обратите внимание, что существенное улучшение подход расширения пространства поиска архитектур за счет разрешения комбинировать разные типы графовых свёрточных слоёв даёт только на данных химического домена. Возможным объяснением этого может быть то, что структура химических молекул располагает к разным типам агрегации.

Также стоит отметить, что использовать фиксированный вариант изменения вероятностей в общем случае менее выгодно, чем динамический подход. Однако, если есть некоторые априорные факторы, указывающие на потенциальную эффективность определённых слоёв, но недостаточный, чтобы полностью исключить возможность выбора других слоёв, то этому подходу может иметь смысл отдать предпочтение.

## 7. Заключение и будущая работа

В этой статье был предложен новый подход к расширению пространства поиска за счёт комбинирования разных типов свёрточных слоёв при решении задачи поиска архитектуры относящийся к автоматическому машинному обучению для решения задач классификации

вершин и графов. Также был предложен новый подход выделения приоритетного направления в пространстве поиска архитектур и три варианта реализации: фиксированное выделение направления и два динамических варианта выделения направления. Эффективность и ограничения предложенных подходов были продемонстрированы на данных трех доменов и для двух постановок задач.

В качестве направлений будущей работы можно выделить внедрения предложенных подходов для улучшения существующих SOTA решений задачи поиска архитектуры графовых нейросетей, основанных на RL подходе. Также, вероятно, подходы могут быть улучшены посредством использования более современных техник обучения с подкреплением. Еще одним направлением будущих исследований может быть адаптация предложенных подходов для генетических и байесовских подходов решения задачи поиска архитектуры. А также, исследование влияния структурных факторов на результаты работы предложенных подходов, которые приводят к описанным в работе ограничениям.

## Список литературы / References

- [1]. Xiao Li, Li Sun, Mengjie Ling, Yan Peng A survey of graph neural network based recommendation in social networks. *Neurocomputing*, 2023, 126441, <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2023.126441>.
- [2]. Fan, Wenqi, Ma, Yao, Li, Qing, He, Yuan, Zhao, Eric, Tang, Jiliang, Yin, Dawei Graph Neural Networks for Social Recommendation. 2019, 417–426, 10.1145/3308558.3313488.
- [3]. Park, Jaehong, Shim, Youngseon, Lee, Franklin, Rammohan, Aravind, Goyal, Sushmit, Shim, Munbo, Jeong, Changwook, Kim, Dae Sin Prediction and Interpretation of Polymer Properties Using the Graph Convolutional Network. *ACS Polymers Au*, 2022, 213-222, 10.1021/acspolymersau.1c00050.
- [4]. Pietro Bongini, Monica Bianchini, Franco Scarselli Molecular generative Graph Neural Networks for Drug Discovery. *Neurocomputing*, 2021, 242-252, <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2021.04.039>.
- [5]. Fan Zhou, Xovee Xu, Ce Li, Goce Trajceviski, Ting Zhong, Kunpeng Zhang A Heterogeneous Dynamical Graph Neural Networks Approach to Quantify Scientific Impact. 2020.
- [6]. Cummings, Daniel, Nassar, Marcel Structured Citation Trend Prediction Using Graph Neural Networks. 2020, 3897-3901, 10.1109/ICASSP40776.2020.9054769.
- [7]. Xin He, Kaiyong Zhao, Xiaowen Chu AutoML: A survey of the state-of-the-art. *Knowledge-Based Systems*, 2021, 106622, <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2020.106622>.
- [8]. Rashidi, Hooman H., Tran, Nam, Albahra, Samer, Dang, Luke T. Machine learning in health care and laboratory medicine: General overview of supervised learning and Auto-ML. *International Journal of Laboratory Hematology*, 2021, 15-22, <https://doi.org/10.1111/ijlh.13537>.
- [9]. Zoph, Barret, Le, Quoc Neural Architecture Search with Reinforcement Learning. 2016.
- [10]. Hochreiter, S Long Short-term Memory. *Neural Computation* MIT-Press, 1997.
- [11]. Jie Zhou, Ganqu Cui, Shengding Hu, Zhengyan Zhang, Cheng Yang, Zhiyuan Liu, Lifeng Wang, Changcheng Li, Maosong Sun Graph neural networks: A review of methods and applications. *AI Open*, 2020, 57-81, <https://doi.org/10.1016/j.aiopen.2021.01.001>.
- [12]. Gao, Yang, Yang, Hong, Zhang, Peng, Zhou, Chuan GraphNAS: Graph Neural Architecture Search with Reinforcement Learning. 2019.
- [13]. Jiaxuan You, Rex Ying, Jure Leskovec Design Space for Graph Neural Networks. 2021.
- [14]. Zhao, Huan, Wei, Lanning, Yao, Quanming Simplifying Architecture Search for Graph Neural Network. 2020.
- [15]. Zhao, Huan, Yao, Quanming, Tu, Weiwei Search to aggregate neighborhood for graph neural network. 2021.
- [16]. Cai, Rongshen and Tao, Qian and Tang, Yufei and Shi, Min ALGNN: Auto-Designed Lightweight Graph Neural Network. 2021, 500–512.
- [17]. Pytorch library, <https://pytorch.org>
- [18]. Pytorch Geometric library, <https://pytorch-geometric.readthedocs.io>
- [19]. Thomas N. Kipf, Max Welling Semi-Supervised Classification with Graph Convolutional Networks. 2017.
- [20]. William L. Hamilton, Rex Ying, Jure Leskovec Inductive Representation Learning on Large Graphs. 2018.
- [21]. Petar Veličković, Guillem Cucurull, Arantxa Casanova, Adriana Romero, Pietro Liò, Yoshua Bengio Graph Attention Networks. 2018.
- [22]. Jian Du, Shanghang Zhang, Guanhang Wu, Jose M. F. Moura, Soumya Kar Topology Adaptive Graph Convolutional Networks. 2018.

- [23]. Keyulu Xu, Weihua Hu, Jure Leskovec, Stefanie Jegelka How Powerful are Graph Neural Networks? 2019.
- [24]. Felix Wu, Tianyi Zhang, Amauri Holanda de Souza Jr. au2, Christopher Fifty, Tao Yu, Kilian Q. Weinberger Simplifying Graph Convolutional Networks. 2019.
- [25]. Hao Zhu, Piotr Koniusz Simple Spectral Graph Convolution. 2021.
- [26]. Federico Monti, Davide Boscaini, Jonathan Masci, Emanuele Rodolà, Jan Svoboda, Michael M. Bronstein Geometric deep learning on graphs and manifolds using mixture model CNNs. 2016.

## **Информация об авторах / Information about authors**

Фёдор Михайлович БАЛАБАНОВ – лаборант Института Системного Программирования РАН; студент ВМК МГУ. Область научных интересов: графовые нейронные сети, AutoML.

Fedor Mikhailovich BALABANOV – laboratory assistant in the Ivannikov Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences, student at the Moscow State University. His research interests are graph neural networks, AutoML.

Кирилл Сергеевич ЛУКЪЯНОВ – исследователь центра доверенного искусственного интеллекта ИСП РАН; аспирант МФТИ. Область научных интересов: исследования в области доверенного искусственного интеллекта, исследования на пересечении при одновременном обеспечении нескольких критериев доверия (в частности, обеспечение одновременной интерпретируемости и защищенности моделей искусственного интеллекта), AutoML, домены данных – графы, изображения, временные ряды, табличные данные.

Kirill Sergeevich LUKYANOV – Researcher at the Center for Trusted Artificial Intelligence of the Ivannikov Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences; postgraduate student at Moscow Institute of Physics and Technology. Research interests: trustworthy artificial intelligence with a particular focus on studies at the intersection of multiple trust criteria being ensured simultaneously (e.g., achieving both interpretability and robustness of AI models), AutoML, data domains – graphs, images, time series, tabular data.



DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(2)-9

## Построение гидравлической модели теплообменного аппарата

<sup>1</sup> Е.С. Байметова, ORCID: 0000-0002-4534-0936 <baimetova.e.s@gmail.com>

<sup>2</sup> М.Р. Королева, ORCID: 0000-0001-5697-9199 <koroleva@udman.ru>

<sup>1</sup> Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова,  
Россия, 426069, Ижевск, ул. Студенческая, д. 7.

<sup>2</sup> Удмуртский федеральный исследовательский центр УроРАН,  
Россия, 426067, Ижевск, ул. Т. Барамзиной, д. 34.

**Аннотация.** В работе приведено построение гидравлической модели теплообменного аппарата (ТА). Исследуемый в работе многосекционный ТА включает в себя теплообменную матрицу из 11 секций, каждая из которых содержит 6 каналов малого диаметра. Построение гидравлической математической модели (ГММ) основано на результатах экспериментальных исследований и результатах математического моделирования. Численное моделирование проводилось в пакете OpenFOAM с использованием решателя simpleFoam. На основе математического моделирования проведены полноразмерные расчеты ТА в рабочем диапазоне чисел Рейнольдса, а также дополнительные расчеты течения в малоразмерных каналах с учетом внутреннего оребрения и наличия интенсификаторов теплообмена. В результате анализа распределения гидравлических потерь в многосекционном ТА построена гидравлическая математическая модель работы устройства. На основе сопоставления расчетных данных и результатов экспериментальных исследований проведена идентификация параметров ГММ теплообменного аппарата. Построенная модель в дальнейшем будет обобщена на широкий размерный ряд ТА данного вида.

**Ключевые слова:** гидравлическая математическая модель; численное моделирование; теплообменный аппарат; гидродинамика; диаграммы Бернулли.

**Для цитирования:** Байметова Е.С., Королева М.Р. Построение гидравлической модели теплообменного аппарата. Труды ИСП РАН, том 37, вып. 2, 2025 г., стр. 129–140. DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(2)-9.

## Construction of a Hydraulic Model of a Heat Exchanger

<sup>1</sup> E.S. Baimetova, ORCID: 0000-0002-4534-0936 <baimetova.e.s@gmail.com>

<sup>2</sup> M.R. Koroleva, ORCID: 0000-0001-5697-9199 <koroleva@udman.ru>

<sup>1</sup> Kalashnikov Izhevsk State Technical University,  
7, Studencheskaya st., Izhevsk, 426069, Russia.

<sup>2</sup> Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
34, Tatyana Baramzina st., Izhevsk, 426067, Russia.

**Abstract.** The work presents the construction of a hydraulic model of a heat exchanger (HE). The multi-section HE studied in this work includes a heat exchange matrix of 11 sections, each of which contains 6 small-diameter channels. The construction of a hydraulic mathematical model (HMM) is based on the results of experimental studies and the results of mathematical modeling. Numerical simulations were carried out in the OpenFOAM package using the simpleFoam solver. Based on mathematical modeling, full-size calculations of the TA were carried out in the operating range of Reynolds numbers, as well as additional calculations of flow in small-sized channels taking into account internal fins and the presence of heat transfer intensifiers. As a result of analyzing the distribution of hydraulic losses in a multi-section HE, a hydraulic mathematical model of the device's operation was constructed. Based on a comparison of calculated data and the results of experimental studies, the parameters of the HMM heat exchanger were identified. The constructed model will be further generalized to a wide range of HE sizes of this type.

**Keywords:** hydraulic mathematical model; numerical modeling; heat exchanger; hydrodynamics; Bernoulli diagrams.

**For citation:** Baimetova.E.S., Koroleva M.R. Construction of a hydraulic model of a heat exchanger. *Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS*, vol. 37, issue 2, 2025. pp. 129-140 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(2) - 9.

### 1. Введение

При подборе теплообменного аппарата следует учитывать множество важных факторов и параметров, которые могут существенно влиять на теплообменные и гидравлические процессы устройства. Основные сложности при подборе ТА включают в себя подбор поверхности теплообмена для обеспечения необходимой тепловой мощности и расчет гидравлических сопротивлений в системе, чтобы обеспечить нормальную работу оборудования. Современные теплообменные аппараты, как правило, характеризуются наличием большого числа микро/малоразмерных каналов сложного поперечного сечения с внутренними интенсификаторами теплообмена [1-8]. Гидравлическая нагрузка таких систем ввиду малости проходного сечения каналов и габаритов ТА в целом может быть неравномерной и значительно увеличивать потери давления. Общепринятые методики расчета современных ТА ввиду сложности конструкций являются неоднозначными и могут приводить к достаточно большой погрешности при определении гидравлических сопротивлений [3]. Ввиду этого, построение новых моделей, описывающих гидродинамику теплообменных устройств на основе простых и, следовательно, практически применимых соотношений является актуальной задачей.

Рассматриваемый в работе многосекционный конвективный ТА (рис. 1) широко распространен в промышленности. Данная конструкция выпускается широким размерным рядом и зачастую возникают сложности при подборе необходимого количества секций теплообменной матрицы для охлаждения рабочей жидкости. Основные составляющие ТА: раздающий и собирающий коллектора, теплообменная матрица, состоящая из заданного количества параллельно расположенных секций. Каждая секция содержит 6 малоразмерных каналов. Расчет данного вида конструкции в полной сборке рассмотрен в [1, 2]. В работе [2] было выявлено расхождение экспериментальных и численных результатов исследования, обусловленное сложной формой оребрения каналов малого диаметра и локальных местных

сопротивлений в коллекторах, связанные с технологическим процессом изготовления ТА (рис. 1б, 1в).

На рис. 2 представлены снимки коллекторных систем и входов в каналы теплообменников данного типа, выполненные с применением промышленного эндоскопа LCD Screen Handheld Endoscope P305. Они подтверждают особенности конструкций, исследуемых ТА, а также то, что данные особенности характерны для всего размерного ряда данной линейки теплообменного оборудования. Учет таких геометрических особенностей, как наличие сварных швов и интенсификаторов на оребрении в каналах ТА, при проведении численного моделирования невозможен. Однако, в сочетании с экспериментальными гидравлическими исследованиями, численные расчеты позволили сформулировать простую гидравлическую математическую модель данного типа теплообменного оборудования, провести идентификацию ее параметров, которая может быть расширена на весь размерный ряд ТА данной конструкции.

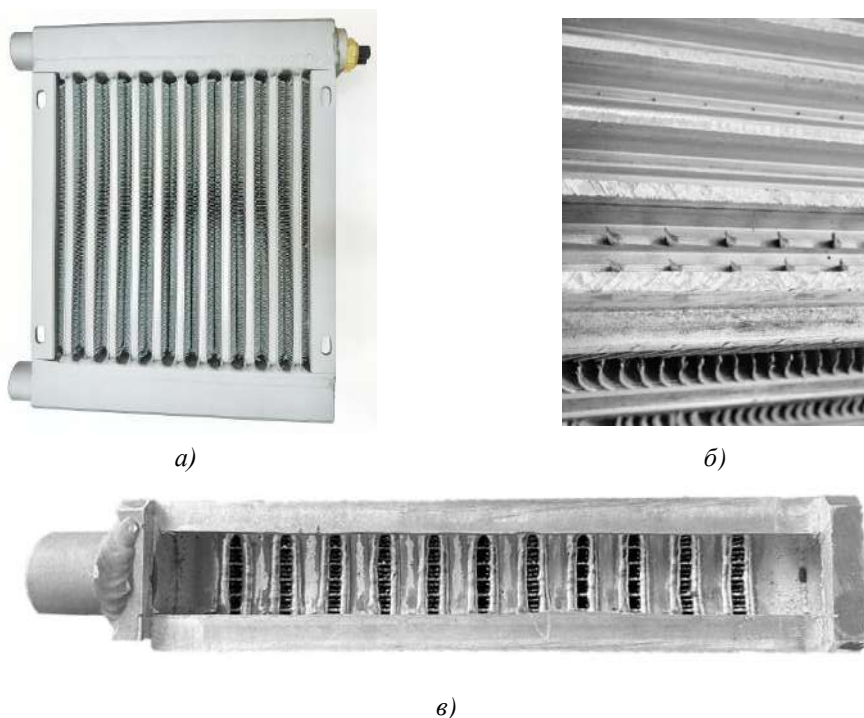


Рис. 1. Многосекционный теплообменный аппарат: а) общий вид многосекционного ТА б) внутренняя геометрия каналов малого диаметра, в) раздающий коллектор в разрезе.

Fig. 1. Multi-section heat exchanger: a) general view of multi-channel HE, b) internal geometry of small diameter channels, c) the distribution collector in the section.

## 2. Численное моделирование гидродинамики ТА

На начальном этапе формирования ГММ многосекционного ТА были проведены подробные численные исследования течения жидкости для выбранной типовой конструкции теплообменника в заданном диапазоне чисел Рейнольдса. Рассматриваемая в работе конструкция содержит 11 секций длиной 266 мм (рис. 3). Раздающий и собирающий коллектора имеют идентичную конфигурацию и соединены между собой секциями теплообменной матрицы. Особенностью конструкции является наличие ступенчатого перехода между подводящей трубой и раздающим коллектором, и, соответственно, между собирающим коллектором и выходной трубой. Расчетная схема многосекционного ТА с

фрагментами сетки показана на рис. 3б. Сетка строилась в пакете Salome. Анализ сеточной сходимости показал необходимость использования расчетной сетки, которая содержит примерно 6 млн. элементов. Математическая модель основывается на системе уравнений Навье-Стокса [2]. При построении математической модели использовались следующие допущения: течение стационарное, изотермическое, жидкость несжимаемая, вязкость постоянная, шероховатость материала не учитывается. Численное моделирование проводилось в пакете OpenFOAM на основе решателя simpleFoam с подключением на высоких скоростях модели турбулентности SA. Полная математическая постановка с описанием граничных условий приведена в работе [2, 3].

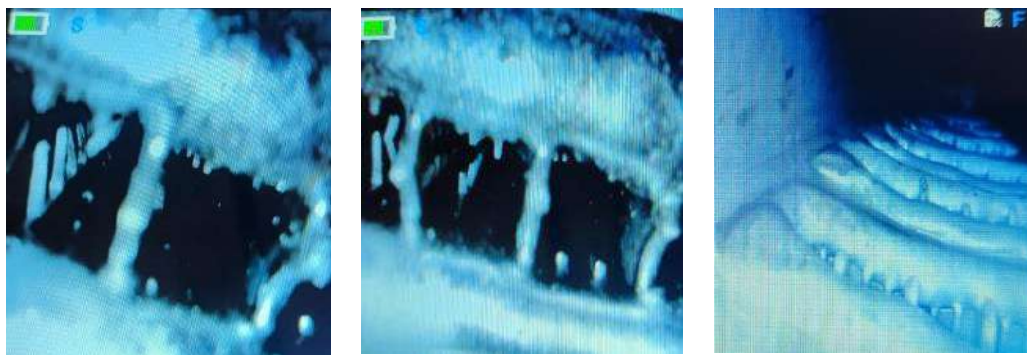


Рис. 2. Снимки внутренней геометрии теплообменного аппарата.

Fig. 2. Photos of the internal geometry of the heat exchanger.

На рис. 4 приведены данные численных и экспериментальных исследований коэффициента гидравлического сопротивления ТА в диапазоне изменения чисел Рейнольдса от 268 до 2814. Видно, что разница между потерями напора зависит от числа Рейнольдса, что позволяет сделать предположение о том, что именно неучтенные геометрические особенности устройства (рис. 1-2) являются причиной отклонения результатов численного моделирования от экспериментальных данных. На рис. 4 представлены результаты экспериментального распределения гидравлических сопротивлений и результаты, полученные численно без учета сварных швов и интенсификаторов на ребрах каналов малого диаметра.

Для построения ГММ устройства был проведен анализ распределения гидростатического давления. На рис. 5 представлена диаграмма Бернулли гидравлической системы ТА. Диаграмма строилась от входа в коллектор, выделенные зоны на рис. 5 показывают начало входа в теплообменную матрицу, 11 точек соответствуют 11 секциям ТА. На рис. 5а показаны линии изменения статического и полного давлений в раздающем и собирающем коллекторах при числе  $Re_{HE} = 2144$ . На рис. 5б приведены линии статического напора в сравнении с линией полного напора идеальной жидкости. Для всех остальных чисел Рейнольдса характер диаграммы Бернулли аналогичен приведенному на рис. 5. Хорошо прослеживаются существенные потери напора в месте соединения входной трубы с раздающим коллектором и собирающего коллектора с выходной трубой. Далее происходит рост статического и полного давления за счет отвода жидкости в секции теплообменной матрицы. Разрыв между верхними и нижними линиями диаграммы показывает уровень потерь напора в каналах малого диаметра, которые не являются одинаковыми для всех секций. Это связано с гидравлической разверткой коллекторной системы и топологическими особенностями течения. Различные скорости жидкости на входе в секции приводят к различным потерям напора, при этом средняя скорость в каналах данного сечения составляет 0.45 от максимальной.

Подробные исследования данных каналов без интенсификаторов с учетом тепломассопереноса в рабочей жидкости были проведены в работах [5-7]. По результатам

численного моделирования выявлено, что линейные гидравлические сопротивления описываются зависимостью:

$$\lambda = 65.307 Re_{ch}^{-1.032}. \quad (1)$$

Число Рейнольдса в формуле (1) рассчитывается по средней скорости жидкости в канале и эквивалентному диаметру канала, который в данном случае равен  $d_{eq} = 0.0048$  м.

Зависимость линейных гидравлических сопротивлений от числа Рейнольдса представлена на рис. 6.

Формула (1) хорошо описывает гидравлические потери в многосекционном ТА (рис. 5) с учетом гидравлической разветки каналов и не учитывает дополнительные потери, вызванные наличием интенсификаторов.

Для оценки потерь давления в соединительных каналах дополнительно был выполнен ряд численных исследований [2, 6]. Численное моделирование проводилось на основе четверти единичного канала малого диаметра в соответствии с его геометрическими характеристиками [6] и с учётом наличия интенсификаторов теплообмена, располагающихся по длине трапецевидных ребер (рис. 16).

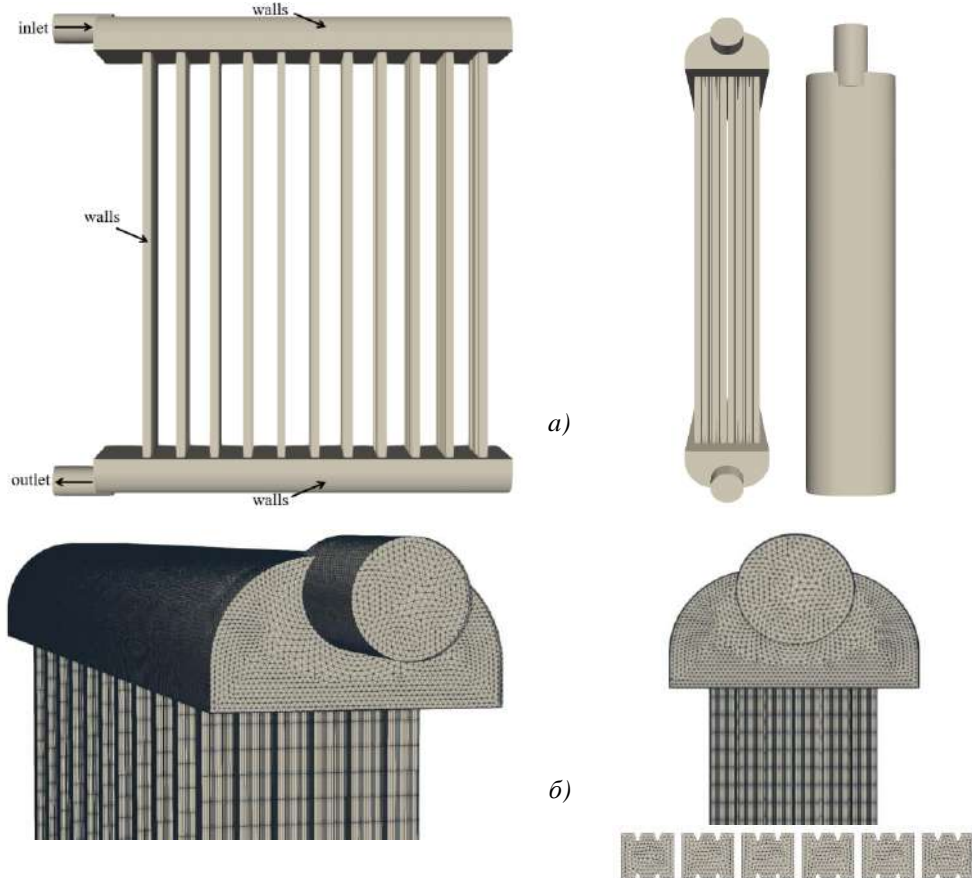


Рис. 3. Расчетная схема многосекционного теплообменного аппарата:  
а) границы подвода и отвода рабочей жидкости, б) фрагменты расчетной сетки.

Fig.3. Design scheme of a multi-section heat exchanger:  
a) heat transfer fluid inlet and outlet diagram, b) mesh fragments.

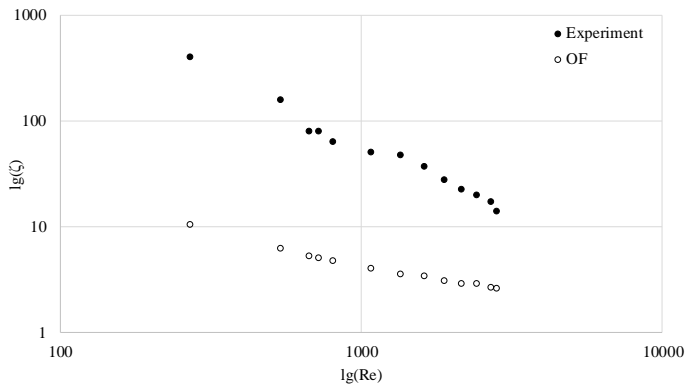


Рис. 4. Зависимость гидравлических сопротивлений от числа Рейнольдса.  
Fig. 4. Dependence of hydraulic resistances on Reynolds number.

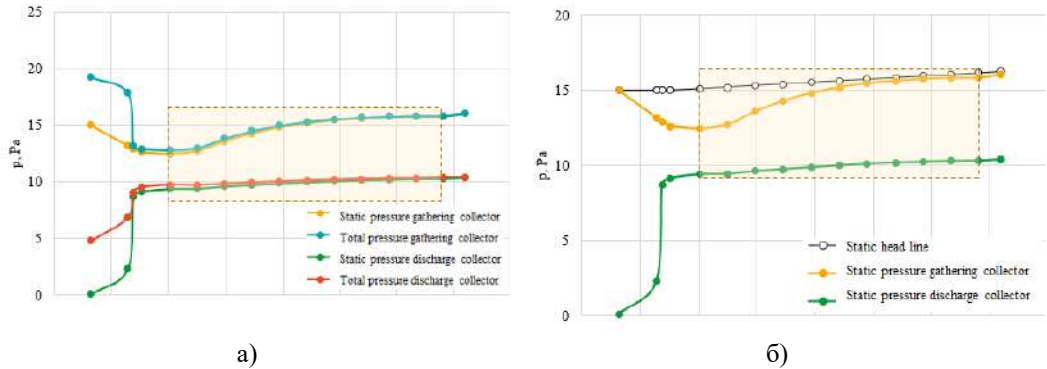


Рис. 5. Диаграммы Бернулли:  
а) линии статического и полного давления в раздающем и собирающем коллекторах,  
б) линии статического напора в сравнении с линией полного напора идеальной жидкости.  
Fig. 5. Bernoulli diagrams:

а) static and total pressure lines in the distribution and collecting manifolds,  
б) static head line compared to the full head line of an ideal fluid.

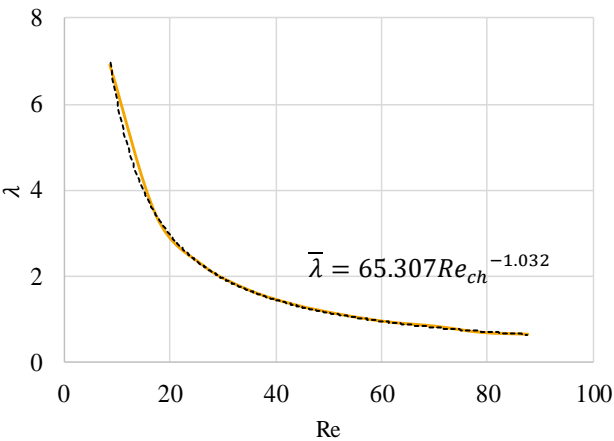


Рис. 6. Зависимость линейных гидравлических сопротивлений от числа Рейнольдса.  
Fig. 6. Dependence of hydraulic resistances on Re.

На рис. 7 показана расчетная схема и фрагменты расчетной сетки канала малого диаметра с интенсификаторами, выполненными на внутреннем оребрении. Сетка строилась в пакете OpenFoam с использованием утилиты cfMesh и содержит более 11 млн. ячеек. На границе «inlet» задавалась средняя скорость течения в каналах малого диаметра –  $V_{ch}$ , полученная по результатам эксперимента [2] и составляющая 0.45 от максимальной скорости подачи на входе в коллектор, на границе «outlet» задавалось избыточное давление 0 Па, на границах «walls» условие прилипания, на границе «symmetry» – плоскость симметрии. В качестве теплоносителя рассматривалась вода комнатной температуры, с кинематической вязкостью  $\nu = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ . Численное моделирование проводилось на стационарном ПК, трудоемкость расчетов зависела от скорости подачи рабочей жидкости и занимает от 168 до 252 часов.

Согласно проведенным численным расчетам, гидравлические потери в каналах с интенсификаторами теплообмена возрастают в среднем в 3.5 раза. Аналогичный результат был получен в работе [4]. Данные [4] были подтверждены численно и верифицированы экспериментально. В табл. 1 представлены минимальное, среднее и максимальное значение линейных гидравлических сопротивлений для каналов в виде симметричных трапеций  $\lambda$  и каналов с интенсификаторами на оребрении  $\lambda'$ .

Линейные гидравлические сопротивления рассчитывались по формуле:

$$\lambda = \frac{2 \cdot \Delta p_{ch} \cdot d_{eq}}{l \cdot \rho \cdot V_{ch}^2},$$

где  $\Delta p_{ch}$  – перепад давлений на участке стабилизированного течения рабочей жидкости,  $d_{eq}$  – эквивалентный диаметр канала малого диаметра,  $l$  – длина участка стабилизированного течения,  $\rho = 997 \text{ кг/м}^3$  – плотность рабочей жидкости,  $V_{ch}$  – скорость подачи рабочей жидкости в единичный канал.

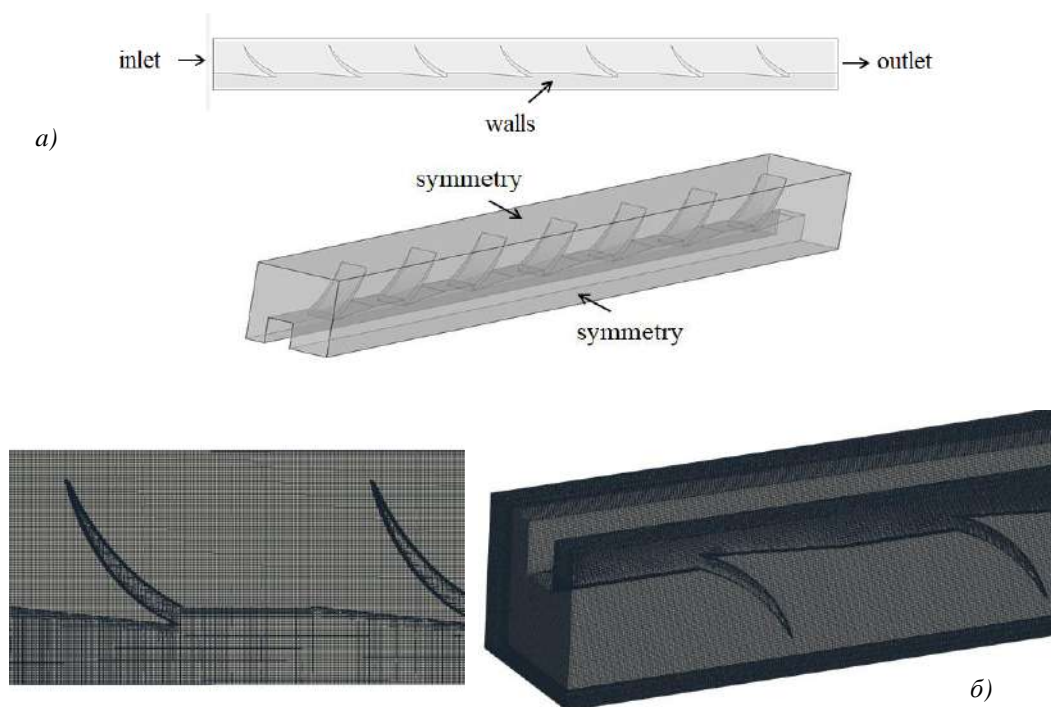


Рис. 7. Геометрическая постановка задачи: а) схема расчетной области, б) фрагменты сетки.  
Fig. 7. Geometric formulation of the problem: a) the scheme of the calculation area, b) mesh fragments.

Табл. 1. Линейные гидравлические сопротивления.

Table 1. Linear hydraulic resistances.

$\lambda$	6.914	1.331	0.649
$\lambda'$	24.198	4.685	2.299
$\Delta = \lambda' / \lambda$	3.501	3.521	3.541

3. Построение гидравлической модели многосекционного ТА

Гидравлическая модель теплообменного аппарата может быть использована для расчёта массового потока теплоносителя в каналах, а также для подбора теплообменного оборудования с целью определения оптимальных параметров работы системы. Расчёт основывается на уравнении Бернулли [9, 10], которое учитывает перепад давления, длину канала, гидравлический диаметр, плотность и скорость теплоносителя.

Анализ распределения давлений в гидравлической системе многосекционного теплообменника позволил сформулировать основные предположения, на основе которых строилась гидравлическая математическая модель:

- 1. Модель строится на основе суммы трех составляющих потерь напора – в раздающем коллекторе  $\Delta p_{dis}$ , в каналах малого диаметра секции теплообменной матрицы  $\Delta p_{ch}$  и собирающем коллекторе  $\Delta p_{coll}$ .

$$\Delta p = \Delta p_{dis} + \Delta p_{coll} + \Delta p_{ch}.$$

- 2. Потери напора в раздающем и собирающем коллекторе пропорциональны потерям в раздающем коллекторе, при этом коэффициент пропорциональности зависит от числа Рейнольдса ТА -  $Re_{HE}$ .

$$n(Re_{HE}) = \frac{\Delta p_{dis}}{\Delta p_{coll}}$$

- 3. Гидравлические потери в каналах теплообменной матрицы зависят от числа Рейнольдса канала –  $Re_{ch}$  и определяются соотношением (2) с учетом поправочного коэффициента  $a$ , учитывающего наличие интенсификаторов теплообмена.
- 4. Средние скорости жидкости в каждом канале одной секции одинаковы и находятся с учетом равного распределения расходов по каналам секции теплообменной матрицы.
- 5. Модель содержит поправочную функцию, вид которой идентифицируется исходя из сопоставления экспериментальных и расчетных данных.

Общий вид ГММ имеет вид:

$$\Delta p(Re_{HE}) = \delta(Re_{HE})(1 + n(Re_{HE}))\Delta p_{dis}^{OF}(Re_{HE}) + a \Delta p_{ch}^{OF}(Re_{ch}). \tag{2}$$

В соотношении (3)  $\Delta p(Re_{HE})$  - потери давления в гидравлической системе ТА, Па;  $\Delta p_{dis}^{OF}(Re_{HE})$  – потери напора в раздающем коллекторе на участке от входа в ТА до последней секции теплообменной матрицы, Па;  $\Delta p_{ch}^{OF}(Re_{ch})$  – потери напора в каналах малого диаметра без учета внутренних интенсификаторов теплообмена, Па;  $\delta(Re_{HE})$  – поправочная функция модели, учитывающая дополнительные геометрические особенности внутренней конфигурации ТА,  $n(Re_{HE})$  – коэффициент пропорциональности, равный отношению перепада давлений раздающего и собирающего коллекторов,  $a$  – коэффициент учета внутренних интенсификаторов теплообмена в каналах малого диаметра, равный 3.5.

Рассмотрим процедуру построения ГММ на примере диаграммы Бернулли для числа Рейнольдса ТА равного  $Re_{HE} = 2144$ . Данные, по которым производился расчет, приведены в табл. 2.

Аналогичные расчеты были проведены для всего диапазона чисел Рейнольдса, полученные в результате расчетов поправочная функция  $\delta(Re_{HE})$  и коэффициент пропорциональности  $n(Re_{HE})$  имеют вид:

$$\delta(Re_{HE}) = 54213Re^{-1.109}, n(Re_{HE}) = 10^{-6}Re^{2.3915}$$

Табл. 2. Данные для построения гидравлической модели.

Table 2. Data for the hydraulic model construction.

$Re_{HE}$	$V_{ch}$ , м/с	$q$ , м/с	$\Delta p_{ch}$ , П	$\Delta p_{coll}^{OF}$ , Па	$\Delta p_{dis}^{OF}$ , Па	$\Delta p^{OF}$ , Па	$n(Re_{HE})$	$\delta$
2144	0.015	0.109	15.45	0.225	8.696	16.07	38.64	
$\Delta p^{exp}$		$\Delta p_{HE}^{exp}$		$\Delta p_{dis}^{exp}$		$\Delta p_{coll}^{exp}$		11.6
118.93		103.49		2.61		100.88		

Ошибка в ходе построения ГММ не превышает 2.25%. Для каждой полученной экспериментальным путем скорости [2], был рассчитан расход с учетом отвода жидкости в 11 секций исследуемого ТА, перепад давлений на входе и выходе в каналы малого диаметра для 11 секций, перепад давлений в раздающем и собирающем коллекторах, поправочная функция  $\delta$ . Расчет средней скорости в каналах малого диаметра  $V_{ch}$  выводился через отношение расхода к площади секции, содержащей 6 каналов. Разница давлений раздающего коллектора полученная численно учитывала отвод рабочей жидкости в размере скоростного напора  $q$  (на рис. 5 – расстояние между линией статического напора и линией статического давления раздающего коллектора), в случае собирающей части коллекторной системы расчет разницы давлений производился с учетом подвода рабочей жидкости из каналов малого диаметра с учетом 11 секций содержащей по 6 каналов малого диаметра каждая. Полученное численно значение  $\Delta p_{ch}$  при построении гидравлической модели было умножено на значение коэффициента  $a$  равное 3.5 [4]. Таким образом, сумма трех составляющих потерь напора  $\Delta p^{числ.} = 16.07$  Па, что не противоречит диаграмме Бернулли (рис. 5).

На рис. 8 показана зависимость гидравлических сопротивлений от скорости подачи теплоносителя. Как видно из рис. 8, данные хорошо согласуются, и можно сделать вывод о применимости использования данной модели для многосекционного ТА сложной формы внутреннего оребрения каналов малого диаметра.

## 4. Заключение

В работе проведено численное исследование гидродинамических процессов, протекающих в многосекционном ТА, при помощи свободного программного обеспечения для решения задач механики сплошных сред OpenFOAM. Проведен сравнительный анализ гладкотрубных каналов малого диаметра и каналов с интенсификаторами на оребрении. Выявлено, что исполнение каналов малого диаметра с интенсификаторами на оребрении увеличивает линейные гидравлические сопротивления в 3.5 раза, однако использование данных каналов нецелесообразно ввиду их отрыва и засорения системы. По результатам численного моделирования была получена зависимость, описывающая линейные гидравлические сопротивления в каналах малого диаметра. На основе анализа распределения гидравлических потерь и сопоставления расчетных и экспериментальных данных проведена идентификация параметров ГММ многосекционного ТА. В дальнейших исследованиях ГММ будет обобщена на широкий размерный ряд ТА данного конструктивного исполнения. Полученные при построении гидравлической модели данные хорошо согласуются с экспериментом, что говорит о применимости использования гидравлической модели при подборе теплообменного оборудования необходимых типоразмеров и характеристик.

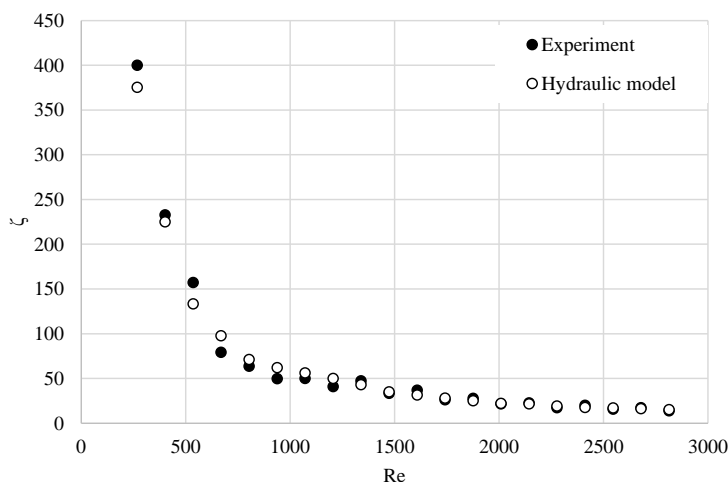


Рис. 8. Гидравлические сопротивления, полученные экспериментально и с помощью гидравлической модели.

Fig. 8. Hydraulic resistances obtained experimentally and by means of a hydraulic model.

## Список литературы / References

- [1]. Королева М.Р., Терентьев А.Н., Чернова А.А. Гидродинамика коллектора сложной формы. Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2021. № 3 (58). с.50-55. / Koroleva M.R., Terent'ev A.N., Chernova A.A. Hydrodynamics of a complex-shaped reservoir. Bulletin of the Rybinsk State Aviation Technological Academy named after. P.A. Solovyova, 2021, No. 3 (58), pp. 50-55. (in Russian).
- [2]. Байметова Е.С., Митрюкова Е.А. Численное и экспериментальное исследование гидродинамики теплообменного аппарата. Труды института системного программирования РАН. Москва. Т. 35. № 6. 2023. С.235-246. / Baimetova E.S., Mitryukova E.A. Numerical and experimental study of the hydrodynamics of a heat exchanger. Proceedings of the Institute of System Programming of the Russian Academy of Sciences. Moscow, vol. 35, No. 6, 2023, pp. 235-246. (in Russian).
- [3]. Байметова Е.С. Численное моделирование гидродинамических процессов в многоканальном коллекторе. Труды МАИ. 2023. № 130. / Baimetova E.S. Numerical simulation of hydrodynamic processes in a multichannel collector. Trudy MAI, 2023, No. 130 (in Russian).
- [4]. М.В. Гуреев, А.М. Ермаков, Ю.В. Жукова, Р.Г. Кадыров, Р.Р. Калимуллин, Г.С. Маршалова, А.А. Миронов Р.М., Низамутдинов, И.А. Попов, А.Н. Скрыпник, С.В. Тиунов, Р.А. Усенков, И.И. Хабибуллин, А.Д. Чорный. Повышение надежности прогнозирования теплогидравлических характеристик трубчато-ребристых радиаторов аппаратов воздушного охлаждения энергоустановок на основе численного и экспериментального исследования. Тепловые процессы в технике. 2020, т. 12. №11. с. 482–502. / M.V. Gureev, A.M. Ermakov, Yu.V. Zhukova, R.G. Kadyrov, R.R. Kalimullin, G.S. Marshalova, A.A. Mironov R.M., Nizamutdinov, I.A. Popov, A.N. Skrypnik, S.V. Tiunov, R.A. Usenkov, I.I. Khabibullin, A.D. Chornyj. Improving the reliability of forecasting the thermohydraulic characteristics of tubular-ribbed radiators of air cooling devices of power plants based on numerical and experimental research. Thermal processes in engineering, 2020, vol. 12, no.11, pp. 482 - 502.
- [5]. Байметова Е.С., Королева М.Р., Чернов К.В., Меньшиков А.П., Бураков А.М., Ардашев Н.С. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Номер свидетельства: RU 2024666090. Онлайн конфигуратор теплообменного оборудования. Дата регистрации: 28.06.2024. Дата публикации: 09.07.2024. / Baimetova E.S., Koroleva M.R., Chernov K.V., Menshikov A.P., Burakov A.M., Ardashev N.S. Certificate of state registration of a computer program. Certificate number: RU 2024666090. Online configurator of heat exchange equipment. Registration date: 06/28/2024. Date of publication: 07/09/2024.

- [6]. Байметова Е.С., Хвалько М.Е., Армянин А.Ю. Моделирование сопряженного теплообмена в микроканалах в среде OpenFOAM. Труды института системного программирования РАН. Москва, т. 34. № 5. 2022. с. 205-214. / Baimetova E.S., Khvalko M.E., Armyanin A.Yu. Simulation of coupled heat transfer in microchannels in the OpenFOAM environment. Proceedings of the Institute of System Programming of the Russian Academy of Sciences. Moscow, vol. 34. No. 5. 2022. pp. 205-214. (in Russian).
- [7]. Попов И.А., Махьянов Х.М., Гуреев В.М. Физические основы и промышленное применение интенсификации теплообмена: Интенсификация теплообмена / Под общ. ред. Ю.Ф. Гортышова. Казань: Центр инновационных технологий, 2009. 560 с. / Popov I.A., Makhyanov Kh.M., Gureev V.M. Physical basis and industrial application of heat transfer intensification: Heat transfer intensification / Under the general editorship of Yu.F. Gortyshov, Kazan: Center for Innovative Technologies, 2009, 560 p. (in Russian).
- [8]. Быстров Ю.А., Исаев С.А., Кудрявцев Н.А., Леонтьев А.И. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб. СПб.: Судостроение, 2005. 392 с. / Bystrov Yu.A., Isaev S.A., Kudryavcev N.A., Leontev A.I. Numerical modeling of vortex intensification of heat transfer in pipe packages, St. Petersburg: Shipbuilding, 2005, 392 p. (in Russian).
- [9]. Быстров П.И., Михайлов В.С. Гидродинамика коллекторных теплообменных аппаратов. М.: Энергоиздат, 1982. 224 с. / Bystrov P.I., Mihajlov V.S. Hydrodynamics of collector heat exchangers. Moscow, Energoizdat, 1982, 224 p. (in Russian).
- [10]. Дубоносов, А.Ю. Гидродинамика входных цилиндрических коллекторов теплообменных аппаратов теплоэнергетических установок. Краснодар: Изд. Дом – Юг, 2013. – 124 с. / Dubonosov, A.Yu. Hydrodynamics of input cylindrical collectors of heat exchangers of thermal power plants. Krasnodar, Izd. Dom – Yug, 2013, 124 p. (in Russian).

## Информация об авторах/ Information about authors

Елена Сергеевна БАЙМЕТОВА – старший преподаватель кафедры Тепловые двигатели и установки Ижевского государственного технического университета имени М.Т. Калашникова. Сфера научных интересов: вычислительная гидрогазодинамика, механика жидкости и газа, гидродинамика, интенсификация процессов теплообмена.

Elena Sergeevna BAIMETOVA is a senior lecturer at the Department of Heat Engines and Plants, Kalashnikov Izhevsk State Technical University. Research interests: computational fluid dynamics and intensification of heat exchange processes.

Мария Равилевна КОРОЛЕВА – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Удмуртского федерального исследовательского центра УрО РАН, лаборатория физико-химической механики. Сфера научных интересов: математическое моделирование, разностные схемы, газовая динамика, гидродинамика, кавитация, теплообмен.

Maria Ravilevna KOROLEVA – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher at the Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Research interests: mathematical modeling, difference schemes, gas dynamics, hydrodynamics, cavitation, heat exchange.



DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(2)-10



## Параметрическое исследование эффективности исполнения единичной секции маслоохладителя

*А.А. Чернова, ORCID: 0000-0001-8579-6279 <alicaaa@gmail.com>*

*А.Р. Шигапова, ORCID: 0000-0003-2668-0422 <aigulka1806@mail.ru>*

*Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова,  
Россия, 426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7.*

**Аннотация.** В работе приведены результаты численного исследования влияния конструктивного параметра – зазора между охлаждающими пластинами конвективного теплообменного аппарата на его эффективность. Рассматривается единичная охлаждающая секция маслоохладителя, состоящая из разведённых на определенное расстояние охлаждающих пластин. Оценка эффективности устройства строится на основе анализа изменения коэффициентов теплоотдачи на границах рабочих сред от увеличения расстояния между пластинами. Рассматривается задача сопряженного теплообмена между нагретым гидравлическим маслом, пластинами маслоохладителя и холодным турбулентным потоком нагнетаемого вентилятором воздуха. Численное решение полученной системы уравнений строится методом контрольных объемов с использованием решателя chtMultiRegionFoam свободно распространяемого программного обеспечения OpenFOAM. Численное моделирование рабочих процессов, протекающих в единичной секции маслоохладителя, производилось методом установления. В результате численного моделирования получены поля физических величин, структура потока воздуха и масла в соответствующих каналах устройства. Выявлено и показано влияние величины зазора между пластинами на внутреннюю и внешнюю аэродинамику единичной секции маслоохладителя. Выявлен, описан и обоснован неравномерный нагрев корпуса охлаждающей секции с локализацией температурного максимума в области внутренних центральных каналов. Анализ полученных теплофизических характеристик позволил выявить оптимальное расстояние между пластинами маслоохладителя в 22 мм.

**Ключевые слова:** газовая динамика; задача сопряженного теплообмена; гидравлическое масло; воздух; оребренная пластина с каналами малых размеров; маслоохладитель.

**Для цитирования:** Чернова А.А., Шигапова А.Р. Параметрическое исследование эффективности исполнения единичной секции маслоохладителя. Труды ИСПРАН, том 37, вып. 2, 2025 г., стр. 141–152. DOI: 10.15514/ISPRAS–2025–37(2)–10.

## Parametric Study of the Performance Efficiency of a Single Oil Cooler Section

A.A. Chernova, ORCID: 0000-0001-8579-6279 <alicaaa@gmail.com>  
A.R. Shigapova, ORCID: 0000-0003-2668-0422 <aigulka1806@mail.ru>

*Kalashnikov Izhevsk State Technical University,  
7, Studencheskaya st., Izhevsk, 426069, Russia.*

**Abstract.** The paper presents the results of numerical investigation of the influence of the design parameter - the gap between the cooling plates of the convective heat exchanger for oil cooling on its efficiency. A single cooling section of an oil cooler consisting of cooling plates separated by a certain distance is considered. Each single plate of the oil cooler has 6 internal channels of complex geometry and row external fins, each row of which includes 11 elements of two standard sizes, and the number of rows is determined by the length of the plate. The efficiency of the device is evaluated on the basis of analyzing the change of heat transfer coefficients at the boundaries of working media from the increase of the distance between the plates. The problem of conjugate heat exchange between heated hydraulic oil, oil cooler plates and cold turbulent flow of air blown by a fan is considered. The mathematical model of fluid media motion is based on the Navier-Stokes equations. Modelling of heat transfer processes in the oil cooler plate is based on the heat conduction equation. To close the averaged system of conservation equations, the Menter SST turbulence model is applied. The numerical solution of the obtained system of equations is constructed by the method of control volumes using the chtMultiRegionFoam solver of the freely distributed OpenFOAM software. Numerical modelling of the working processes occurring in a single section of the oil cooler was performed using the establishment method. For discretization of non-viscous flows (in oil and air), a counter flow scheme of 2nd order of accuracy is applied, and for viscous flows, total variation minimization (TVD) schemes and the limitedLinear method were applied. The gradients were approximated based on the linear Gaussian method. The conjugate gradient method was used to accelerate convergence. As a result of numerical modelling, the fields of physical quantities, air and oil flow structure in the corresponding channels of the device were obtained. The influence of the plate gap size on the internal and external aerodynamics of the unit section of the oil cooler is identified and shown. Non-uniform heating of the cooling section body with localization of the temperature maximum in the area of internal central channels has been revealed, described and substantiated. The analysis of the obtained thermophysical characteristics allowed to reveal the optimum distance between the plates of the oil cooler of 22 mm.

**Keywords:** gas dynamics; coupled heat transfer problem; hydraulic oil; air; finned plate with small channels; oil cooler.

**For citation:** Chernova A.A., Shigapova A.R. Parametric study of the performance efficiency of a single oil cooler section. *Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS*, vol. 37, issue 2, 2025. pp. 141-152 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(2)-10.

### 1. Введение

Двигатели оборудования, применяемые в промышленности, работают по принципу сжатия и расширения рабочих сред [1], вследствие чего их работа сопряжена с нагревом этих сред. В связи с этим актуальным [2-4] остается вопрос утилизации избыточного тепла, для чего [5] применяются теплообменные аппараты (ТА) различных конструктивных схем. Необходимо отметить, что конструктивное исполнение любого теплового оборудования [5-7] частично определяет его эффективность. В виду чего исследования, направленные на оптимизацию (тепловую, гидродинамическую, газодинамическую и технологическую) теплового оборудования, в том числе конвективных теплообменных аппаратов, не теряют своей актуальности.

В работе [8] приведено обобщение результатов серий экспериментальных исследований, наиболее востребованных на момент публикации, видов однофазных теплообменников, приведены критериальные зависимости для расчета чисел Нуссельта в теплообменных аппаратах различных конфигураций. Представлены данные теоретических и

экспериментальных исследований конвективного теплопереноса в ламинарных, турбулентных и отрывных течениях с охватом широкого интервала чисел Рейнольдса и Прандтля. Значительное внимание уделено вопросам интенсификации теплообмена, проблемам обтекания и гидродинамической вибрации. Даны практические рекомендации по тепловому и гидродинамическому расчету трубчатых теплообменных аппаратов.

В современных работах [9-11] приводится подробный обзор существующих технических решений проблемы интенсификации теплообмена за счет турбулизации течения теплового агента (теплоноситель, хладагент) путем оребрения внутритрубного/внутриканального пространства [12, 13] либо путем структурирования внешних поверхностей теплообменного аппарата [14], однако оценок эффективности таких решений не приводится.

Современные стандарты производства технических устройств, оснащаемых теплообменными аппаратами (ТА), диктуют новые требования к энергетическим и эксплуатационным характеристикам ТА, а также к их экономической эффективности. Существенное увеличение энергоэффективности ТА невозможно без учета влияния исполнения конструктивных элементов ТА на достигаемые рабочие параметры. Таким образом, теоретические, в том числе численные, исследования рабочих процессов, протекающих в конвективных теплообменных аппаратах, с целью повышения энерго- и тепло- эффективности устройства и формирования концепции, ориентированной на повышение их эффективности и технологичности, и оптимизация конструкции элементов конвективных теплообменных аппаратов являются с научной и практической точек зрения актуальной задачей.

Отметим, что одним из распространенных, но недостаточно изученных [15], схем конвективных ТА является многосекционный коллектор со сложной формой поперечного сечения каналов подвода жидкости [15-17] с развитой внешней поверхностью для эффективного охлаждения теплоносителя. К данному виду устройств можно отнести и маслоохладители. Основным конструктивным элементом маслоохладителей [15-18] является алюминиевая либо медная трубка прямоугольного сечения, оребренная по внешним поверхностям. Оребрение выполняет функцию отвода тепла в окружающую среду, увеличивая эффективную площадь теплоотдачи. В виду чего, модификация геометрии оребрения или компоновки оребренных пластин будет влиять на тепловую эффективность устройства в целом. Работа направлена на исследование оптимальной, с точки зрения тепловой эффективности исполнения, величины зазора между пластинками маслоохладителя.

## **2. Математическая постановка**

Объектом исследования является промышленный маслоохладитель (рис. 1).

Маслоохладитель представляет собой многосекционный коллектор со сложной формой поперечного сечения каналов подвода жидкости и с развитой внешней поверхностью единичных пластинчатых шестиканальных элементов. Каждая единичная пластина маслоохладителя (рис. 2а) имеет 6 внутренних каналов сложной геометрии [19-22] и рядное внешнее оребрение (рис. 2б), каждый ряд которого включает 11 элементов двух типоразмеров, а количество рядов определяется длиной пластины.

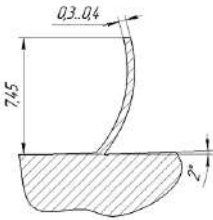
Параллельное размещение таких единичных секций в коллекторах (раздающем и собирающем) и образует маслоохладитель конкретной производительности. Одним из управляющих параметров тепловой эффективности устройства в целом является выбранное расстояние между параллельно размещенными единичными пластинами (рис. 3) или высота зазора (рис. 3б) между единичными пластинами. В настоящей работе приводятся результаты параметрического исследования влияния величины высоты зазора между пластинами на теплоотдачу единичной секции.



Рис. 1. Маслоохладитель в сборе.  
Fig. 1. Oil cooler assembly.

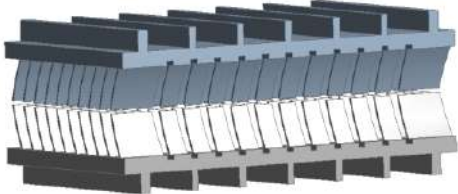


(a)

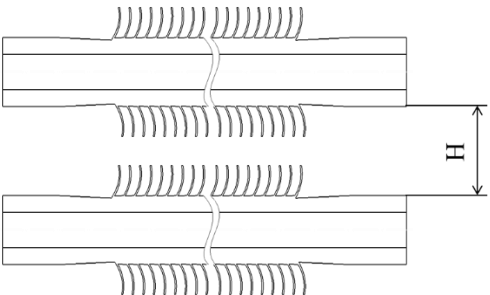


(b)

Рис. 2. Единичная пластина маслоохладителя (a) и элемент внешнего оребрения (b).  
Fig. 2. Single oil cooler plate (a) and external fin element (b).



(a)



(b)

Рис. 3. Единичная секция маслоохладителя:  
(a) геометрическая модель; (b) схема расположения пластин.  
Fig. 3. Single section of oil cooler: (a) geometric model; (b) plate arrangement diagram.

В ходе выполнения исследования были сделаны следующие допущения:

1. Рассматривается малый сегмент маслоохладителя, включающий две пластины.
2. Внутренние интенсификаторы теплообмена (трапецевидные ребра) исключены из геометрической модели.
3. Материал пластины изотропен.
4. Рассматриваются стационарные процессы конвективного теплообмена.
5. Шероховатость материала не учитывается.
6. Аэродинамика рассматривается в несжимаемой постановке ( $v/a \approx 0.03$ , где  $a$  – скорость звука в воздухе при нормальных условиях).

Рассматривается задача сопряженного теплообмена между нагретым гидравлическим маслом ( $\rho = 859 \text{ кг/м}^3$ ,  $\mu = 0.11 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ,  $\lambda = 0.41 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ), пластинами маслоохладителя ( $\rho = 2697 \text{ кг/м}^3$ ,  $\lambda = 237 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ,  $c = 903 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ) и холодным потоком нагнетаемого вентилятором воздуха ( $M = 28,98 \text{ г/моль}$ ,  $c_p = 1004 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ,  $\mu = 15,7 \text{ мкПа}\cdot\text{с}$ ).

Математическая модель движения текучих сред основана на уравнениях Навье-Стокса. Система уравнений, описывающая движение сплошных сред, в общем случае, имеет вид:

$$\nabla \cdot (\rho u) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot (u \times u) + \frac{1}{\rho} \nabla p - \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \tau_{ij} = g \quad (2)$$

$$\rho \frac{dC_p T}{dt} = \rho F v + \nabla q \quad (3)$$

$$\rho = \text{const} \quad (4)$$

где  $\rho$  – плотность среды;  $u$  – компоненты вектора скорости;  $p$  – давление;  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости;  $F$  – внешняя массовая сила;  $\tau_{ij} = 2\mu S_{ij} - \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij}$  – тензор вязких напряжений;  $S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$  – тензор скоростей деформаций;  $q = \lambda \frac{\partial T}{\partial x}$  – тепловой поток;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности среды;  $T$  – температура;  $C_p$  – теплоемкость при постоянном давлении.

Моделирование процессов теплопередачи в пластине маслоохладителя проводится на основе уравнения теплопроводности

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T). \quad (5)$$

Поскольку число Рейнольдса для потока газа, рассчитанное по высоте зазора, изменяется в диапазоне от 20000 до 400000, исследуется турбулентный режим обтекания воздушным потоком единичной секции маслоохладителя. Система уравнений (1) – (5) осредняется по Фавру [23]. Для замыкания осредненной системы уравнений сохранения применяется модель турбулентности Ментера SST [24].

Граничные условия данной задачи представлены следующим образом: на входе в область (Вход воздуха, рис. 4) определены скорость и температура воздушного потока ( $T_{\text{air}}=20^\circ\text{C}$ ,  $V_{\text{air}}=10 \text{ м/с}$ ), на входах в каналы подачи масла (Подача масла, рис. 4) заданы давление и температура масла ( $T_o=60^\circ\text{C}$ ,  $p_o = 1 \text{ МПа}$ ); на выходных границах внутренних каналов маслоохладителя (Выход масла, рис. 4) использовано условие нулевого градиента ( $\frac{\partial p_o}{\partial n} = 0$ ), на выходе из расчетной области (Выход воздуха, рис. 4) задано атмосферное давление ( $p = 0,1 \text{ МПа}$ ). Условия прилипания и непротекания задаются на непроницаемых твердых поверхностях. На границах контакта масло/алюминий и алюминий/воздух использовано граничное условие IV рода.

Для решения задачи сопряженного теплообмена используется решатель

*chtMultiRegionFoam* [25]. Дискретизация полученной системы уравнений по пространству осуществляется в свободно-распространяемом программном обеспечении Salome (рис. 5) выделением областей, занятых жидкостью, газом и твердым телом, и с дальнейшим использованием утилиты *splitMeshRegions*. Общее число использованных для генерации расчетной сетки (рис. 5) шестигранных элементов составило более 15 млн.

Численное моделирование рабочих процессов, протекающих в единичной секции маслоохладителя, производилось методом установления. Для дискретизации невязких потоков (в масле и воздухе) применяется противопоточная схема 2-го порядка точности, а для вязких потоков применялись схемы минимизации полной вариации (TVD) и метод *limitedLinear*. Аппроксимация градиентов производилась на основе линейного метода Гаусса. Для ускорения сходимости использовался метод сопряженных градиентов.

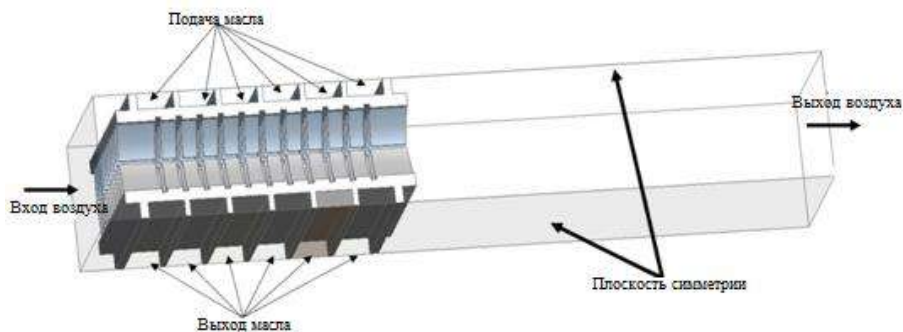


Рис. 4. Расчетная область.

Fig. 4. Calculation domain.

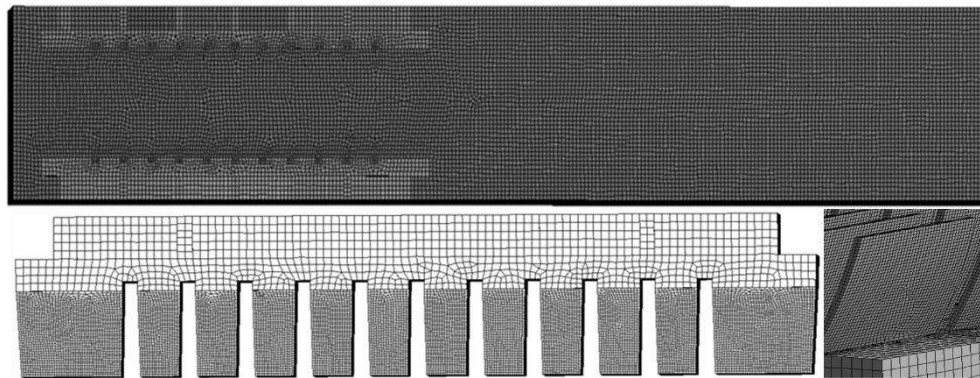


Рис. 5. Расчетная сетка и ее элементы.

Fig. 5. Calculation grid and its elements.

### 3. Анализ результатов численного моделирования

Структура потока воздуха в единичной секции маслоохладителя (рис. 6) характеризуется формированием геометрически обусловленных областей возвратных течений во входной части единичной секции (область *a*, рис. 6), поджатием потока (область *v*, рис. 6) при входе в секцию маслоохладителя, а также формированием возвратных, геометрически обусловленных, структур за единичной секцией маслоохладителя (область *b*, рис. 6). Рассмотрим влияние расстояния между единичными пластинами на геометрические характеристики возвратных зон *a*, *v*, *b*.

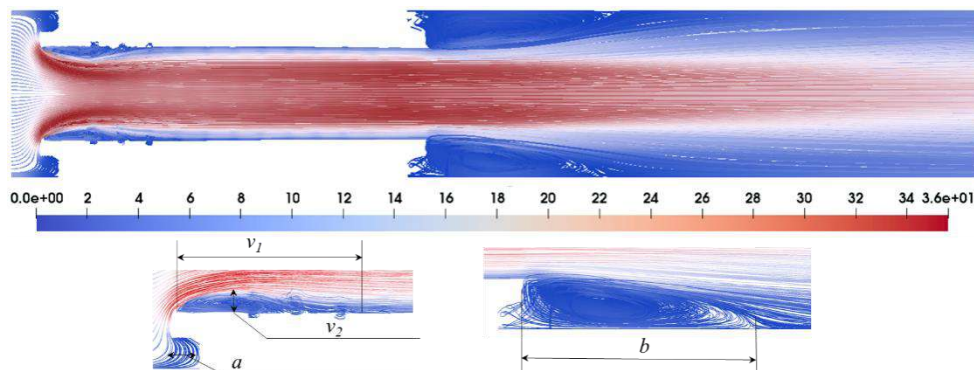


Рис. 6. Обобщенная структура потока воздуха в расчетной области.  
Fig. 6. Generalized structure of air flow in the design domain.

Поскольку рассматриваемая модификация единичных пластин маслоохладителя имеет геометрическое прямоугольное углубление, высота которого определяется высотой каналов для подачи масла, а ширина составляет половину ширины канала для подачи масла (рис. 3 а), то вблизи входной поверхности пластин маслоохладителя, вне зависимости от режима работы оборудования и его геометрических параметров, наблюдается формирование возвратных структур. Однако, анализ результатов численного моделирования сопряженного теплообмена в единичной секции маслоохладителя, показал (рис. 7), что диаметральные размеры вихревой структуры, образующейся в углублениях входной части пластин зависят, в том числе, и от величины зазора  $H$  между пластинами единичной секции.

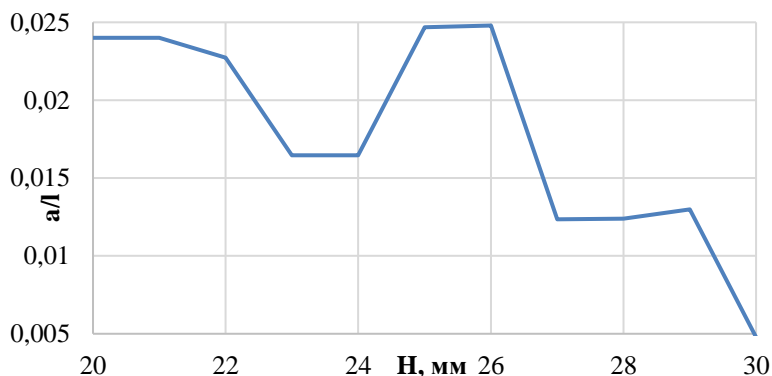


Рис. 7. Изменение диаметального размера пристеночной вихревой структуры  $a$ , отнесенного к длине расчетной области  $l$ , от величины зазора  $H$ .  
Fig. 7. Variation of the diametral size of the near-wall vortex structure  $a$ , related to the length of the computational domain  $l$ , from the gap value  $H$ .

Из рис. 7 видно, что изменение величины зазора существенно влияет на диаметральные размеры возвратной структуры. Можно выделить два диапазона изменения величины зазора между пластинами маслоохладителя, при которых наблюдается существенное увеличение размеров возвратной зоны. Так при изменении величины зазора в диапазоне от 20 до 21 мм относительный диаметр возвратной зоны достигает 0,23 $l$ , и при  $H = 25-26$  мм размеры пристеночного вихря достигают 0,025 мм. Поскольку формирование системы возвратных зон у входа в единичные охлаждающие секции связано с потерями энергии входящего потока воздуха, для повышения эффективности устройства целесообразно минимизировать размеры вихревых зон, что способствует уменьшению потерь скоростного напора воздуха. Наименьшие диаметры вихревых зон зафиксированы при величине зазора между пластинами

27-30 мм, также наблюдается некоторое уменьшение размера вихревой структуры при  $H = 22-24$  мм.

Другой топологической особенностью потока в единичной секции маслоохладителя является образование вихревой области  $v$  (рис. 6), обусловленной внезапным сужением потока при входе в секцию. Поскольку данная область определяет степень поджата потока при входе в охлаждающую секцию, с одной стороны, и влияет на интенсивность теплосъема с оребренной поверхности внутри вихревой зоны, с другой, а также обуславливает дополнительные потери энергии потока воздуха, повышение эффективности работы устройства требует минимизации характерных размеров данной области вблизи входа воздуха в секцию. Установлено, что минимальные размеры области поджата потока достигаются при изменении расстояния между пластинами от 21 до 22 мм (рис. 8).

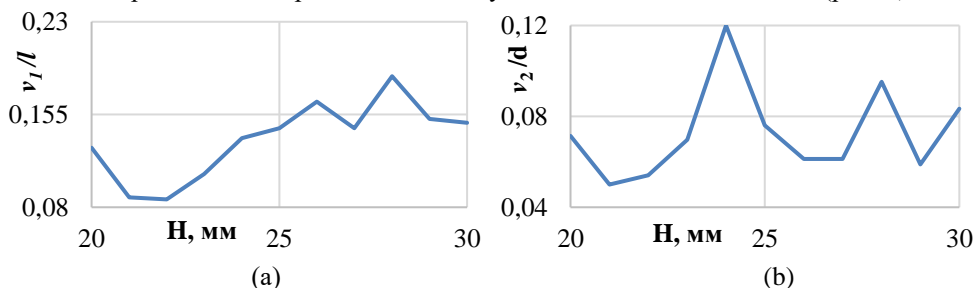


Рис. 8. Изменение относительных длины  $v_1/L$  (a) и высоты  $v_2/d$  (b) области поджата потока  $v$ , от величины зазора  $H$ .  
Fig. 8. Variation of the relative length  $v_1/L$  (a), and height  $v_2/d$  (b) of the flow compression area  $v$ , from the gap value  $H$ .

Увеличение величины зазора между единичными пластинами приводит к существенному увеличению длины  $v_1$  возвратной зоны (рис. 8a), что приводит, к уменьшению площади контакта холодного нагнетаемого воздуха с элементами оребрения пластин. Также наблюдается резкое увеличение высоты возвратной структуры (что увеличивает степень поджата потока во входном сечении и способствует локальному росту продольной скорости воздуха) при увеличении величины зазора  $H$  единичной секции до 24 мм (рис. 8b) и постепенное уменьшение степени поджата потока при последующем увеличении зазора между пластинами единичной секции маслоохладителя.

Из топологических особенностей потока воздуха в единичной секции (рис. 6) целесообразно отметить систему мелкомасштабных вихревых структур, сформированных в технологических бороздках внешней части единичных пластин, а также обратные течения, формируемые за единичной секцией. Размеры и интенсивность мелкомасштабных продольных вихревых структур в углублениях внешней поверхности пластин инвариантны по отношению к расстоянию между этими пластинами и определяются строго характерными размерами бороздок. При этом, изменение расстояния между пластинами влияет на длину  $b$  (рис. 6) обратных вихревых зон за единичной секцией (рис. 9).

Выявлен колебательный характер изменения длины возвратных структур, с достижением локального максимума при  $H = 22$  мм. Дальнейшее увеличение расстояния между пластинами единичной секции маслоохладителя приводит, в тренде, к некоторому незначительному уменьшению длины вихревых структур (рис. 9). Необходимо отметить, что высота областей обратных течений, сформированных за единичной секцией, не превышает высоту единичной пластины, вследствие чего данное течение не оказывает существенного влияния на внутреннюю аэродинамику единичной секции. Однако, наличие такой вихревой структуры вблизи одного из торцов пластины приводит к изменению процессов теплообмена в крайнем канале пластины.

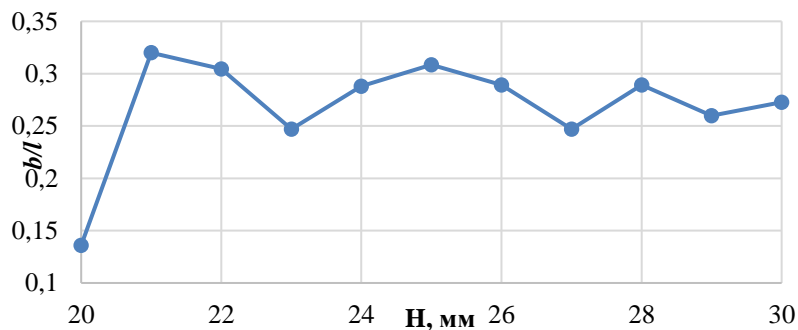


Рис. 9. Изменение относительной длины возвратной зоны  $b/l$  от величины зазора  $H$ .

Fig. 9. Variation of the relative length of the return zone  $b/l$  as a function of the gap  $H$ .

Анализ перестройки структуры потока при увеличении расстояния между единичными охлаждающими пластинами позволил выявить изменение характера истечения воздуха из единичной охлаждающей секции. Так при расстоянии  $H \leq 25$  мм в области горизонтальной оси формируется ядро высокоскоростного потока, характерное для струйного характера течения. Дальнейшее увеличение расстояния (более 25 мм) приводит к уменьшению модуля скорости воздуха в секции маслоохладителя и к изменению характера течения газа: преобладает рассеивание потока газа по объему расчетной области за единичной секцией, без формирования высокоскоростного ядра потока.

Поскольку процессы теплообмена и аэродинамики являются сопряженными, то вышеотмеченные особенности режимов истечения газа из единичной секции маслоохладителя, влияют на интенсивность теплоотвода с оребренной поверхности охлаждающих пластин. Для удобства оценки интенсивности теплосъема в каналах масла на рис. 10 приведена нумерация каналов в единичной секции маслоохладителя.

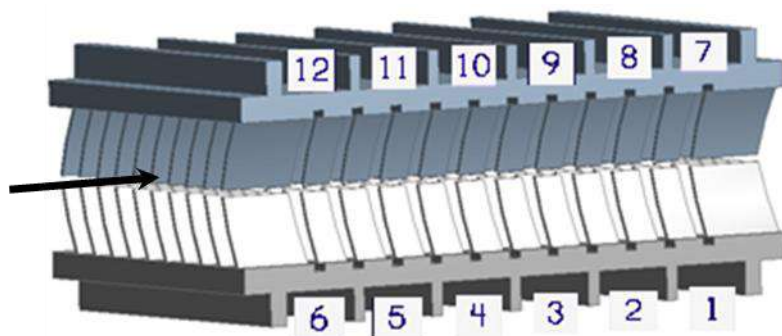


Рис. 10. Нумерация каналов в единичной секции маслоохладителя.

Fig. 10. Numbering of ducts in the unit section of the oil cooler.

Изменение расстояния между пластинами ведет к изменению теплоотдачи (рис. 11). Так, при расстоянии между пластинами в 20 мм максимальная теплоотдача на границе металл/жидкость наблюдается в 1 и 7 каналах пластины, а минимальная в 4, 5, 10 и 11 каналах маслоохладителя. Необходимо отметить, что область 5, 6 и 11, 12 каналов перекрывается вихревой структурой  $v$  (рис.6), которая препятствует проникновению холодного воздуха к оребренной поверхности пластин.

Выявлено, что увеличение расстояние  $H$  между пластинами до 22 мм (рис. 11) приводит к увеличению площади областей эффективного теплосъема: локальный максимум коэффициента теплоотдачи от масла к алюминию достигается в 6 и 9 каналах, коэффициенты

теплоотдачи для каналов 4, 7 близки к максимальным, при этом наименьший коэффициент теплоотдачи на границе металл/жидкость присущ маслу, охлаждающемуся в 1, 11 и 12 каналах.

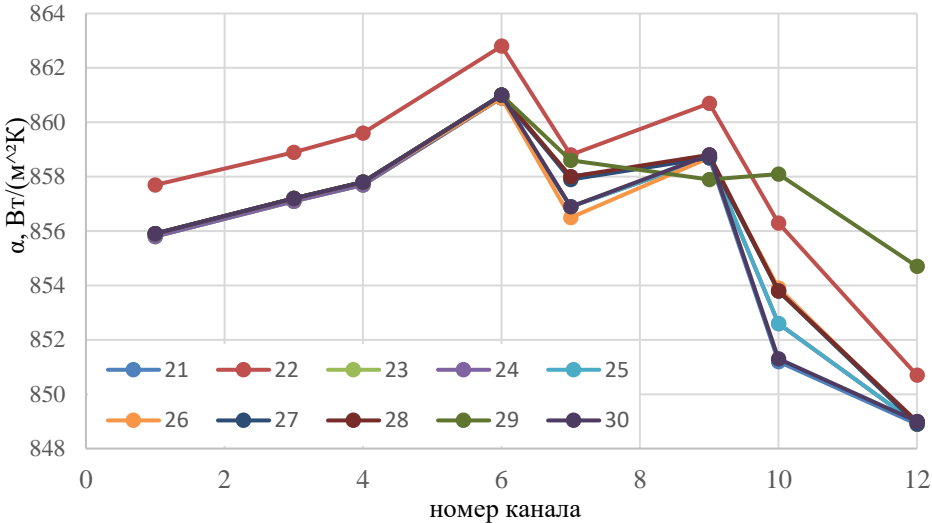


Рис. 11. Зависимость коэффициента теплоотдачи масло/алюминий в каналах единичной секции от величины зазора  $H$ .  
Fig. 11. Dependence of oil/aluminium heat transfer coefficient in the channels of a single section on the gap value  $H$ .

Увеличение величины зазора  $H$  до 30 мм приводит к уменьшению локального максимума коэффициента теплоотдачи от масла к алюминию (рис.11) менее, чем на 1%, однако, средний коэффициент теплоотдачи от масла к металлу уменьшается более чем на 12%. Необходимо отметить, что все полученные значения коэффициентов теплоотдачи масло/алюминий, для одного зазора, изменяются незначительно, в пределах 20 Вт/(м<sup>2</sup>К).

Анализ изменения коэффициента теплоотдачи на границе алюминий воздух показал (рис. 12), что увеличение расстояния между охлаждающими пластинами более 22 мм неэффективно.

Локальное увеличение коэффициента теплоотдачи обусловлено, как ростом теплоотдачи в каналах на границе масло/металл, так и вышеописанными особенностями аэродинамического режима работы единичной секции при расстоянии между охлаждающими пластинами в 22 мм.

#### 4. Заключение

В работе проведено численное моделирование аэрогидрогазодинамики и сопряженного теплообмена в маслоохладителе. Выявлен, описан и обоснован неравномерный нагрев корпуса охлаждающей секции с локализацией температурного максимума в области внутренних центральных каналов. Исследовано влияние величины зазора между пластинами на тепловую эффективность секции, а также на процессы внутренней аэродинамики в секции. Выявлены топологические особенности потока воздуха в единичной секции, проанализировано влияние величины зазора на относительные размеры топологических особенностей. Выявлено и показано, что увеличение расстояние между платинами до 22 мм приводит к увеличению площади областей эффективного теплосъема что обусловлено также и характерными размерами зон возвратных течений, формирующихся при данном

расстоянии между пластинами. Анализ полученных теплофизических характеристик позволил выявить оптимальное расстояние между пластинами маслоохладителя в 22 мм.

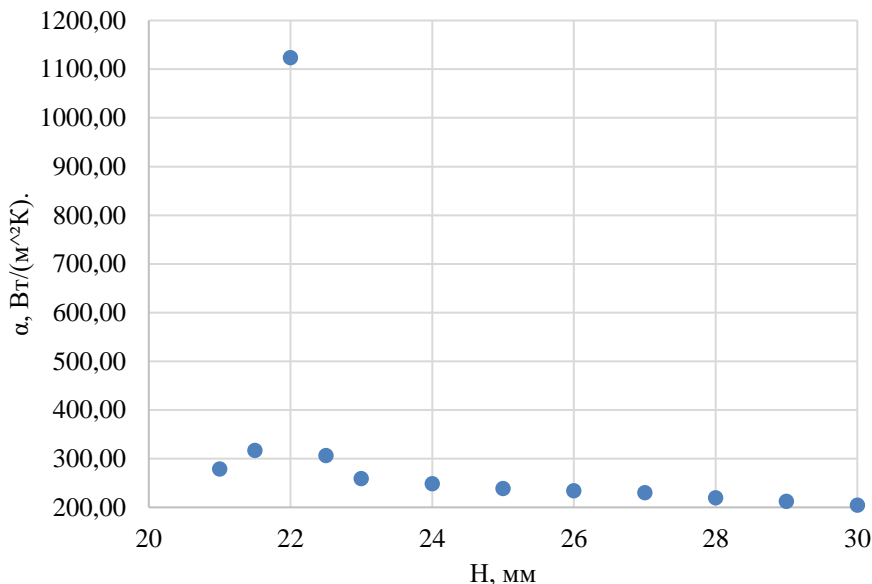


Рис. 12. Зависимость коэффициента теплоотдачи алюминий/воздух от величины зазора  $H$ .

Fig. 12. Dependence of aluminium/air heat transfer coefficient on the gap size  $H$ .

## Список литературы / References

- [1]. Зиннатуллин Н.Х., Ильин В.К., Хайбуллина А.И. 3-63 Нагнетатели и тепловые двигатели, Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2016. – 158 с.
- [2]. Du Toit C.G., Kroger D.G. Modelling of the recirculation in mechanical-draught heat exchangers // R&D Journal, 1993, vol. 9, No. 1, pp. 2-8.
- [3]. Zhao W., Wang Q., Liu P. The experimental investigation of recirculation of air-cooled system for a large power plant // Energy and Power Engineering, 2010, No. 2, pp. 291-297.
- [4]. Xing Xuea, Xianming Fenga, Junmin Wanga, Fang Liu, Modeling and Simulation of an Air-cooling Condenser under Transient Conditions // Procedia Engineering, 2012, № 31, pp. 817 – 822.
- [5]. Чернов Н.С. Техничко-экономическая оценка эффективности теплообменных аппаратов // Автомобильная промышленность, 2011, № 3, с. 33-35.
- [6]. Леонтьев А. И., Олимпиев В. В. Теплофизика и теплотехника перспективных интенсификаторов теплообмена (обзор) // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2011. № 1. с. 7-31.
- [7]. Попов И.А., Махянов Х.М., Гуреев В.М. Интенсификация теплообмена. Физические основы и промышленное применение интенсификации теплообмена. Казань: Центр инновационных технологий, 2009. 560 с.
- [8]. Жукаускас А.А. Конвективный перенос в теплообменниках / А.А. Жукаускас. М.: Наука, 1982. 472 с.
- [9]. Глухарев А.С., Навасардян Е.С. Повышение эффективности теплообменных аппаратов за счет оребрения внутритрубного пространства // Молодежный научно-технический вестник ФС77-51038, 2017, №1, <http://sntbul.bmstu.ru/doc/854258.html>.
- [10]. Lambert T. Automated Boundary Layer Mesh Generation for Simulation of Convective Cooling, Bachelor Thesis Defense, MathCCES Lunch Seminar, RWTH Aachen University, 10 April, 2018, 90 p.
- [11]. Shoji Y., Sato K., Oliver D. R. Heat Transfer Enhancement in Round Tube Using Coiled Wire: Influence of Length and Segmentation // Heat Transf. Asian Res, 2003, vol. 32, pp. 99–107.
- [12]. Garcia A., Vicente P. G., Viedma A. Experimental Study of Heat Transfer Enhancement with Wire Coil Inserts in Laminar-Transition-Turbulent Regimes at Different Prandtl Numbers // Int. J Heat Mass Transf., 2005, vol. 48, pp. 4640–4651.

- [13]. Liu S., Sakr M. A Comprehensive Review on Passive Heat Transfer Enhancements in Pipe Exchangers // *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2013, vol. 19, pp. 64–81.
- [14]. Rahai H. R., Wong T. W. Velocity Field Characteristics of Turbulent Jets from Round Tubes with Coil Inserts // *Appl. Therm. Eng.*, 2002, vol. 22, pp. 1037–1045.
- [15]. Армянин А. Ю., Байметова Е. С., Хвалько М. Е. Особенности теплового режима маслоохладителя с развитой внешней поверхностью // *Химическая физика и мезоскопия*. 2022, т. 24, № 1. С.93 – 103. <https://doi.org/10.15350/17270529.2022.1.8>.
- [16]. Baymetova E. S., Chernova A. A., Koroleva M. R., Kelemen M. Optimization of the developed outer surface of an industrial oil cooler // *MM Science Journal*, 2021, vol. 2021, No. June, pp. 4764-4768. [https://doi.org/10.17973/MMSJ.2021\\_10\\_2021027](https://doi.org/10.17973/MMSJ.2021_10_2021027).
- [17]. Байметова Е. С. Определение оптимальных конструктивных параметров теплообменной секции путем численного моделирования // *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*. 2022. № 2. с. 45-54. <https://doi.org/10.17804/2410-9908.2022.2.045-054>.
- [18]. Байметова Е.С., Чернова А.А., Шигапова А.Р. Аэродинамика плохообтекаемых тел на примере конвективного теплообменного аппарата // *Химическая физика и мезоскопия*. 2024, т. 26, № 2, с. 143-154.
- [19]. Байметова Е. С. Численное моделирование гидродинамических процессов в многоканальном коллекторе // *Труды МАИ*. 2023. № 130, 8. <https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-08>.
- [20]. Байметова Е.С., Митрюкова Е.А. Численное и экспериментальное исследование гидродинамики теплообменного аппарата // *Труды Института системного программирования РАН*. 2023, т. 35, № 6, с. 235-246. [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2023-35\(6\)-15](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2023-35(6)-15).
- [21]. Королева М. Р., Терентьев А. Н., Чернова А. А. Гидродинамика коллектора сложной формы // *Вестник РГТА имени П.А. Соловьева*. 2021. № 3 (58), с. 50-55.
- [22]. Байметова Е.С., Хвалько М.Е., Армянин А.Ю. Моделирование сопряженного теплообмена в микроканалах в среде openFOAM // *Труды Института системного программирования РАН*. 2022, т. 34. № 5. с. 205-214. [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2022-34\(5\)-14](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2022-34(5)-14).
- [23]. Гарбарук А.В., Стрелец М.Х., Шур М.Л. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений: Учебное пособие. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. - 88 с.
- [24]. Menter F. R., Kuntz M., Langtry R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model // *Proceedings of the Fourth International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer*. Antalya, Turkey, 12-17 October, 2003, pp. 625-632.
- [25]. Fined ChtMultiRegionFoamOpenFoam. Solver for steady or transient fluid flow and solid heat conduction, with conjugate heat transfer between regions, buoyancy effects, turbulence, reactions and radiation modelling. URL: <https://openfoamwiki.net/index.php/ChtMultiRegionFoam> (дата обращения 21.02.2023).

## **Информация об авторах / Information about authors**

Алена Алексеевна ЧЕРНОВА – доктор технических наук, профессор кафедры Тепловые двигатели и установки. Сфера научных интересов: газодинамика, гидродинамика, конвективный теплообмен, теплопередача, математическое моделирование.

Alena Alekseevna CHERNOVA – Dr. Sci. (Tech.), Professor, Department of Thermal Engines and Installations, Kalashnikov Izhevsk State Technical University. Research interests: gas dynamics, hydrodynamics, convective heat exchange, heat transfer, mathematical modeling.

Айгуль Расимовна ШИГАПОВА – старший преподаватель кафедры Тепловые двигатели и установки Ижевского государственного технического университета имени М.Т. Калашникова. Сфера научных интересов: газодинамика, сопряженные процессы, математическое моделирование.

Aigul Rasimovna SHIGAPOVA is a senior lecturer at the Department of Thermal Engines and Installations, Kalashnikov Izhevsk State Technical University. Research interests: gas dynamics, coupled processes, mathematical modelling.

DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(2)-11



## Численное исследование турбулентного диффузионного пламени на поверхности полиметилметакрилата на основе открытого пакета FDS

*Г. Морар, ORCID: 0000-0002-1261-0370 <morar@udman.ru>  
А.И. Карпов, ORCID: 0000-0001-8380-1599 <karpov@udman.ru>  
А.А. Шаклеин, ORCID: 0000-0002-3603-4443 <shaklein@udman.ru>*

*Удмуртский федеральный исследовательский центр УроРАН,  
426067, Россия, Ижевск, ул. Т. Барамзиной, д. 34.*

**Аннотация.** Проведено численное исследование турбулентного диффузионного пламени на поверхности полиметилметакрилата (ПММА). Для проведения расчетов использовалась программа с открытым кодом Fire Dynamics Simulator (FDS), в которой использовался метод LES для моделирования турбулентного пламени. Для визуализации результатов использовалась программа SmokeView, которая является модулем пакета FDS. По результатам исследования определены размеры области вблизи поверхности горения, в которой наблюдается ламинарный режим течения. Предлагается алгоритм для решения сопряженной задачи распространения турбулентного пламени по поверхности горючего материала. Алгоритм сопряженной задачи состоит в совместном расчете ламинарного пламени вблизи поверхности горения и турбулентного режима в остальной области.

**Ключевые слова:** диффузионное пламя; турбулентное горение; численное моделирование; пакет Fire Dynamics Simulator.

**Для цитирования:** Морар Г., Карпов А.И., Шаклеин А.А. Численное исследование турбулентного диффузионного пламени на поверхности ПММА на основе открытого пакета FDS. Труды ИСП РАН, том 37, вып. 2, 2025 г., стр. 153–162. DOI: 10.15514/ISPRAS–2025–37(2)–11.

**Благодарности:** работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 25-29-00148).

## Numerical Study of the Turbulent Diffusion Flame on the PMMA Surface using FDS

G. Morar, ORCID: 0000-0002-1261-0370 <morar@udman.ru>

A.I. Karpov, ORCID: 0000-0001-8380-1599 <karpov@udman.ru>

A.A. Shaklein, ORCID: 0000-0002-3603-4443 <shaklein@udman.ru>

*Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
34, Tatyana Baramzina st., Izhevsk, 426067, Russia.*

**Abstract.** This study investigates the complex processes involved in the propagation of turbulent flames over solid combustible materials. Employing the Large Eddy Simulation (LES) technique within the Fire Dynamics Simulator (FDS), a detailed numerical investigation of flame structure and propagation were conducted. Obtained results reveal significant influences of turbulence on the flame's behavior, including fluctuations in temperature, velocity, and species concentrations. A notable finding of this study is the presence of a distinct laminar-like sublayer adjacent to the burning surface. This region exhibits significantly reduced turbulence intensity and is characterized by more stable temperature and species profiles compared to the fully turbulent regions of the flame. The coexistence of laminar and turbulent regimes within the flame has important implications for understanding flame spread rates and heat transfer mechanisms. Furthermore, our simulations highlight the role of buoyancy-driven flow in shaping the overall flame structure and propagation. The interaction between buoyancy forces and turbulent fluctuations leads to complex flow patterns and enhances mixing within the flame. Comparing our numerical results with experimental data, was demonstrated the ability of the LES model to accurately capture the essential features of turbulent flame spread. The findings of this study provide valuable insights into the underlying physics of turbulent flame spread. The detailed understanding of flame structure and propagation mechanisms gained from this work can be leveraged to develop more accurate and predictive models for fire safety engineering. Future research can focus on exploring the effects of different material properties, ambient conditions, and flame geometries on turbulent flame spread.

**Keywords:** diffusion flame; turbulent combustion; numerical simulation; Fire Dynamics Simulator.

**For citation:** Morar G., Karpov A.I., Shaklein A.A. Numerical Study of the Turbulent Diffusion Flame on the PMMA Surface using FDS. *Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS*, vol. 37, issue 2, 2025. pp. 153-162 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(2)-11.

**Acknowledgements.** This work was supported by the Russian Science Foundation (Project № 25-29-00148).

### 1. Введение

Турбулентность, скорость протекания химических реакций, тепломассоперенос и другие процессы, протекающие при горении, требуют детального анализа. Численное моделирование турбулентного диффузионного пламени представляет собой актуальную задачу в области пожарной безопасности, так как предсказание поведения пламени позволяет разрабатывать эффективные системы пожаротушения, а также дополнительные меры для предотвращения распространения огня.

На данный момент существует множество работ (как экспериментальных, так и теоретических), посвященных численному исследованию диффузионного пламени, распространяющегося по поверхности твердых горючих материалов. Отдельно можно отметить работу [1], в которой произведен достаточно обширный анализ режимов пламени, методов и подходов, применяющихся для решения задач, связанных с распространением пламени, а также произведен большой обзор литературных источников по данной теме.

Численное моделирование турбулентного горения – это сложная задача, требующая детального описания физических процессов в газофазном пламени. Наличие турбулентных пульсаций при распространении пламени вверх по вертикальной поверхности очевидно (рис. 1а), а при распространении пламени по горизонтальной поверхности (рис. 1б) и вниз по вертикальной поверхности (рис. 1с) можно заметить, что общий режим течения –

турбулентный, однако вблизи поверхности горения есть основания полагать, что течение является ламинарным.

Существование области с ламинарным режимом течения вблизи поверхности горения может служить основанием для разработки нового (или модификации уже существующего) численного метода для оценки скорости распространения турбулентного пламени. В работе [2] показано, что применение допущения ламинарного режима в двухмерной постановке дает хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных по скорости распространения пламени, однако, такое допущение справедливо для определения стационарной скорости распространения пламени по поверхности. Если же ставится задача определения параметров по всей области, в том числе и всего факела пламени, то необходимо также рассматривать турбулентный перенос.

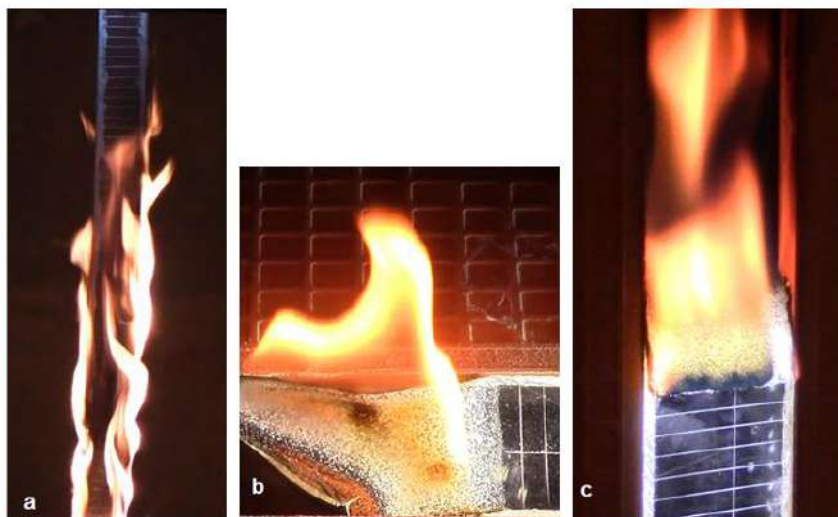


Рис. 1. Конфигурации распространения пламени; а – вверх, b – горизонтальное, с – вниз.

Fig. 1. Flame spread modes; a – upward, b – horizontal, c – downward.

Для моделирования турбулентности используются различные параметрические модели, которые представляют собой осреднение уравнений Навье-Стокса по времени (например, метод RANS), однако реальная картина течения, представленная на рис. 1, отображает существование крупномасштабных пульсаций, что делает невозможным применение RANS моделей, поскольку они предполагают мелкомасштабную изотропную турбулентность. Также существует метод прямого численного моделирования (DNS), который обеспечивает точное описание турбулентности, однако этот метод требует больших вычислительных ресурсов, поэтому в данной работе он не используется. Помимо вышеперечисленных методов для описания турбулентности также используются различные вихреразрешающие модели, как например LES, которая была выбрана для численного исследования турбулентного диффузионного пламени как наиболее оптимальный вариант для решения поставленной задачи. Для использования таких подходов необходимо решать трехмерные уравнения и в работе [3] показано, что использование трехмерных уравнений для решения задач о распространении пламени по поверхности горючего материала достаточно ограничено.

Для проведения численного исследования турбулентного диффузионного пламени, распространяющегося по поверхности твердых материалов, используются различные программные продукты, каждый из которых обладает уникальными характеристиками, определяющими область их применения. Из коммерческих программ можно отметить Ansys, который представляет собой широко используемый инструмент для численного

моделирования задач механики жидкости и газа и теплообмена. Однако его высокая стоимость и ограниченная возможность выбора моделей делают его не очень подходящим для исследовательских задач. Помимо Ansys существует COMSOL, который позволяет моделировать различные физические задачи, в том числе и горение, однако универсальность данного программного пакета может приводить к потере производительности и точности при решении узкоспециализированных задач. Из свободно распространяемых продуктов можно отметить OpenFOAM – это открытая платформа для численного моделирования задач механики жидкости, которая обладает высокой гибкостью и предоставляет возможность изменять исходные решатели, описывающие различные физические модели, для решения различных задач. Также можно отметить пакет Fire Dynamics Simulator (FDS) [4], который является специализированным свободно распространяемым программным комплексом, разработанным для моделирования динамики пожаров. Каждая из программ имеет свои особенности и ограничения, и выбор конкретного продукта зависит от поставленной задачи, требуемой точности и доступных вычислительных ресурсов. В данной работе используется FDS, поскольку он ориентирован на решения задач, связанных с горением и распространением пламени, а также содержит не только большой набор моделей турбулентности, но и позволяет использовать различные (детальные и сокращенные) механизмы химических реакций, которые позволяют учитывать большой спектр горючих веществ.

## 2. Постановка задачи

Помимо вышеперечисленного, FDS дает возможность также моделировать теплоперенос, химическую кинетику и разные виды теплообмена. В данной программе можно задавать необходимые начальные и граничные условия, выбирать разные модели для описания горения и турбулентности, а также настраивать дополнительные параметры расчета. Также стоит отметить, что программа предоставляется вместе со всеми исходными файлами, что позволяет при необходимости самостоятельно менять исходный код, добавляя собственные методы расчета или корректируя существующие. FDS поставляется в комплекте с программой для визуализации SmokeView, которая позволяет обрабатывать полученные в результате моделирования данные.

### 2.1 Модель газовой фазы

Для описания газовой фазы в FDS используются уравнения Навье-Стокса в приближениях для малых числе Маха ( $Ma < 0.3$ ) для многокомпонентной реагирующей среды. В модель входят следующие уравнения:

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

Уравнение компонентов смеси:

$$\frac{\partial \rho Y_\alpha}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j Y_\alpha}{\partial x_j} = - \frac{\partial}{\partial x_j} \frac{\mu}{Sc_\alpha} \frac{\partial Y_\alpha}{\partial x_j} + r_\alpha''', \quad (2)$$

где  $Y_\alpha$  – массовая доля компонента  $\alpha$ ,  $\mu$  – динамическая вязкость,  $Sc_\alpha$  – число Шмидта,  $r_\alpha'''$  – скорость образования компонента  $\alpha$  в ходе химической реакции.

Уравнение переноса импульса:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j u_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g, \quad (3)$$

где  $P$  – полное давление,  $\tau_{ij}$  – компоненты тензора касательных напряжений,  $g$  – ускорение свободного падения.

Уравнение переноса энергии:

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j h}{\partial x_j} = \frac{\partial P}{\partial t} - \frac{\partial q_j''}{\partial x_j}, \quad (4)$$

где  $h$  – энтальпия смеси,  $q_j''$  – тепловые потоки, связанные с теплопроводностью, диффузией и тепловым излучением.

Уравнение состояния:

$$\rho = \frac{PM}{RT} \quad (5)$$

Для моделирования турбулентного течения в данной работе используется метод LES, ширина фильтра для этого метода в FDS определяется следующим образом:

$$\Delta = (\delta x \delta y \delta z)^{1/3} \quad (6)$$

Для замыкания используется уравнение Дидорфа для турбулентной вязкости:

$$\mu_{LES}/\rho = C_V \Delta \sqrt{k_{sgs}}, \quad (7)$$

где  $C_V = 0.1$  – безразмерный коэффициент,  $k_{sgs}$  – подсеточное значение кинетической энергии, определяемое как:

$$k_{sgs} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 (\tilde{u}_i - \hat{u}_i)^2, \quad (8)$$

где  $\tilde{u}_i$  – скорость, которая разрешается на сетке,  $\hat{u}_i$  – скорость, которая определяется на расширенном сеточном шаблоне.

Все перечисленные уравнения переписываются с учетом фильтра, например, отфильтрованное уравнение переноса импульса принимает вид:

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{u}_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tilde{\tau}_{i,j} + \tau_{i,j}^{sgs}) + (\bar{\rho} - \rho_0) g_i, \quad (9)$$

где  $\tilde{u}_i, \tilde{u}_j$  – компоненты скорости, которые разрешаются на сетке,  $\tilde{\tau}_{i,j}$  и  $\tau_{i,j}^{sgs}$  – компоненты тензоров разрешенных и подсеточных касательных напряжений.

Компоненты тензора подсеточных напряжений находятся из утверждения о том, что между анизотропной частью тензора напряжений и разрешенным тензором скорости существует линейная связь:

$$\tilde{\tau}_{i,j} + \tau_{i,j}^{sgs} - \frac{1}{3} \tau_{k,k}^{sgs} \delta_{i,j} = -2(\mu + \mu_{sgs}) \left( \tilde{S}_{i,j} - \frac{1}{3} \delta_{i,j} \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} \right), \quad (10)$$

где  $\tilde{S}_{i,j}$  – разрешенные компоненты тензора скоростей сдвиговых деформаций на сетке:

$$\tilde{S}_{i,j} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (11)$$

## 2.2 Модель горения

Реакция окисления горючего описывается одностадийной необратимой моделью, в которой стехиометрическое уравнение реакции описывается следующим образом:



Для каждого обобщенного компонента решается отфильтрованное уравнение переноса:

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{Z}_\alpha}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{Z}_\alpha}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu}{Sc_\alpha} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial \tilde{Z}_\alpha}{\partial x_j} + \tilde{m}_\alpha''' \quad (13)$$

Массовые доли отдельных компонентов  $\tilde{Y}_\alpha$  определяются из массовых долей обобщенных компонентов с помощью матрицы массовых долей:

$$\begin{pmatrix} \tilde{Y}_{fuel} \\ \tilde{Y}_{O_2} \\ \tilde{Y}_{N_2} \\ \tilde{Y}_{CO_2} \\ \tilde{Y}_{H_2O} \\ \tilde{Y}_C \\ \tilde{Y}_{CO} \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} \tilde{Z}_{Fuel} \\ \tilde{Z}_{Air} \\ \tilde{Z}_{Products} \end{pmatrix} \quad (14)$$

Чтобы определить  $\tilde{m}_\alpha'''$  – скорость образования химических компонентов, в FDS используется модель турбулентного горения:

$$\tilde{m}_\alpha''' = -\rho \frac{\min(\tilde{Z}_{Fuel}, \tilde{Z}_{Air} / \sigma_{air})}{\tau_{mix}}, \quad (15)$$

где  $\tilde{Z}_{Fuel}$ ,  $\tilde{Z}_{Air}$  – массовые доли обобщенных компонентов топлива и воздуха,  $\sigma_{air}$  – массовый стехиометрический коэффициент воздуха.

Время перемешивания компонентов  $\tau_{mix}$  определяется по следующей формуле: **[Ошибка! Источник ссылки не найден.]**

$$\tau_{mix} = \min(\tau_d, \tau_u, \tau_g), \quad (16)$$

где  $\tau_d$  – временной масштаб диффузии,  $\tau_u$  – временной масштаб турбулентного перемешиваний,  $\tau_g$  – временной масштаб естественной конвекции.

### 3. Реализация методики расчета

Процессы, протекающие в твердом материале, в данной работе не рассматриваются, а моделируется «горелка», которая представляет собой горящую поверхность полиметилметакрилата (ПММА). Для расчета газовой фазы используются следующие настройки программы: моделирование турбулентности осуществляется по методу LES (Large Eddy Simulation) с замыканием Deardoff для подсеточной вязкости; расчет концентрации реагентов проводится с использованием обобщенной координаты реакции; турбулентное диффузионное горение описывается бесконечно быстрой реакции по модели перемешивания (Eddy Dissipation Concept, EDC); радиационный теплоперенос рассчитывается по приближению серого газа; разностная аппроксимация проводится по явной схеме второго порядка на структурированной равномерной сетке в декартовой системе координат [5].

На рис. 2 показана расчетная схема, которая представляет собой открытую область по всем границам (размеры указаны на рисунке). Сетка однородна по всем осям x, y, z, а размер одной ячейки составляет 2.5 мм. Горящая поверхность представляет собой квадрат 5x5 см (на рис. 2 обозначено синим цветом). В газовой фазе рассчитывается одностадийная макроскопическая реакция горения метилметакрилата (продукта пиролиза ПММА)  $C_5H_8O_2$  с молярной массой 100 г/моль и теплотой реакции 25.6 МДж/кг. Температура поверхности равна 450°C, так как для сравнения используются данные из работы [2], где принята такая же температура.

### 4. Результаты расчетов

Рис. 3 отображает мгновенные распределения температуры диффузионного пламени в различные моменты времени (интервалы соответствуют используемому в расчете шагу по времени). Данные распределения получены с помощью SmokeView. На этих изображениях видны существенные крупномасштабные пульсации в факеле пламени, а также заметно, что в разные моменты времени пламя не является стационарным, в отличие от ламинарного

течения. Картинка качественно соответствует экспериментальным данным представленным на рис. 1.

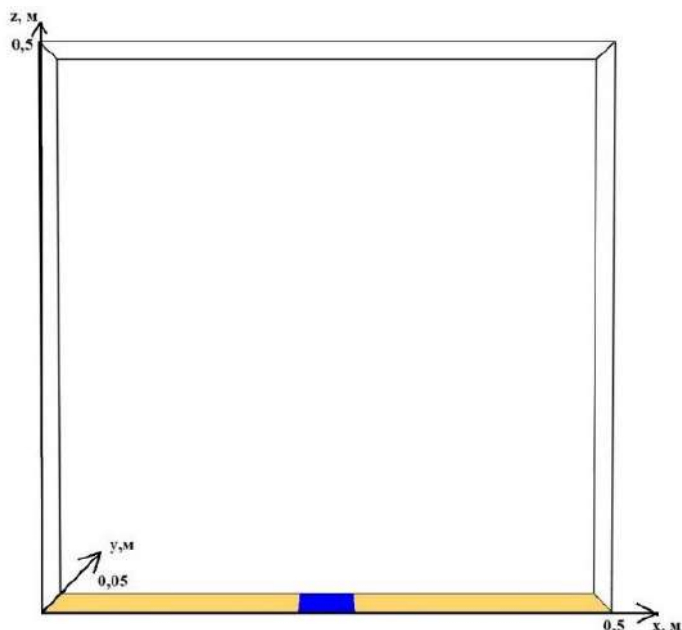


Рис. 2. Схема расчетной области.  
Fig. 2. Arrangement of computation domain.

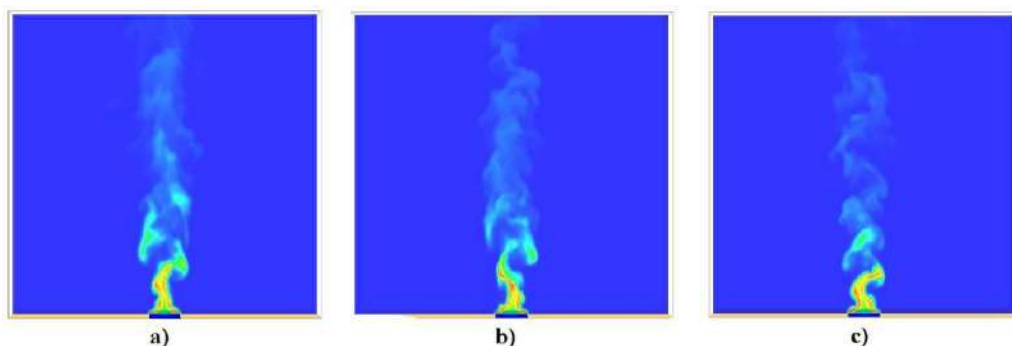


Рис. 3. Структура турбулентного пламени в моменты времени:  
a) 32.3 с; b) 32.7 с; c) 33 с

Fig.3. Turbulent flame structure at the time moments: a) 32.3 s, b) 32.7 s, c) 33 s.

Далее рассматривается полученные в результате расчетов поля температур на разных расстояниях от поверхности горения и сравниваются со значениями расчетов, проведенных для ламинарного потока (данные для сравнения взяты из работы [2]). Рис. 5 показывает, что на высоте в 2.5 мм от поверхности профили температур для турбулентного и ламинарного пламени весьма близки, и пульсации температуры при турбулентном режиме практически отсутствуют.

При рассмотрении профилей температур на высоте 5 мм (рис. 5) и выше (рис. 6) видно, что для турбулентного режима горения характерно пульсирующее распределение температуры, а ламинарное пламя остается стационарным в каждый момент времени. Так же очевидно, что несмотря на одинаковую длину поверхности горения (5 см), ширина турбулентного пламени

значительно шире, чем ламинарного, что связано с наличием интенсивного турбулентного перемешивания.

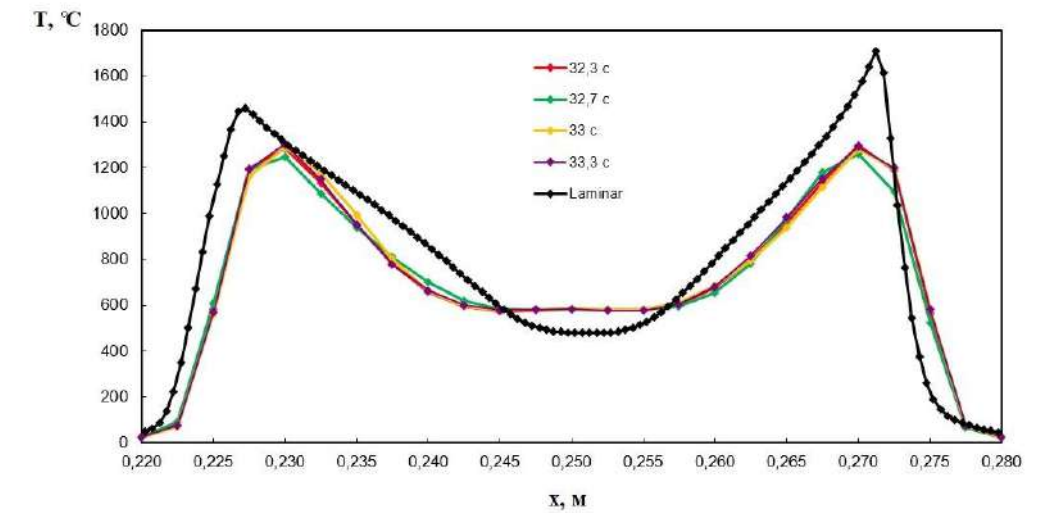


Рис. 4. Распределение температуры пламени на высоте 2.5 мм от поверхности; номера кривых соответствуют моментам времени для турбулентного пламени.  
Fig. 4. Temperature distribution in flame on the height of 2.5 mm from the surface; curve numbers correspond to the time moment for turbulent flame.

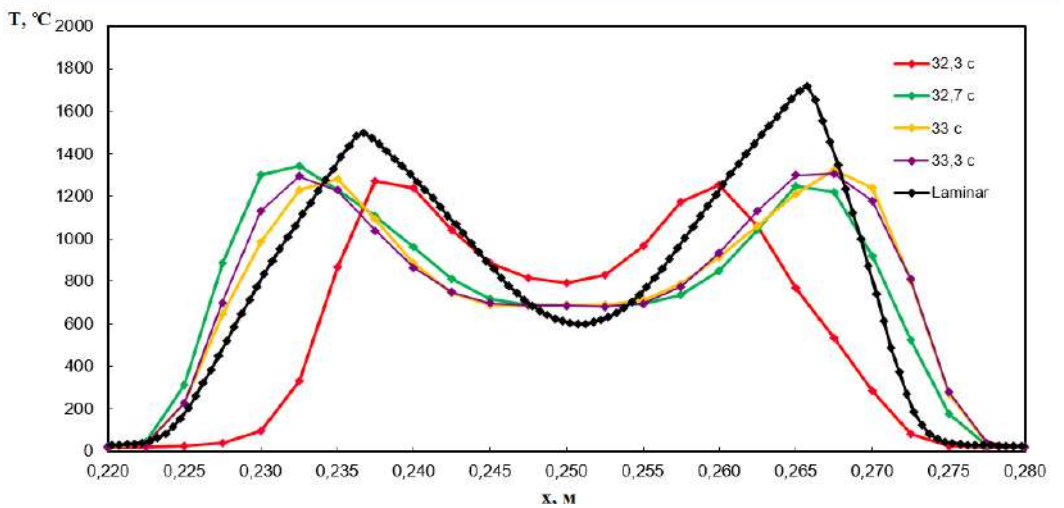


Рис. 5. Распределение температуры пламени на высоте 5 мм от поверхности; номера кривых соответствуют моментам времени для турбулентного пламени.  
Fig. 5. Temperature distribution in flame on the height of 5 mm from the surface; curve numbers correspond to the time moment for turbulent flame.

5. Заключение

Методы турбулентности на основе LES подхода позволяют составить адекватную численную модель турбулентного диффузионного пламени, и программа Dire Dynamic Simulator хорошо себя показала для решения подобного рода задач. Однако, помимо исследования тепловой структуры пламени, также интересно изучение скорости распространения пламени по

поверхности горючих материалов. Такая задача является сопряженной, т.к. необходимо рассматривать взаимодействие газовой реакции горения и термического разложения твердого горючего. При этом для точного исследования теплового потока на поверхности (который, несомненно, будет влиять на скорость распространения пламени) необходима мелкая сетка, которая не обеспечивается при решении методом LES. Существуют подходы, описанные в работах [6, 7], которые заключаются в корректировке температуры в пристеночной области, однако несмотря на успешное применение этих подходов, их сложно считать универсальными, поскольку в них используются дополнительные эмпирические параметры.

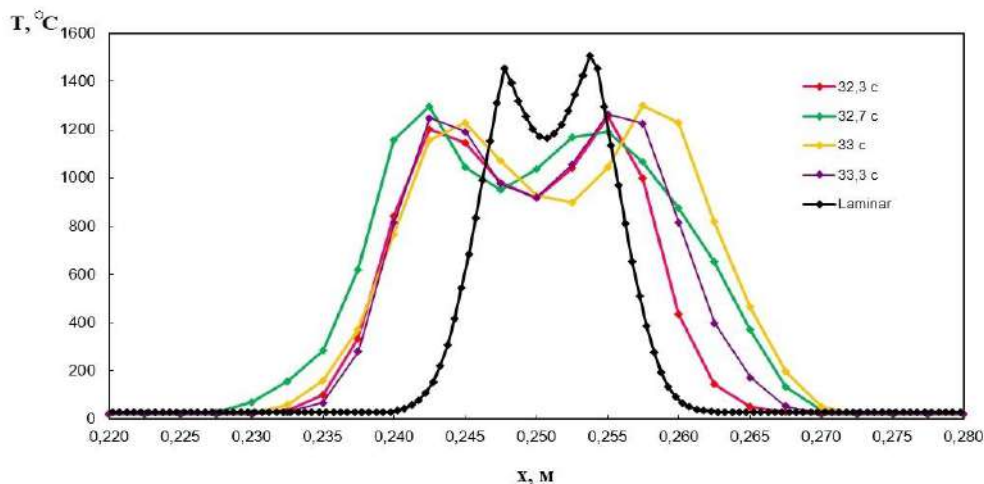


Рис. 6. Распределение температуры пламени на высоте 25 мм от поверхности; номера кривых соответствуют моментам времени для турбулентного пламени.

Fig. 6. Temperature distribution in flame on the height of 25 mm from the surface; number of curves corresponds to the time moment for turbulent flame.

В данном исследовании проведено численное моделирование турбулентного диффузионного пламени для продукта пиролиза полиметилметакрилата и полученные данные показывают наличие ламинарной области вблизи поверхности горения на расстоянии до 2,5 мм. Полученные результаты говорят о том, что в дальнейшем для решения задачи распространения пламени можно использовать следующий алгоритм: исследуемая область делится на две части: вблизи поверхности горения проводится расчет на мелкой сетке (порядка 0,5 мм и меньше) для определения скорости распространения пламени вблизи поверхности горения. Полученные параметры будут граничными условиями для второй области, в которой производится расчет турбулентного горения, и полученные значения осредненных параметров пламени будут являться граничными условиями для решения ламинарного течения в нижней области вблизи поверхности горения.

Подобный алгоритм требует изменения исходного кода FDS, так как на данный момент в программе не предусмотрены функции, которые подходили бы для подобного рода задач. Так же в ходе исследования были обнаружены некоторые неточности в исходном коде (такие как, например, определение скорости протекания химических реакций), которые были исправлены.

## Список литературы / References

- [1]. Маркус Е.С. Распространение турбулентного естественно-конвективного пламени по поверхности твёрдых горючих материалов. Дис. ... канд. техн. наук. СПбПУ. – СПб., 2020. – 215 с.

- [2]. Karpov A. I., Korobeinichev O. P., Shaklein A. A., Bolkisev A. A., Kumar A., Shmakov A. G. Numerical study of horizontal flame spread over PMMA surface in still air // *Applied Thermal Engineering*, 2018, vol. 144, pp. 937-944. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.08.106>.
- [3]. Snegirev A., Kuznetsov E., Korobeinichev O., Shmakov A., Paletsky A., Shvartsberg V., Trubachev S. Fully Coupled Three-Dimensional Simulation of Downward Flame Spread over Combustible Material // *Polymers*, 2022, vol.14, 4136. <https://doi.org/10.3390/polym14194136>.
- [4]. McGrattan K., Hostikka S., Floyd J., McDermott R., Vanella M. Fire Dynamics Simulator, Technical Reference Guide, Volume 1: Mathematical Model, NIST Special Publication 1018-1, Sixth Edition, November 2021. <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.SP.1018>.
- [5]. Г. Морар, А. И. Карпов, А. А. Шаклеин Численное исследование тепловой структуры турбулентного диффузионного пламени на горизонтальной поверхности ПММА // *Химическая физика и мезоскопия*, т.24, вып.4, 2018, стр. 463-472 <https://doi.org/10.15350/17270529.2022.4.38>.
- [6]. Fukumoto K., Wang C., Wen J. Large eddy simulation of upward flame spread on PMMA walls with a fully coupled fluid–solid approach // *Combustion and Flame*, 2018, vol. 190, pp. 365-387. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2017.11.012>.
- [7]. Zeinali D., Gupta A., Maragkos G., Agarwal G., Beji T., Chaos M., Wang Y., Degroote J., Merci B. Study of the importance of non-uniform mass density in numerical simulations of fire spread over MDF panels in a corner configuration // *Combustion and Flame*, vol. 200, pp 303-315. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2018.11.020>.

### **Информация об авторах / Information about authors**

Габриела МОРАР – младший научный сотрудник, УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, Российская Федерация. Сфера научных интересов: численное моделирование процессов горения, горение полимеров, тепло- и массообмен.

Gabriela MORAR – Junior Researcher, Post-Graduate Student, Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russian Federation. Research interests: numerical simulation of combustion processes, polymer combustion, heat and mass transfer.

Александр Иванович КАРПОВ – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, Российская Федерация. Сфера научных интересов: математические модели, вычислительные алгоритмы и программные комплексы для решения сопряженных задач тепломассообмена, газовой динамики и химической кинетики.

Alexander Ivanovich KARPOV – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Chief Researcher, Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russian Federation. Research interests: mathematical models, computational algorithms, and software packages for solving coupled problems of heat and mass transfer, gas dynamics, and chemical kinetics.

Артём Андреевич ШАКЛЕИН – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, Российская Федерация. Сфера научных интересов: численное моделирование, горение, полимеры, тепло- и массообмен.

Artem Andreevich SHAKLEIN – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russian Federation. Research interests: numerical modeling, combustion, polymers, heat and mass transfer.

DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(2)-12



## Математическое моделирование турбулентного потока жидкости с помощью квазигидродинамических уравнений и модели турбулентности k-omega

*К.С. Королёва, ORCID: 0000-0002-8872-0277 <snigur.ks@ccfebras.ru>*

*И.И. Потапов, ORCID: 0000-0002-3323-2727 <potapov2i@gmail.com>*

*Вычислительный центр Дальневосточного отделения Российской академии наук,  
Россия, 680000, г. Хабаровск, ул. Ким Ю Чена, д. 65.*

**Аннотация.** В настоящей работе предложена математическая модель для решения задачи о течении развитого турбулентного потока в канале. В качестве уравнений, описывающих течение жидкости, используются уравнения Рейнольдса и уравнения модели турбулентности k-omega, приведенные к квазигидродинамическому виду. Для численного решения уравнений математической постановки использовался комбинированный подход, сочетающий метод контрольных объемов и метод конечных элементов на треугольных адаптивных сетках. Для верификации предложенной математической модели была решена задача о течении турбулентного потока в канале прямоугольной формы. Полученные результаты показали, хорошее согласование результатов по предложенной модели с результатами прямого численного моделирования в области турбулентного подслоя. Для дальнейшей верификации модели был выполнен расчет ряда задач об обтекании турбулентным потоком фиксированных песчаных дюн с различным углом подветренного склона. Выполнен сравнительный анализ расчетных характеристик потока с экспериментальными данными, который показал их качественное и количественное согласование, за исключением значений кинетической энергии турбулентности в случае обтекания пологих дюн. Хорошее согласование значений осредненного над одной дюной сдвигового напряжения Рейнольдса и общего касательного напряжения, полученных по предложенной модели, с экспериментальными данными позволяет использовать предложенную модель для расчета характеристик гидродинамического потока, проходящего над изменяющимися во времени донными формами.

**Ключевые слова:** гидродинамика; квазигидродинамические уравнения; турбулентность; математическое моделирование.

**Для цитирования:** Королёва К.С., Потапов И.И. Математическое моделирование турбулентного потока жидкости с помощью квазигидродинамических уравнений и модели турбулентности k-omega. Труды ИСП РАН, том 37, вып. 2, 2025 г., стр. 163–180. DOI: 10.15514/ISPRAS–2025–37(2)–12.

## Mathematical Modeling of a Turbulent Fluid Flow by using the Quasihydrodynamic Equations and K-omega Turbulence Model

*K.S. Koroliova, ORCID: 0000-0002-8872-0277 <snigur.ks@ccfebras.ru >*

*I.I. Potapov, ORCID: 0000-0002-3323-2727 <potapov2i@gmail.com >*

*Computing Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,  
65, Kim U Chena st., Khabarovsk, 680000, Russia.*

**Abstract.** In this paper, a mathematical model for solving the problem of developed turbulent flow in a channel is proposed. The equations describing the fluid flow are the Reynolds equations and the equations of the k-omega turbulence model reduced to a quasi-hydrodynamic form. For the numerical solution of the equations of the mathematical statement, a combined approach of the control volume method and the finite element method on triangular adaptive grids was used. To verify the proposed mathematical model, the problem of turbulent flow in a rectangular channel was solved. The results obtained showed a good agreement between the results of the proposed model and the results of direct numerical simulation in the turbulent sub-layer region. For further verification of the model, a number of problems of the turbulent flow past fixed sand dunes with different lee-slope angles were calculated. A comparative analysis of the calculated flow characteristics with experimental data was performed, which showed their qualitative and quantitative agreement, with the exception of the values of the turbulent kinetic energy in the case of flowing past low-angle dunes. Good agreement of the values of the Reynolds shear stress averaged over one dune and the total shear stress obtained using the proposed model with the experimental data allows us to use the proposed model to calculate the characteristics of a hydrodynamic flow passing over time-varying bed forms.

**Keywords:** hydrodynamic; quasihydrodynamic equation; turbulence; mathematical modeling.

**For citation:** Koroliova K.S., Potapov I.I. Mathematical modeling of a turbulent fluid flow by using the quasihydrodynamic equations and k-omega turbulence model. *Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS*, vol. 37, issue 2, 2025. pp. 163-180 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(2)-12.

### 1. Введение

На данный момент существует множество методов моделирования течения турбулентного потока воды в речном или искусственном канале. Самым точным и одновременно ресурсоемким является метод прямого моделирования DNS [1, 2]. Однако из-за высокой нелинейности пристеночного течения и требования к мелкому шагу сетки метод DNS ограничен по применению только в расчетных областях с простой геометрией и числами Рейнольдса 8000-10000 [3, 4]. Метод крупных вихрей LES также часто используется для моделирования течения в каналах [4], вычислительная стоимость данного метода несколько ниже, поэтому он может применяться для моделирования течения в каналах с более высоким числом Рейнольдса. Однако, применение метода LES для расчета течения в реальном канале накладывает ограничения на сложность геометрии области [3]. Альтернативным методом моделирования турбулентного потока является использование метода RANS. Данный метод не требует такого большого количества вычислительных ресурсов как LES и DNS методы, что делает его более доступным для использования в расчетах течения реальных рек и каналов со сложной геометрией и высокими числами Рейнольдса [5, 6]. Развитие метода RANS и применение новых методик расчета позволит создавать более эффективные и доступные программные инструменты для исследования турбулентных течений в речных каналах.

В настоящей работе предлагается математическая постановка, описывающая движение развитого гидродинамического турбулентного потока в канале с ровным дном, с помощью двумерных уравнения Рейнольдса, приведенных к квазигидродинамической форме [7, 8]. Данный подход формулировки уравнений хорошо зарекомендовал себя при моделировании несжимаемой жидкости [9, 10]. Замыкание модели выполнено с помощью

дифференциальной модели турбулентности k-omega [11], также приведенной квазигидродинамическому виду. Данный подход имеет ряд ключевых особенностей:

- позволяет использовать для решения уравнений движения явную вычислительную схему и центрально-разностный дискретный аналог без введения противопоточных механизмов;
- позволяет реализовывать высокоэффективную параллельность вычислительных процессов;
- позволяет использовать большой шаг по времени без потери устойчивости расчета по сравнению со стандартными методами решения уравнений Рейнольдса [12].

В качестве численных методов решения уравнений математической постановки используется метод контрольных объемов и метод конечных элементов на треугольных сетках, модифицированные для решения квазигидродинамических уравнений по технологии [13, 14].

С помощью предложенной модели выполнено численное моделирование гидродинамического потока, проходящего в канале с ровным дном. Решение данной задачи позволяет верифицировать предложенную математическую постановку, полученные дискретные аналоги и реализованный численный метод решения задачи. Выполнено сравнение полученных результатов численного моделирования с результатами моделирования других авторов, использующих подход DNS и LES [4].

С помощью предложенного подхода в работе выполнено решение задачи об обтекании турбулентным потоком фиксированных песчаных дюн разной формы.

## 2. Математическая постановка

В работе рассматривается задача течения развитого турбулентного потока в канале с ровным дном. Исходная форма дна канала показана на рис. 1. Полагается, что глубина потока достаточно большая, донная поверхность ровная, тогда волнение свободной поверхности пренебрежительно мало влияет на структуру потока, что позволяет перейти от моделирования открытого канала к моделированию закрытого напорного канала [15]. Также полагается, что канал имеет симметричную форму и постоянную ширину, поэтому процесс обтекания дна канала можно рассматривать в двумерном профильном приближении.

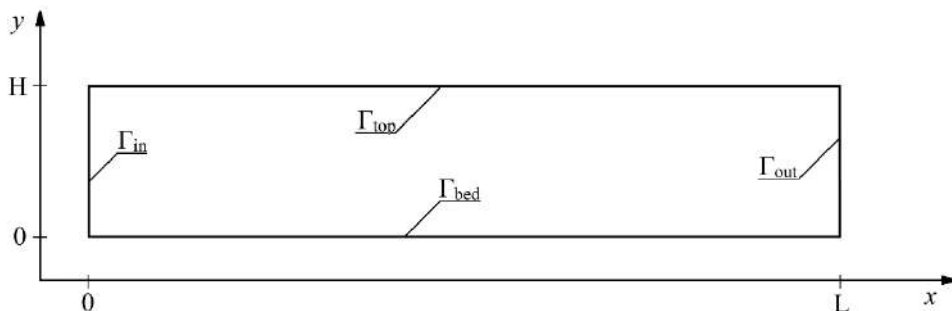


Рис. 1. Расчетная область.

Fig. 1. Computational domain.

В предложенной математической модели движение двумерного гидродинамического потока описывается с помощью квазигидродинамических уравнений [16].

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial [u^2 - (2u\omega_x + W_\tau)]}{\partial x} + \frac{\partial [uv - (v\omega_x + u\omega_y)]}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{\rho} \left( p + \frac{2}{3} k \right) = \\ = \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial [uv - (v\omega_x + u\omega_y)]}{\partial x} + \frac{\partial [v^2 - (2v\omega_y + W_\tau)]}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{\rho} \left( p + \frac{2}{3}k \right) = \\ = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = \frac{\rho}{\tau} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \\ - \rho \left( \frac{\partial}{\partial x} \left[ u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{2}{3} \frac{\partial k}{\partial x} \right] - \frac{\partial}{\partial y} \left[ u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{2}{3} \frac{\partial k}{\partial y} \right] \right), \end{aligned} \quad (3)$$

$$e_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{1}{3} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right), \quad e_{xy} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right), \quad e_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{1}{3} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right), \quad (4)$$

$$\tau_{xx} = 2\eta e_{xx}, \quad \tau_{xy} = 2\eta e_{xy}, \quad \tau_{yy} = 2\eta e_{yy}, \quad (5)$$

$$W_\tau = \tau \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{2}{3} \tau \left( u \frac{\partial k}{\partial x} + v \frac{\partial k}{\partial y} - F_k \right) + \frac{2}{3} k \tau \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (6)$$

и модели турбулентности k-omega [11], приведенной к квазигидродинамическому виду,

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial [ku - (k\omega_x + u\omega_k)]}{\partial x} + \frac{\partial [kv - (k\omega_y + v\omega_k)]}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \tilde{\eta}^* \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \tilde{\eta}^* \frac{\partial k}{\partial y} \right) + F_{k\tau}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial [wu - (w\omega_x + u\omega_w)]}{\partial x} + \frac{\partial [wv - (w\omega_y + v\omega_w)]}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \tilde{\eta} \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \tilde{\eta} \frac{\partial w}{\partial y} \right) + F_{w\tau}, \quad (8)$$

$$F_{k\tau} = \left( 1 - \tau \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right) F_k, \quad F_k = P_k - \frac{2}{3} k \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \beta^* k w,$$

$$F_{w\tau} = \left( 1 - \tau \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right) F_w, \quad F_w = \alpha \frac{w}{k} \left( P_k - \frac{2}{3} k \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right) - \beta w^2 + \frac{\sigma_d}{w} \left( \frac{\partial k}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial k}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial y} \right),$$

$$\eta = \eta_{mol} + \eta_T, \quad \eta_T = \frac{k}{w}, \quad \tilde{w} = \max \left\{ w, C_{lim} \sqrt{\frac{2e_{ij}e_{ij}}{\beta}} \right\}, \quad C_{lim} = \frac{7}{8},$$

$$2e_{ij}e_{ij} = 2(e_{xx}^2 + 2e_{xy}^2 + e_{yy}^2),$$

$$\omega_x = \tau \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{2}{3} \frac{\partial k}{\partial x} \right), \quad \omega_y = \tau \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{2}{3} \frac{\partial k}{\partial y} \right),$$

$$\omega_k = \tau \left( u \frac{\partial k}{\partial x} + v \frac{\partial k}{\partial y} - F_k \right), \quad \omega_w = \tau \left[ u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} - F_w \right]$$

$$P_k = \eta_T \left( 2 \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 - \frac{2}{3} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right),$$

$$\tilde{\eta}^* = \eta_{mol} + \sigma^* \frac{k}{w}, \quad \tilde{\eta} = \eta_{mol} + \sigma \frac{k}{w}$$

$$\alpha = \frac{13}{25}, \quad \beta = 0.0708, \quad \beta^* = 0.09, \quad \sigma = 0.5, \quad \sigma^* = \frac{3}{5},$$

$$\sigma_d = \begin{cases} 0, & \frac{\partial k}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial k}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial y} \leq 0, \\ \frac{1}{8}, & \frac{\partial k}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial k}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial y} > 0. \end{cases} \quad (9)$$

В уравнениях (1)-(9)  $x$  и  $y$  – это горизонтальная и вертикальная координаты,  $t$  – время,  $u$  и  $v$  – горизонтальная и вертикальная скорости потока,  $\rho$  – плотность воды,  $p$  – давление жидкости в канале,  $\eta = \eta_{mol} + \eta_T$  – кинематическая вязкость жидкости,  $\eta_{mol}$  – молекулярная вязкость жидкости,  $\eta_T$  – турбулентная вязкость жидкости,  $\tau$  – параметр регуляризации,  $k$  – кинетическая энергия турбулентности,  $w$  – удельная скорость диссипации турбулентности. Для решения задачи течения жидкости в канале с ровным дном модель (1)-(9) замыкается следующими начальными условиями

$$u = u_{in}, \quad v = 0, \quad p = 0, \quad k = k_{in}, \quad w = w_{in}, \quad \eta_T = \frac{k}{w}, \quad t = 0, \quad (x, y) \in \Omega$$

и граничными условиями

$$u = u_{in}, \quad v = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial x} = P_{in}, \quad k = k_{in}, \quad w = w_{in}, \quad (x, y) \in \Gamma_{in}, \quad (10)$$

$$u = 0, \quad v = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial n} = 0, \quad k = 0, \quad w = 0, \quad (x, y) \in \Gamma_{bed}, \quad (11)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial k}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial n} = 0, \quad (x, y) \in \Gamma_{top}, \quad (12)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial x} = 0, \quad p = 0, \quad \frac{\partial k}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \quad (x, y) \in \Gamma_{out}, \quad (13)$$

где  $u_{in} = \frac{N+2}{N+1} u_{cp} \left[ 1 - \left( \frac{(y-0.5H)}{0.5H} \right)^{N+1} \right]$  – профиль горизонтальной скорости на входе в область

[17], коэффициент  $N = \frac{H^2 P_{in}}{\rho \eta u_{cp}} - 2 \geq 1$  определяет вид профиля  $u_{in}$ ,  $u_{cp}$  – средняя

горизонтальная скорость потока,  $P_{in} = -\frac{(2+N)}{H^2} \rho \eta u_{cp}$  – значение градиента давления на

входе в область,  $k_{in} = 1.5(I u_{in})^2$  – распределение кинетической энергии турбулентности на

входе в область [18],  $I = 0.2$  – интенсивность турбулентности,  $w_{in} = \frac{\sqrt{k_{in}}}{l_{in}}$  – распределение

скорости диссипации турбулентности на входе в область,  $l_{in} = 0.1H$  – масштаб

турбулентности,  $\Gamma_{in}$  и  $\Gamma_{out}$  – входная и выходная границы расчетной области  $\Omega$ ,  $\Gamma_{top}$  и  $\Gamma_{bed}$

– верхняя и нижняя граница расчетной области  $\Omega$ ,  $n$  – нормаль к соответствующей границе расчетной области.

### 3. Численный расчет

Уравнения (1)-(2), (7)-(8) решаются численно с помощью метода контрольных объемов на регулярной треугольной сетке со сгущением на нижнюю стенку, участок сетки в придонной области показан на рис. 2. Пример построенного контрольного объема показан на рис. 3.

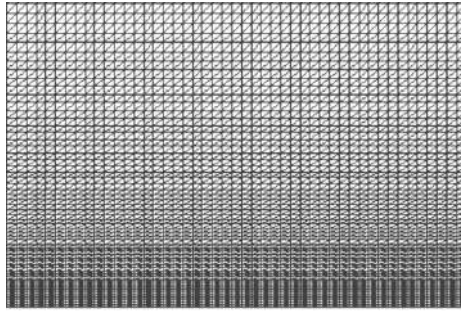


Рис. 2. Расчетная сетка у дна.  
Fig. 2. Calculation grid in the near-bed area.

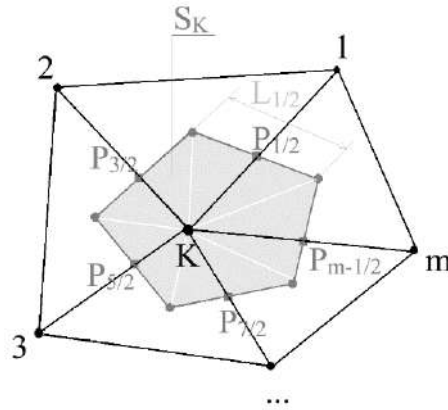


Рис. 3. Контрольный объем.  
Fig. 3. Finite volume.

Дискретные аналоги уравнений (1)-(2) выведены по технологии, показанной в работах [8, 12] и имеют следующий вид

$$u_K^{n+1} = u_K^n + \frac{\Delta t}{S_K} \sum_{i=1/2}^{m-1/2} \left[ \left( -u^2 + 2u\omega_x + W_\tau \right) n_x + \left( -uv + v\omega_x + u\omega_y \right) n_y - \right. \\ \left. - \frac{1}{\rho} \left( p + \frac{2}{3}k \right) n_x + \tau_{xx} n_x + \tau_{xy} n_y \right] L_{Ki+1/2},$$

$$v_K^{n+1} = v_K^n + \frac{\Delta t}{S_K} \sum_{i=1/2}^{m-1/2} \left[ \left( -uv + v\omega_x + u\omega_y \right) n_x + \left( -v^2 + 2v\omega_y + W_\tau \right) n_y - \right. \\ \left. - \frac{1}{\rho} \left( p + \frac{2}{3}k \right) n_y + \tau_{xy} n_x + \tau_{yy} n_y \right] L_{Ki+1/2},$$

Дискретные аналоги уравнений (7)-(8) выведены аналогичным способом и имеют вид

$$k_K^{n+1} = k_K^n + \Delta t (\bar{F}_k)_K + \\ + \frac{\Delta t}{S_K} \sum_{i=1/2}^{m-1/2} \left[ \left( -ku + k\omega_x + u\omega_k \right) n_x + \left( -kv + k\omega_y + v\omega_k \right) n_y + \right. \\ \left. + \eta^* \left( \frac{\partial k}{\partial x} n_x + \frac{\partial k}{\partial y} n_y \right) \right] L_{Ki+1/2},$$

$$w_K^{n+1} = w_K^n + \Delta t (\bar{F}_w)_K^n + \frac{\Delta t}{S_K} \sum_{i=1/2}^{m-1/2} \left[ (-wu + w\omega_x + u\omega_w)n_x + (-wv + w\omega_y + v\omega_w)n_y + \eta \left( \frac{\partial w}{\partial x} n_x + \frac{\partial w}{\partial y} n_y \right) \right]^n L_{Ki+1/2},$$

где  $K$  – центральный узел контрольного объема,  $m$  – количество точек, составляющих контур контрольного объема,  $n$  – номер итерации по времени,  $\bar{F}$  – среднее значение функции на всей площади контрольного объема,  $S_K$  – площадь контрольного объема,  $L_K$  – длина отрезка контура контрольного объема.

Для определения давления по уравнению (3) в узлах сетки используется метод конечных элементов в слабой формулировке Галеркина [19]. Дискретизация выполняется для треугольных конечных элементов. Вывод дискретного аналога для уравнения (1) и его конечный вид показан в работе [8].

Для расчета характеристик потока вблизи дна и придонных касательных напряжений использовался метод пристеночных функций [20].

Программная реализация предложенной математической модели выполнена на языке программирования C# и доступна по ссылке [21].

#### 4. Верификация модели

С помощью предложенной математической модели (1)-(13) в работе выполнено численное моделирование турбулентного потока, проходящего над ровным гладким дном. Расчетная область показана на рис. 1. Для расчета использовались следующие параметры:  $Re = 10^5$ , средняя скорость потока  $U_{av} = 0.3$  м/с, максимальная скорость потока  $U_{max} = 0.4$  м/с, глубина потока  $H = 0.5$  м, длина канала  $L = 5$  м, расход жидкости  $Q = 0.1$  м<sup>3</sup>/с. Количество узлов по вертикали составляло 250 со сгущением сетки у дна до шага  $\Delta y = 2.7 \cdot 10^{-4}$  м, шаг по горизонтали составлял 1750 и был равномерный по длине, шаг по времени  $\Delta t = 10^{-4}$  с, параметр регуляризации КГД  $\tau = 10^{-4}$  с.

На рис. 4 показано распределение горизонтальной скорости потока в расчетной области. На рисунке видно, что в пределах одного метра от входа в область происходит перестроение потока (обозначено кругом) из-за влияния граничных условий на входе в область. Таким образом скорость в сечении  $y = 4$  м (сечение показано на рис. 4 вертикальной линией) не подвержена возмущениям от граничных условий на входе и выходе из области и может быть рассмотрена подробнее. Профиль расчетной безразмерной скорости в данном сечении показан на рис. 5 серой пунктирной линией. Для сравнения на рис. 5 показаны данные из работы [4]: результаты прямого численного моделирования (сплошная черная линия), результаты моделирования по модели LES-SSM с подсеточной моделью Смагоринского (пунктирная линия с треугольниками), результаты моделирования по модели LES-DSM с динамической моделью Смагоринского (пунктирная линия с квадратами). Из сравнения графиков безразмерной скорости на рис. 5 видно, что предложенная модель хорошо согласуется с результатами прямого численного моделирования в области турбулентного подслоя, максимальная погрешность составляет 8% в области верхней границы области. Точность модели в области ламинарного подслоя можно повысить подбором другой пристеночной функции.

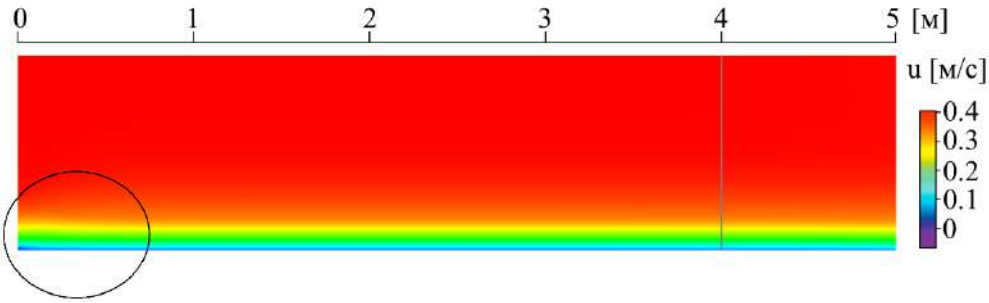


Рис. 4. Распределение горизонтальной скорости в области.  
Fig. 4. Distribution of the horizontal velocity in the area.

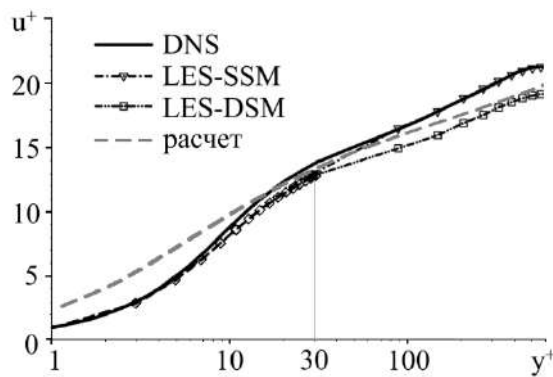


Рис. 5. Профиль горизонтальной скорости.  
Fig. 5. Profile of the horizontal velocity.

**4. Расчет турбулентного потока над дюнным дном**

С помощью предложенной математической модели (1)-(13) в работе выполнено численное моделирование турбулентного потока, проходящего над дюнами ассиметричной формы. Расчетная область показана на рис. 6, в центре области друг за другом располагаются 6 одинаковых дюн. Форма дна канала состоит из трех частей: прямого участка  $L_1$  длиной 30 м, дюнного участка, состоящего из 6-и дюн, идущих друг за другом и имеющих длину  $L_2$  по 0.9 м, и прямого участка  $L_3$  длиной 13.5 м. Форма дюн схематично показана на рис. 7. Дюны имеют пологий напорный склон, область пика (crest), область второго пика (brink) и подветренный склон, который показан на рис. 7 серым цветом. Численное моделирование выполнялось для дюн с углом подветренного склона 10, 20 и 30 градусов. Расчет проводился при следующих параметрах: средняя скорость потока  $U_{av} = 0.62$  м/с, глубина потока  $H = 0.2$  м,  $Re = 1.24 \cdot 10^5$ . Параметры расчета задачи и формы дюн взяты из экспериментальной работы [22]. Расчетная сетка состояла из 60 узлов, расположенных равномерно по вертикали, пространственный шаг  $\Delta y = 0.003$  м и 2500 узлов, расположенных равномерно по горизонтали, шаг по времени составлял  $\Delta t = 10^{-4}$  с, параметр регуляризации КГД  $\tau = 10^{-4}$  с. На рис. 8 показано распределение характеристик потока, проходящего над неподвижными пологими дюнами с углом подветренного склона 10 градусов; в левом столбце показаны расчетные данные, в правом столбце показаны экспериментальные данные [22]. При сравнении расчетных данных с экспериментальными данными, видно их хорошее

качественное согласование. Скорости  $u$ ,  $v$  и напряжение  $\tau_{xy}$  имеют также хорошее количественное согласование с экспериментом, средняя относительная погрешность расчетных полей составляет 3.09%, 26.11% и 12.76% соответственно. При этом расчетные значения кинетической энергии  $k$  являются заниженными в 3 раза, что характерно для используемой модели турбулентности [23]. В численном эксперименте авторы не обнаружили постоянной зоны рециркуляции потока за пологими дюнами, что согласуется с экспериментом [22] и экспериментальными работами авторов [24-27].

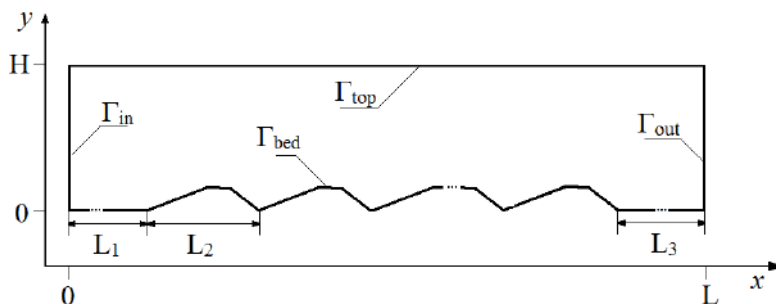


Рис. 6. Расчетная область для задачи об обтекании дюн.

Fig. 6. Calculation domain for the task of the flow past dunes.

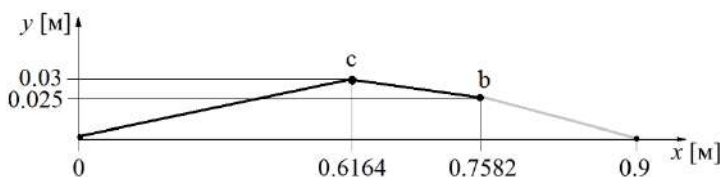


Рис. 7. Форма пологой дюны.

Fig. 7. Low-angle dune form.

На рис. 9а показаны графики осредненного касательного напряжения  $\overline{\tau_{xy}}$ , которое вычисляется как дважды осредненная над одной дюной касательная компонента напряжения Рейнольдса. На рис. 9а светло-серыми квадратами обозначены расчетные данные, темно-серыми кругами – экспериментальные данные [22], на рис. 9б черными квадратами показаны значения относительной погрешности расчетных данных. По графикам на рис. 9а и 9б видно, что максимальное отклонение расчетного графика от экспериментального наблюдается в области пиков дюны и чуть выше ( $0.25 < y < 0.35$  м). По расчетным данным  $\overline{\tau_{xy}}$  возрастает в области обоих пиков дюны, а по экспериментальным данным  $\overline{\tau_{xy}}$  возрастает в выемке между дюнами. Такое расхождение графиков может объясняться тем, в экспериментальном исследовании учитывались пульсации скорости в потоке, что недоступно для предложенной модели, а также с тем, что часть экспериментальных данных вблизи дна отсутствует (области, где экспериментальные данные отсутствуют, можно увидеть на рис. 8 в виде белой заливки, а также в исходной работе автора [22: P.552, Fig. 5]). В экспериментальном графике осредненные напряжения активно возрастают в нижней половине потока чуть выше пиков дюн, в расчетном графике в данной области напряжения возрастают менее интенсивно. Данный факт говорит о том, что предложенная модель не в достаточной мере описывает распространение возмущений от обтекания пологой дюны в центр потока.

Отметим, что при этом полученные в эксперименте и в расчете максимальные значения  $\overline{\tau_{xy}}$  близки по значению и в целом расчетный график хорошо согласуется с экспериментальным, средняя относительная погрешность составляет 8.4 %.

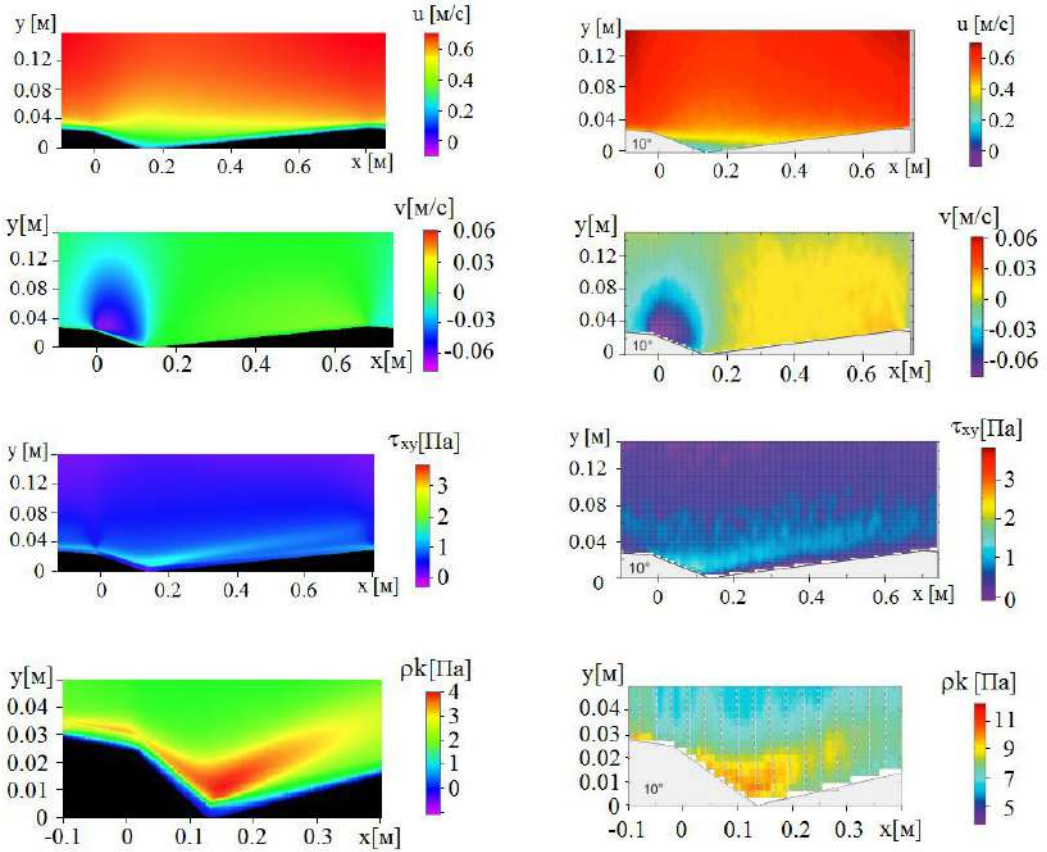


Рис. 8. Расчетные (слева) и экспериментальные (справа) поля горизонтальной и вертикальной скоростей потока, напряжений Рейнольдса и кинетической энергии турбулентности при обтекании пологих дюн.

Fig. 8. The predicted (left) and experimental (right) fields of horizontal and vertical velocities, Reynolds stress and kinematic turbulence energy of the flow past low-angle dunes.

В работе также выполнено сравнение общего касательного напряжения  $\tau_T$ , так как данная характеристика часто используется в практических расчетах больших участков рек для учета сопротивления, которое вносится в поток дюнами на дне [28, 29]. Общее касательное напряжение на дне  $\tau_T$  вычислялось путем линейной экстраполяции  $\overline{\tau_{xy}}$  в верхней части канала ( $y > 0.1$  м) на дно, как это выполнено у автора [22]. На рис. 9а линии экстраполяции показаны пунктирными линиями соответствующего цвета, значения  $\overline{\tau_{xy}}$ , по которым производилась экстраполяция, обозначены фигурами с черным контуром. Таким образом, экспериментальное  $\tau_T = 0.85$  Па, расчетное  $\tau_T = 0.81$  Па, погрешность вычисления  $\tau_T$  достаточно мала и составляет 4.7 %, что позволяет использовать предложенную модель для расчета движения потока по размываемой донной поверхности с дюнными донными формами.

С помощью предложенной модели в работе выполнено моделирование турбулентного гидродинамического потока в такой же расчетной области, как в предыдущем случае, но с дюнами средней крутизны, угол подветренного склона которых равен 20 градусам, геометрия дюны показана на рис. 10.

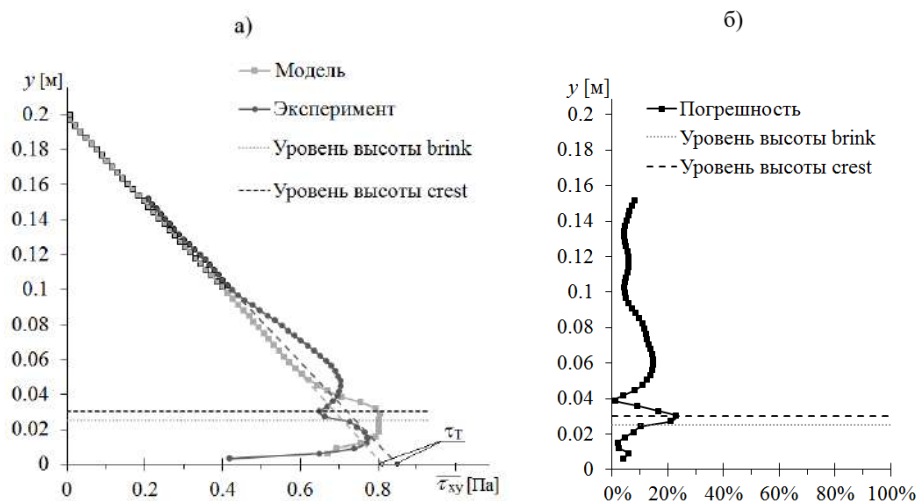


Рис. 9. Осредненное над одной пологой дюной касательное напряжение (а) и относительная погрешность его вычисления по предложенной модели (б).

Fig. 9. Shear stress averaged over one low-angle dune (a), and relative error of its calculation by the proposed model.

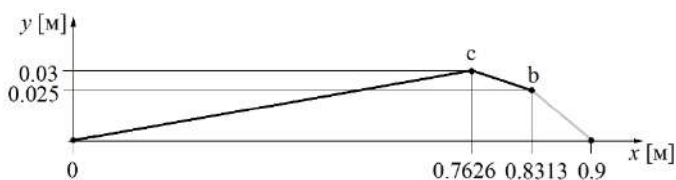


Рис. 10. Форма дюны средней крутизны.

Fig. 10. Middle-angle dune form.

На рис. 11 в левом столбце показаны результаты численного моделирования, в правом столбце – соответствующие экспериментальные данные из работы [22]. При сравнении полей горизонтальной скорости видно, что в численном эксперименте за дюной наблюдается небольшая зона рециркуляции потока, она составляет около 0.007 м в диаметре. Авторы экспериментальной работы [22] постоянной зоны рециркуляции потока за такими дюнами не обнаружили, но они указывают, что зона рециркуляции потока может находиться у подножья дюны, где экспериментальные измерения выполнить не удалось. При сравнении всех расчетных характеристик потока с экспериментальными данными видно их хорошее качественное и количественное согласование, средняя относительная погрешность для  $u$  равна 4.68%, для  $v$  – 34.02%, для  $\tau_{xy}$  – 15.56%. Расчетная кинетическая энергия турбулентности  $k$  чуть лучше согласуется с экспериментом, чем в случае обтекания потоком 10-градусных дюн, средняя относительная погрешность составляет 42.33%.

На рис. 12а показано распределение осредненного сдвигового напряжения Рейнольдса  $\overline{\tau_{xy}}$  для случая обтекания потоком дюн средней крутизны, светло-серыми квадратами обозначены расчетные данные, темно-серыми кругами – экспериментальные данные [22], на рис. 12б черными квадратами показано распределение относительной погрешности расчетных данных  $\overline{\tau_{xy}}$ . При сравнении графиков на рис. 12а видно их хорошее качественное и количественное согласование. Как и в случае обтекания пологой дюны, максимальное отклонение расчетного профиля от экспериментального наблюдается в нижней части потока

над пиком дюны ( $0.3 < y < 0.5$  м), погрешность расчета здесь достигает 37 %, во всей остальной области отклонения менее значительны, средняя относительная погрешность расчетного  $\overline{\tau_{xy}}$  составляет 12.24 %. Следует отметить, что на рис. 12а на расчетном графике видно присутствие зоны рециркуляции потока, напряжения принимают отрицательные значения. Полученное по расчетным данным общее касательное напряжение  $\tau_T = 1.0$  Па, по экспериментальным данным –  $\tau_T = 1.05$  Па, таким образом погрешность вычисления общего касательного напряжения для средних дюн по предложенной модели оставляет 4.76 %.

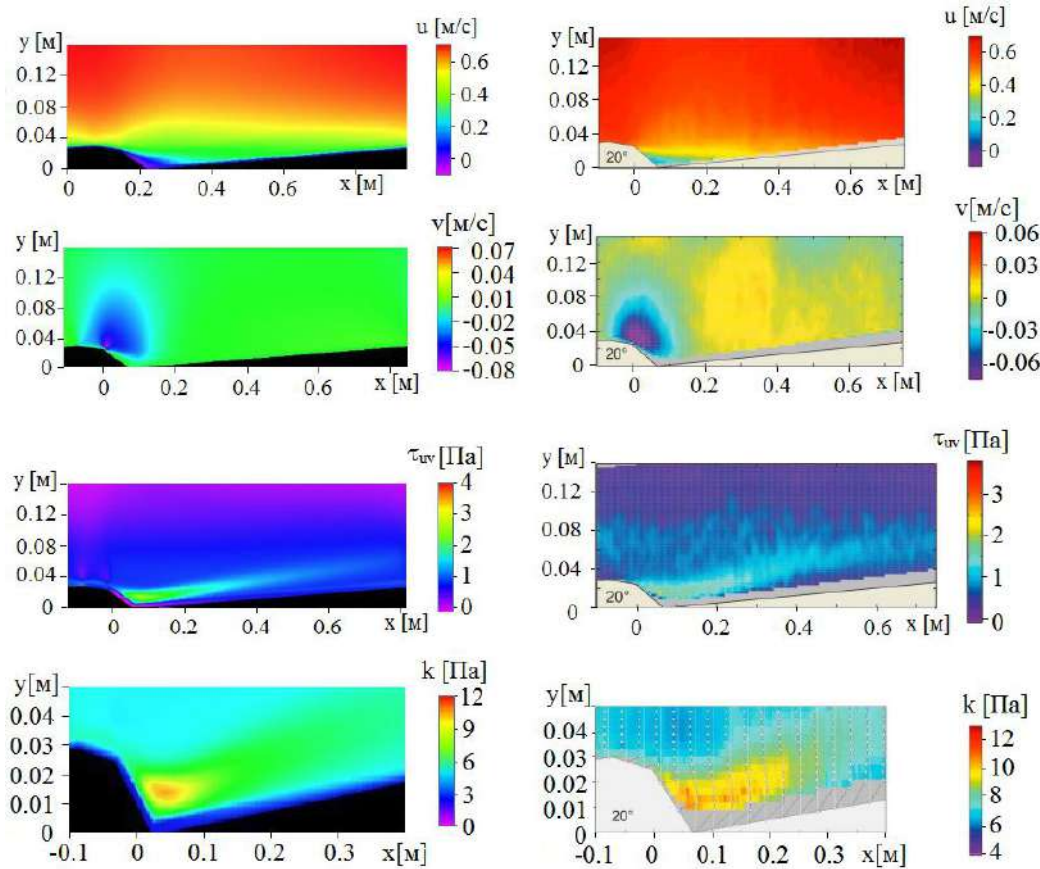


Рис. 11. Расчетные (слева) и экспериментальные (справа) поля горизонтальной и вертикальной скоростей потока, напряжений Рейнольдса и кинетической энергии турбулентности при обтекании дюн средней крутизны.

Fig. 11. The predicted (left) and experimental (right) fields of horizontal and vertical velocities, Reynolds stress and kinematic turbulence energy of the flow past middle-angle dunes.

Для случая обтекания потоком крутых дюн с углом подветренного склона 30 градусов также был выполнен численный эксперимент. Как и в предыдущем эксперименте, расчетная область оставалась прежней, только изменена форма дюн в центре расчетной области, форма крутой дюны показана на рис. 13.

На рис. 14 в левом столбце показаны результаты численного моделирования течения над крутыми дюнами, в правом столбце – соответствующие экспериментальные данные из работы [22]. На рис. 14 видно хорошее качественное и количественное согласование

расчетных и экспериментальных данных для всех рассмотренных характеристик, средняя относительная погрешность для  $u$  равна 6.66%, для  $v$  – 24.09%, для  $\tau_{xy}$  – 20.77%., для  $k$  – 24.23 %. На рис. 14 видно, что за дюной присутствует зона рециркуляции потока, и ее размер, местоположение и скорость в расчете согласуется с экспериментальными данными [22].

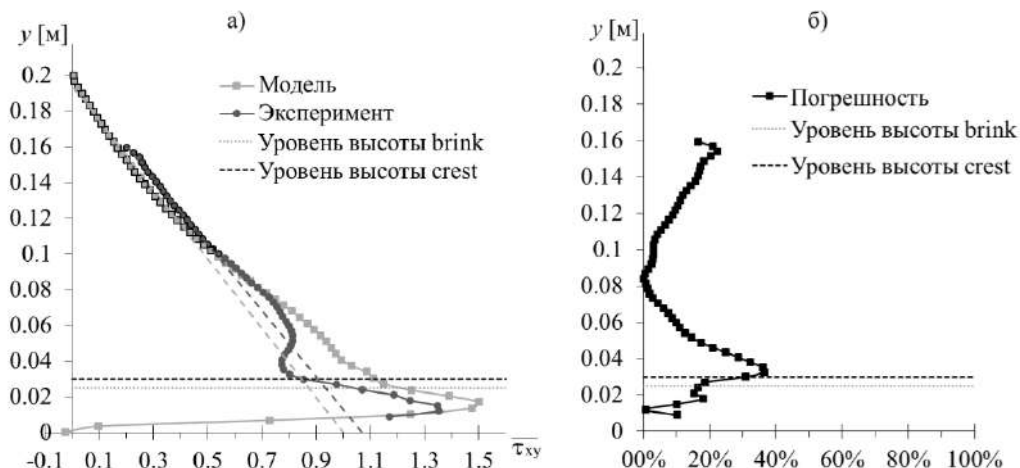


Рис. 12. Осредненное над одной дюной средней крутизны касательное напряжение (а) и относительная погрешность его вычисления по предложенной модели (б).

Fig. 12 Shear stress averaged over one middle-angle dune (a) and relative error of its calculation by the proposed model.

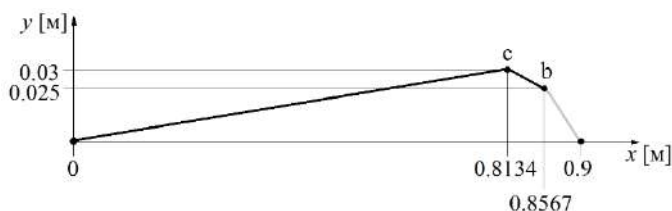


Рис. 13. Форма крутой дюны.

Fig. 13. Steep dune form.

На рис. 15а показано распределение осредненного сдвигового напряжения Рейнольдса  $\overline{\tau_{xy}}$  для случая обтекания потоком крутых дюн, светло-серыми квадратами обозначены расчетные данные, темно-серыми кругами – экспериментальные данные [22], на рис. 15б показано распределение относительной погрешности расчетных данных  $\overline{\tau_{xy}}$ . На рисунках видно, что в целом расчетные напряжения  $\overline{\tau_{xy}}$  хорошо согласуются с экспериментом [22], средняя относительная погрешность составляет 20.76%. В рассматриваемом случае максимальное отклонение расчетного графика от экспериментального наблюдается в выемке между дюнами ( $y < 0.015$  м). В данной области расчетные напряжения плавно снижаются до отрицательных значений, что отражает наличие зоны рециркуляции потока, экспериментальные напряжения в данной области продолжают расти, а вблизи дна экспериментальные данные не зафиксированы. Такое рассогласование, вероятно, связано с недостаточной густотой сетки у дна, что не позволяет используемой модели корректно описать сильный градиент горизонтальной скорости в области зоны рециркуляции потока. Еще одна область, где расчетный график отклоняется от экспериментального – это верхняя

часть потока, причиной этому может быть используемое в модели граничное условие на верхней границе канала. Данные недостатки модели оказали влияние на точность расчетного общего касательного напряжения: расчетное значение  $\tau_T = 1.31$  Па, экспериментальное значение –  $\tau_T = 1.51$  Па, относительная погрешность составляет 13.25% – это наибольшее значение для всех трех рассмотренных случаев.

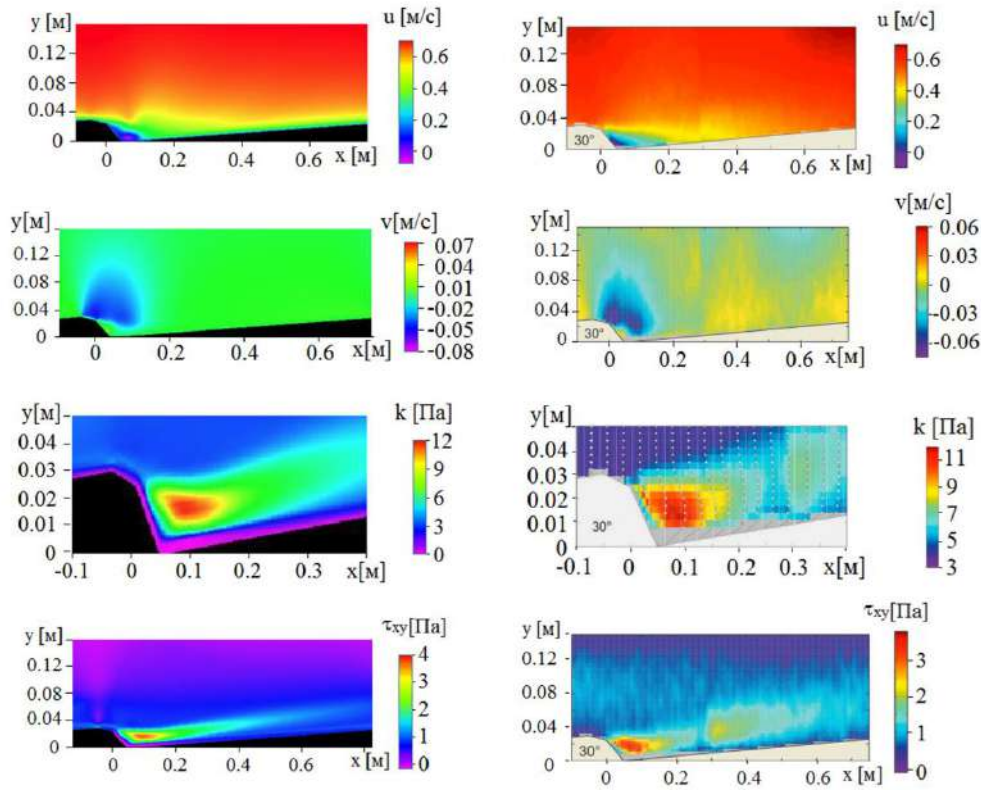


Рис. 14. Расчетные (слева) и экспериментальные (справа) поля горизонтальной и вертикальной скоростей потока, напряжений Рейнольдса и кинетической энергии турбулентности при обтекании крутых дюн.

Fig. 14. The predicted (left) and experimental (right) fields of horizontal and vertical velocities, Reynolds stress and kinetic turbulence energy of the flow past steep dunes.

Таким образом, для получения более точного расчета гидродинамических характеристик потока, проходящего над крутыми дюнами, необходимо пересмотреть граничные условия на верхней границе области и проводить расчеты на более мелких сетках у дна.

#### 4. Заключение

В настоящей работе предложена математическая модель для решения задачи о течении развитого турбулентного потока в канале. Особенностью предложенной модели является нетрадиционный подход к решению уравнений Рейнольдса и уравнений модели турбулентности k-омега, они приведены к квазигидродинамическому виду. Для численного решения уравнений математической постановки использовался комбинированный подход, сочетающий метод контрольных объемов и метод конечных элементов на треугольных адаптивных сетках. Выполнена верификация предложенной модели на тестовой задаче о

течении гидродинамического потока в канале с ровным дном, показано, что предложенная модель корректно описывает поведение потока в области турбулентного подслоя.

Для дальнейшей верификации модели было выполнено численное решение ряда задач об обтекании турбулентным потоком фиксированных песчаных дюн. Показано, что предложенная модель адекватно описывает движение турбулентного гидродинамического потока над асимметричными дюнами, имеющими разный угол подветренного склона. Полученные по модели горизонтальные, вертикальные скорости потока и сдвиговые напряжения Рейнольдса качественно и количественно согласуются с экспериментальными данными во всех рассмотренных случаях их погрешность варьируется в пределах 3.09-6.66%, 24.09-34.02% и 8.4-20.76% соответственно.

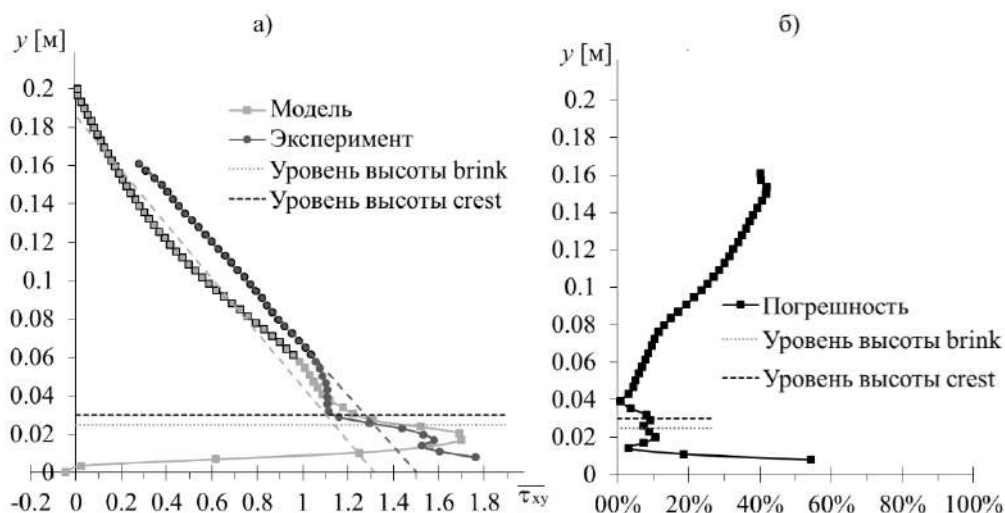


Рис. 15. Осредненное над одной крутой дюной касательное напряжение (а) и относительная погрешность его вычисления по предложенной модели (б).

Fig. 15 Shear stress averaged over one steep dune (a) and relative error of its calculation by the proposed model (b).

В работе показано, что предложенная модель корректно моделирует область за дюной: за пологими дюнами не наблюдается зоны рециркуляции, за дюнами средней крутизны наблюдается непостоянная зона рециркуляции, и за крутыми дюнами наблюдается постоянная зона рециркуляции.

Выявлено, что расчетная кинетическая энергия турбулентности в случае обтекания потоком пологих дюн имеет заниженные значения по сравнению с экспериментом, при этом в случае обтекания потоком крутых дюн значения заниженными не являются. Таким образом, для получения более точных значений кинетической энергии турбулентности необходимо для случая обтекания потоком пологих дюн пересмотреть способ ее расчета.

Значения расчетного общего касательного напряжения согласуются с экспериментом с относительной погрешностью 4.8% для случая обтекания пологих и средних дюн и 13.25% для случая обтекания крутых дюн. Авторы предполагают, что для повышения точности расчета общего касательного напряжения в последнем случае необходимо использовать другое граничное условие на верхней стенке канала. Несмотря на это, полученные по предложенной модели значения общего касательного напряжения хорошо согласуются с экспериментом, следовательно, предложенная модель может применяться для расчета

гидравлического сопротивления, оказываемого на поток различными донными формами, и последующего расчета размыва донной поверхности.

## Список литературы / References

- [1]. Liakopoulos A.; Palasis A. Turbulent Channel Flow: Direct Numerical Simulation-Data-Driven Modeling. *Fluids*, 2024, vol. 9, issue 62. 10.3390/fluids9030062. DOI: 10.3390/fluids9030062.
- [2]. Hoyas S., Oberlack M., Alcántara Ávila F., Kraheberger S., Laux J. Wall turbulence at high friction Reynolds numbers // *Physical Review Fluids*, 2022, 7. DOI: 10.1103/PhysRevFluids.7.014602.
- [3]. Freire L. S., Chamecki M. Large-Eddy Simulation of smooth and rough channel flows using a one-dimensional stochastic wall model. *Computers & Fluids*, 2021, vol. 230, 105135. DOI: 10.1016/j.compfluid.2021.105135.
- [4]. Hoque M. A., Mallik M. S. I., Hossain M. S., Gope R. Ch., Uddin Md. A. Large eddy simulation of a turbulent channel flow using dynamic Smagorinsky subgrid scale model and differential equation wall model, // *International Journal of Thermofluids*, vol. 22, 2024, 100676. DOI: 10.1016/j.ijft.2024.100676.
- [5]. Yusuf S. N. A., Asako Y., Che Sidik N. A., Mohamed S. B., Aziz Japar W. M. A. (2020). A Short Review on RANS Turbulence Models // *CFD Letters*, 2020. vol. 12, no. 11. pp. 83-96. DOI: 10.37934/cfdl.12.11.8396.
- [6]. Liu L., Ahmed U., Chakraborty N. A Comprehensive Evaluation of Turbulence Models for Predicting Heat Transfer in Turbulent Channel Flow across Various Prandtl Number Regimes. *Fluids* 2024, 9, 42. DOI: 10.3390/fluids9020042.
- [7]. Елизарова Т.Г., Калачинская И.С., Ключникова А.В., Шеретов Ю.В. Расчет конвективных течений на основе квазигидродинамических уравнений. Проблемы математической физики. М., Диалог МГУ, 1998, С. 193–208. Доступно по ссылке: [https://elizarova.imamod.ru/\\_media/1998vychmat.pdf](https://elizarova.imamod.ru/_media/1998vychmat.pdf) / Elizarova T.G., Kalachinskaja I.S., Kluchnikova A.V., Sheretov Yu. V. Calculation of convective flows based on quasi-hydrodynamic equations. *Problems of Mathematical Physics*. Moscow, MGU Dialogue, 1998, pp. 193-208. Available at: [https://elizarova.imamod.ru/\\_media/1998vychmat.pdf](https://elizarova.imamod.ru/_media/1998vychmat.pdf) (in Russian).
- [8]. Снигур К.С. Математическое моделирование русловых процессов в каналах с песчано-гравийным основанием: дисс. ... канд. физ.-мат. наук, Комсомольск-на-Амуре, 2016, 148 с./ Snigur K.S. Mathematical modeling of riverbed processes in channels with sand-gravel bed. Thesis, Komsomolsk-na-Amure, 2016, 148 p. DOI: 10.13140/RG.2.1.3727.8325/1 (in Russian).
- [9]. Елизарова Т.Г., Калачинская И.С., Шеретов Ю.В., Шильников Е.В. Численное моделирование отрывных течений за обратным уступом. Прикладная математика и информатика, Труды факультета Вычислительной математики и кибернетики, М., Макс Пресс, 2003а, Т. 14. С. 85–118. Доступно по ссылке: [https://elizarova.imamod.ru/\\_media/2003mgu1485.pdf](https://elizarova.imamod.ru/_media/2003mgu1485.pdf) / Elizarova T.G., Kalachinskaja I.S., Sheretov Yu.V., Shilnikov E.V. Numerical modeling of separated flows behind a backward-facing step. *Applied Mathematics and Computer Science, Proceedings of the Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics*, Moscow, 2003a, vol. 14, pp. 85-118. Available at: [https://elizarova.imamod.ru/\\_media/2003mgu1485.pdf](https://elizarova.imamod.ru/_media/2003mgu1485.pdf) (in Russian).
- [10]. Елизарова Т.Г., Милукова О.Ю. Численное моделирование течения вязкой несжимаемой жидкости в кубической каверне. Журнал вычислительной математики и математической физики, 2003б, Т. 43, № 3, С. 453–466. Доступно по ссылке: [https://elizarova.imamod.ru/\\_media/2003vychmat.pdf](https://elizarova.imamod.ru/_media/2003vychmat.pdf) / Elizarova T.G., Miliukova O.Yu. Numerical modeling of viscous incompressible fluid flow in a cubic cavity. *Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 2003b, vol. 43, no.3, pp. 453–466. Available at: [https://elizarova.imamod.ru/\\_media/2003vychmat.pdf](https://elizarova.imamod.ru/_media/2003vychmat.pdf) (in Russian).
- [11]. Wilcox, D.C. Formulation of the k- $\omega$  Turbulence Model Revisited. *AIAA Journal*, 2008, vol. 46, no. 11, pp. 2823–2838. DOI:10.2514/1.36541.
- [12]. Широков И.А., Елизарова Т.Г. Применение квазигазодинамических уравнений к моделированию пристеночных турбулентных течений. Прикладная математика и информатика, 2016. М.: Изд-во факультета ВМК МГУ, под ред. В.И. Дмитриева. М.: МАКС Пресс, 2016, N 51, 52-80. ISBN 978-5-317-05316-1. Доступно по ссылке: [https://elizarova.imamod.ru/\\_media/2016mgu.pdf](https://elizarova.imamod.ru/_media/2016mgu.pdf) / Shirokov I.A., Elizarova T.G. Application of quasi-gas dynamic equations to numerical simulation of near-wall turbulent flows. *Computational Mathematics and Modeling*, 2017, vol. 28, no.1, pp.37-60. DOI: 10.1007/s10598-016-9344-z.
- [13]. Елизарова Т.Г., Серегин В.В. Аппроксимация уравнений квазигидродинамики на треугольных сетках. Вестник Московского университета, Серия 3. Физика. Астрономия, 2005, № 4, С. 15-18.

- Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/approksimatsiya-uravneniy-kvazigazodinamiki-na-treugolnyh-setkah/pdf> / Elizarova T.G., Seregin V.V. Approximation of quasihydrodynamic equations on triangular grids. *Moscow University Bulletin, Series 3. Physics. Astronomy*, 2005, no. 4, pp. 15-18. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/approksimatsiya-uravneniy-kvazigazodinamiki-na-treugolnyh-setkah/pdf> (in Russian).
- [14]. Потапов И.И., Снигур К.С., Цой Г.И. О моделировании обтекания пологих песчаных дюн турбулентным потоком // *Вычислительные технологии*, 2019. – Т. 24, № 6. – С. 99-107. DOI: 10.25743/ICT.2019.24.6.012. / Potapov I.I., Snigur K.S., Tsoy G.I. On the modelling of turbulent flow over low-angle sand dunes. *Computational Technologies*, 2019, vol. 24, no. 6, pp. 99–107. DOI: 10.25743/ICT.2019.24.6.012. (In Russian).
- [15]. Клавен А.Б., Копалиани З.Д. Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса. СПб, Нестор-История, 2011, 504 с. / Klaven A.B., Kopaliani Z.D. Experimental studies and hydraulic modeling of river flows and channel process. Saint-Petersburg, Nestor-History, 2011, 504 p. (in Russian).
- [16]. Елизарова Т.Г. Квазигазодинамические уравнения и методы расчета вязких течений. Лекции по математическим моделям и численным методам в динамике газа и жидкости. М., Научный Мир, 2007, 350 с. Доступно по ссылке: [https://www.imamod.ru/~elizar/\\_media/course-book.pdf](https://www.imamod.ru/~elizar/_media/course-book.pdf) / Elizarova T.G. Quasi-gasdynamic equations and methods for calculating viscous flows. Lectures on mathematical models and numerical methods in gas and liquid dynamics. Moscow, Science World, 2007, 350 p. Available at: [https://www.imamod.ru/~elizar/\\_media/course-book.pdf](https://www.imamod.ru/~elizar/_media/course-book.pdf) (in Russian).
- [17]. Stigler J. Introduction of the analytical turbulent velocity profile between two parallel plates. 18<sup>th</sup> International conference Engineering Mechanics, Czech Republic, 2012. Paper No. 148. pp. 1343-1352. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/280729357\\_INTRODUCTION\\_OF\\_THE\\_ANALYTICAL\\_TURBULENT\\_VELOCITY\\_PROFILE\\_BETWEEN\\_TWO\\_PARALLEL\\_PLATES](https://www.researchgate.net/publication/280729357_INTRODUCTION_OF_THE_ANALYTICAL_TURBULENT_VELOCITY_PROFILE_BETWEEN_TWO_PARALLEL_PLATES).
- [18]. Peng Sh.-H., Davidson L., Holmberg S. The Two-Equation Turbulence k-w Model Applied to Recirculating Ventilation Flows. Chalmers University of Technology Department of Thermo- and Fluid Dynamics: Publ. Nr. 96/13, 1998, 25 p. Available at: [https://www.tfd.chalmers.se/~lada/postscript\\_files/tfd9613.pdf](https://www.tfd.chalmers.se/~lada/postscript_files/tfd9613.pdf).
- [19]. Флетчер, К. Численные методы на основе метода Галёркина. М., Мир, 1988, 353 с / Fletcher C.A.J. Computational Galerkin Methods. In: *Computational Galerkin Methods*. Springer Series in Computational Physics, 1984, 310 p. DOI: 10.1007/978-3-642-85949-6.
- [20]. Луцкий А.Е., Северин А.В. Простейшая реализация метода пристеночных функций. Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша, 2013, № 38, 22 с. Доступно по ссылке: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2013-38> / Lutsky, A.E., Severin, A.V. The minimal realization of the wall functions method. Preprint Keldysh Institute of Appl. Math., 2013, no. 38, 22 p. Available at: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2013-38> (in Russian).
- [21]. Королёва (Снигур) К.С., Потапов И.И. Репозиторий исходного кода для задачи расчета гидродинамики и русловых деформаций в речном канале. <https://github.com/SnigurKS/RANS-QGD.git> (Дата публикации: 31.10.2014, дата обращения: 31.10.2014).
- [22]. Kwoh E., Venditti J. G., Bradley R. W., Winter C. Flow structure and resistance over subaqueous high- and low-angle dunes // *Journal of Geophysical Research. Earth Surface*, 2016. vol. 121, pp. 545-564. DOI: 10.1002/2015JF003637.
- [23]. Stoesser Th., von Terzi D., Rodi W., Olsen N. R. B. RANS simulations and LES of flow over dunes at low relative submergence ratios // *Proceedings of the 7th International Conference on HydroScience and Engineering Philadelphia, USA September 10-13, 2006 (ICHE 2006)*. 13 p. Available at: <https://researchdiscovery.drexel.edu/esploro/outputs/journalArticle/RANS-simulations-and-LES-of-flow/991014632514604721/>.
- [24]. Smith J.D., McLean S.R. Spatially averaged flow over a wavy surface // *Journal of Geophysical Research*, 1977. vol.82, pp. 1735-1746. DOI: 10.1029/JC082i012p01735.
- [25]. Sukhodolov A.N., Fedele J.J., Rhoads B.L. Structure of flow over alluvial bedforms: An experiment on linking field and laboratory methods // *Earth Surface Processes Landforms*, 2006. vol. 31, no. 10, pp. 1292-1310. DOI: 10.1002/esp.1330.
- [26]. Shugar D.H., Kostaschuk R.A., Best J.L., Parsons D.R., Lane S.N., Orfeo O., Hardy R.J. On the relationship between flow and suspended sediment transport over the crest of a sand dune, Río Paraná, Argentina // *Sedimentology*, 2010. vol. 57, no. 1. pp. 252-272. DOI: 10.1111/j.1365-3091.2009.01110.x.

- [27]. Bradley R.W., Venditti J.G., Kostaschuk R.A., Church M., Hendershot M., Allison M.A. Flow and sediment suspension events over low-angle dunes: Fraser Estuary, Canada // *Journal of Geophysical Research. Earth Surface*, 2013. vol. 118, pp. 1693-1709. DOI: 10.1002/jgrf.20118.
- [28]. Paarlberg A. J., Dohmen-Janssen C. M., Hulscher S. J. M. H., Termes P., Schielen R. Modelling the effect of time-dependent river dune evolution on bed roughness and stage // *Earth Surf. Processes Landforms*, 2010. vol. 35, no. 15. pp. 1854-1866. DOI: 10.1002/esp.2074.
- [29]. van Rijn L.C. Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. Amsterdam: Aqua Publications– 1993. 654 p. ISBN: 9789080035621.

### **Информация об авторах / Information about authors**

Ксения Сергеевна КОРОЛЁВА – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории вычислительной механики Вычислительного центра Дальневосточного отделения Российской академии наук, работает в лаборатории с 2010 г. Сфера научных интересов: математическое моделирование русловых процессов для равнинных рек, вычислительная гидродинамика, численные методы, транспорт донных наносов и эволюция донной поверхности во времени.

Kseniia Sergeevna KOROLIOVA – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Reseacher of the Laboratory of Computational Mechanics of Computing Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, works in laboratory since 2010 year. Research interests: mathematical modeling of riverbed processes of plane rivers, computational hydrodynamics, numerical methods, bed sediment transport and bed evolution in time.

Игорь Иванович ПОТАПОВ является зав. лаборатории вычислительной механики Вычислительного центра Дальневосточного отделения Российской академии наук с 2009 г. Сфера научных интересов: механика сыпучих сред, механика гетерогенных сред, механика русловых процессов, численные методы, решение систем алгебраических уравнений.

Igor Ivanovich POTAPOV is Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Laboratory of Computational Mechanics of Computing Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences since 2009 year. Research interests: mechanics of bulk environment, mechanics of heterogeneous environment, mechanics of channel processes, numerical methods, solution of systems of algebraic equations.



DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(2)-13

## О размыве дна, вызванном взвешенной турбулентной струей

<sup>1</sup> А.Г. Петров, ORCID: 0000-0002-0618-2285 <petrovipmech@gmail.com>

<sup>2</sup> И. И. Потапов, ORCID: 0000-0002-3323-2727 <potapov2i@gmail.com>

<sup>1</sup> Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,  
Россия, 119526, Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1.  
<sup>2</sup> ВЦ ДВО РАН, Россия, 680000, Хабаровск, ул. Ким Ю Чена, д. 65.

**Аннотация.** В работе рассмотрена задача о воздействии турбулентной струи, на размываемое дно. Предложена математическая модель задачи, включающая уравнения Рейнольдса, уравнения переноса кинетической энергии, диссипации турбулентности, концентрации взвешенных частиц и уравнение русловых деформаций. Для описания изменений донной поверхности используется оригинальное уравнение донных деформаций, построенное на основе аналитической модели движения влекомых наносов. Предложен алгоритм решения задачи с помощью метода контрольных объемов. Численное моделирование задачи показало, что при размыве дна под воздействием турбулентной струи возникает характерная донная волна, параметры которой в области размыва, согласуются с известными экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** русловые процессы; деформации дна; взвешенная струя; открытое программное обеспечение.

**Для цитирования:** Петров А.Г., Потапов И. И. О размыве дна, вызванном взвешенной турбулентной струей. Труды ИСП РАН, том 37, вып. 2, 2025 г., стр. 181–194. DOI: 10.15514/ISPRAS–2025–37(2)–13.

**Благодарности:** Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект No 23-71-10091).

## On the Erosion of the Bottom Caused by a Suspended Turbulent Jet

<sup>1</sup> A.G. Petrov, ORCID: 0000-0002-0618-2285 <petrovipmech@gmail.com>

<sup>2</sup> I.I. Potapov, ORCID: 0000-0002-3323-2727 <potapov2i@gmail.com>

<sup>1</sup> *Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS,  
building 1, 101, Prospekt Vernadskogo, Moscow, 119526, Russia.*

<sup>2</sup> *Computing Center of the Far Eastern Branch of RAS,  
65, Kim Yu-chen st., Khabarovsk, 680000, Russia.*

**Annotation.** The paper considers the problem of the impact of a turbulent jet on an eroding bottom. A mathematical model of the problem is proposed, including the Reynolds equations, kinetic energy transfer equations, turbulence dissipation, suspended particle concentrations and the equation of channel deformations. To describe changes in the bottom surface, an original equation of bottom deformations is used, constructed on the basis of an analytical model of the movement of traction sediments. An algorithm for solving the problem using the control volume method is proposed. Numerical modeling of the problem showed that when the bottom is eroded under the influence of a turbulent jet, a characteristic bottom wave arises, the parameters of which in the erosion region are consistent with known experimental data.

**Keywords:** channel processes; bottom deformations; suspended jet; open-source software.

**For citation:** Petrov A.G., Potapov I.I. On the erosion of the bottom caused by a suspended turbulent jet. *Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS*, vol. 37, issue 2, 2025. pp. 181-194 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(2)- 13.

**Acknowledgements.** The research was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 23-71-10091.

### 1. Введение

Изучение конфигурации поля течения и донных деформаций, вызванных смещенной относительно дна горизонтальной струи, является предметом исследования многих исследователей на протяжении последней четверти века [1]. Результаты таких исследований применяются во многих инженерных приложениях. Например, при проектировании горелок, котлов, камер сгорания газовых турбин и систем впрыска топлива и т. д. [1-4]. Область их применения постоянно растет. Например, в данной работе рассматривается влияние плоской взвешенной струи на размыв дна, сложенного из несвязного донного материала. Появление таких задач связано с тем, что струи, создаваемые винтами больших судов, могут порождать придонные потоки [1, 4], движущиеся со скоростью от 1 до 4 м/с. Таким образом, донные отложения могут быть легко размывы, что приводит к образованию на дне донных волн, приводящих к непроектной эксплуатации акватории.

В работе предложена математическая модель задачи о развитии процесса эрозии дна, под действием горизонтальной взвешенной струи. Выполнено сравнение результатов расчетов локальных донных деформаций с известными экспериментальными данными, [7, 13]. Метод решения сформулированной задачи и алгоритм ее расчета реализован в рамках информационной системы «Амур», с открытым исходным кодом [14].

### 2. Математическая постановка задачи гидродинамики

Рассмотрим движение турбулентного потока, порождаемого в канале длиной  $L$  и начальной глубиной  $H$ , определяемого плоской взвешенной струей шириной  $b$ , втекающей в расчетную область через сопло на границе  $\Gamma_{in}$  со скоростью  $u_{in}$ . Ось сопла находится на расстоянии  $h$  от отметки невозмущенного дна канала. Порождаемый струей поток движется слева направо вдоль оси  $x$ . Дно канала  $\Gamma_{bed}$  сложено из несвязного (песчаного) материала под действием струи деформируется и приобретает геометрически сложную форму, изменяющуюся во

времени. На рис. 1 показана расчетная область задачи  $\Omega$ , где  $\Gamma_{in}$ ,  $\Gamma_{out}$ ,  $\Gamma_{top}$  и  $\Gamma_{bed}$  – входная, выходная, верхняя и нижняя границы расчетной области соответственно.

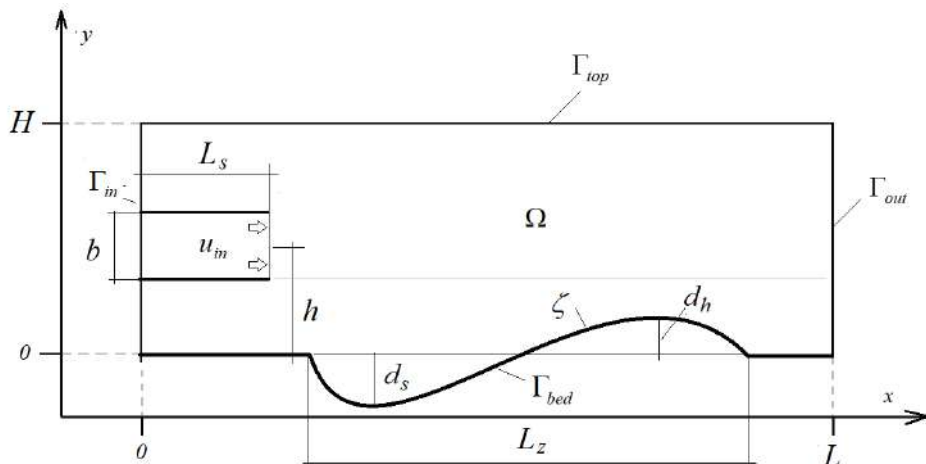


Рис. 1. Геометрия расчетной области  $\Omega$  и ее границ  $\Gamma_k$ .  
Fig. 1. Geometry of the computational domain  $\Omega$  and its boundaries  $\Gamma_k$ .

Для описания движения осредненного гидродинамического потока воспользуемся уравнениями Рейнольдса [8, 9]

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{d\vec{u}}{dt} = \nabla \cdot \vec{T}, \quad (2)$$

$$\vec{T} = -\frac{P}{\rho_w} \vec{\delta} + \eta (\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T), \quad (3)$$

В уравнениях (1)-(3)  $\nabla$  – оператор Гамильтона,  $\vec{u} = (u_x, u_y)$  – вектор осредненной по Рейнольдсу скорости потока,  $\vec{\delta}$  – единичный тензор,  $\vec{T}$  – тензор напряжений,  $t$  – временная координата,  $P$  – давление воды,  $\rho_w$  – плотность воды,  $\eta = \eta_t + \eta_{mol}$  – приведенная кинематическая вязкость потока, состоящая из суммы турбулентной вязкости  $\eta_t$  и молекулярной вязкости потока  $\eta_{mol} = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ . Для замыкания уравнений (1)-(3) и определения турбулентной вязкости потока  $\eta_t$  используется стандартная модель турбулентности  $k - \varepsilon$  [8].

$$\frac{dk}{dt} = \nabla \cdot \left[ \left( \frac{\eta_t}{\sigma_k} + \eta_{mol} \right) \nabla k \right] + P_k - \varepsilon, \quad (4)$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \nabla \cdot \left[ \left( \frac{\eta_t}{\sigma_\varepsilon} + \eta_{mol} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \varepsilon), \quad (5)$$

$$\eta_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad P_k = \eta_t (\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T) : \nabla \vec{u}, \quad (6)$$

где  $k$  – кинетическая энергия турбулентности,  $\varepsilon$  – диссипация турбулентности,  $\sigma_k = 1$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.3$ ,  $C_{\varepsilon 1} = 1.44$ ,  $C_{\varepsilon 2} = 1.92$ ,  $C_\mu = 0.09$  – константы модели.

Расчетная область  $\Omega$  снизу ограничена подвижной донной поверхностью  $\zeta = \zeta(t, x)$ , эволюция которой описывается следующим оригинальным уравнением [9]:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( G_0 B \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( G_0 \left( C \frac{\partial p}{\partial x} - G_0 A + G_{xs} \right) \right), \quad (7)$$

$$\text{где} \quad A = \max(0, 1 - \Xi), \quad B = \frac{1}{\tan \varphi} \left( \frac{\Xi}{2} + A \right), \quad C = \frac{A}{s \tan \varphi},$$

$$\Xi = \sqrt{\frac{T_0}{|T|}}, \quad G_0 = \frac{4}{3} \frac{T_b^{3/2}}{(1 - \varepsilon_s)(\rho_s - \rho_w)g \tan \varphi \sqrt{\rho_w \kappa}}, \quad p = \frac{P_b}{\rho_w g},$$

$$T_0 = \frac{\alpha_0 \kappa^2 \tan \varphi}{c_x} (\rho_s - \rho_w) g d_{50}, \quad s = f \rho_b, \quad \rho_b = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}.$$

Для определения расхода взвешенных наносов решалось уравнение концентрации [20]

$$\frac{dS}{dt} - \frac{\partial}{\partial y} [W_s S] = \nabla \cdot \left[ \left( \frac{\eta_t}{\sigma_s} + \eta_{mol} \right) \nabla S \right], \quad (8)$$

$$G_{xs} = \int_{\zeta}^H S u_x dy, \quad (9)$$

с замыканием Ван-Рейна

$$S_{bed} = \frac{0.18}{D_b} \frac{\theta - \theta_c}{\theta_c} \begin{cases} 1, & \theta - \theta_c > 0 \\ 0, & \theta - \theta_c \leq 0 \end{cases}, \quad D_b = \left( \rho_b g \frac{d_{50}^3}{\eta_{mol}^2} \right)^{1/3}.$$

Здесь  $p$  – гидравлический напор,  $\varphi$  – угол внутреннего трения донных частиц под водой,  $T_b$  – придонное касательное напряжение,  $\rho_s$  – плотность песка,  $\varepsilon_s$  – пористость донного материала,  $g$  – ускорение свободного падения,  $K$  – параметр Кармана,  $T_0$  – напряжение, определяющее начало движения донных частиц на ровном дне,  $\alpha_0 = 9/8$  – параметр формы частиц [11],  $d_{50}$  – диаметр частиц,  $f$  – концентрация донных частиц в активном придонном слое,  $P_b$  – придонное напорное давление,  $C_x$  – коэффициент лобового сопротивления донных частиц.

Уравнения (2), (4), (5), (7), (8) замыкаются начальными условиями

$$\vec{u} = \vec{u}_0, \quad k = k_0, \quad \varepsilon = \varepsilon_0, \quad S = S_0, \quad (x, y) \in \Omega, \quad \zeta = \zeta_0, \quad x \in \Gamma_{bed}, \quad (10)$$

и граничными условиями

$$\vec{u} = \vec{u}_{in}, \quad k = k_{in}(u), \quad \varepsilon = \varepsilon_{in}(k), \quad S = S_{in}, \quad (x, y) \in \Gamma_{in}, \quad (11)$$

$$\vec{u} = 0, \quad k = 0, \quad \varepsilon = 0, \quad S = S_{bed} \quad (x, y) \in \Gamma_{bed}, \quad (12)$$

$$(\vec{n} \cdot \nabla) \vec{u} = 0, \quad \nabla k \cdot \vec{n} = 0, \quad \nabla \varepsilon \cdot \vec{n} = 0, \quad \nabla S \cdot \vec{n} = 0, \quad (x, y) \in \Gamma_{out} \bigcup \Gamma_{top}, \quad (13)$$

$$\zeta = \zeta_0, \quad x < x_0 \in \Gamma_{bed}, \quad (14)$$

$$B \frac{\partial \zeta}{\partial x} = \left( A - C \frac{\partial p}{\partial x} \right), \quad x \in \Gamma_{in}, \quad \frac{\partial \zeta}{\partial x} = 0, \quad x \in \Gamma_{out}, \quad (15)$$

где  $\vec{u}_0, k_0, \varepsilon_0, \zeta_0$  – поля начальных значений для искоемых функций,  $\vec{u}_{in}, k_{in}, \varepsilon_{in}$  – искоемые функции на входе в область из сопла,  $b$  – ширина струи,  $h$  – расстояние между осью центра струи и линией невозмущенного дна.

$\varepsilon_{in}$  – профили функций на входе в область,  $x_0$  – координата границы между неразрываемым и размываемым участками дна.

Профили кинетической энергии и диссипации турбулентности на входе в область определяются следующим образом [9]:  $k_{in} = 0.005u_{in}^2, \varepsilon_{in} = 0.1k_{in}^2$ .

### 3. Дискретизация расчетной области

Для численного решения задачи (1)-(15) используется локально-ортогональная расчетная сетка, фрагмент сетки приведен на рис. 2. Для построения локально ортогональной сетки применяются однородные эллиптические уравнения [10] со скользящими узлами на донной поверхности

$$\begin{aligned} \alpha \frac{\partial^2 x}{\partial \xi^2} - 2\beta \frac{\partial^2 x}{\partial \xi \partial \psi} + \omega \frac{\partial^2 x}{\partial \psi^2} &= 0, \\ \alpha \frac{\partial^2 y}{\partial \xi^2} - 2\beta \frac{\partial^2 y}{\partial \xi \partial \psi} + \omega \frac{\partial^2 y}{\partial \psi^2} &= 0, \end{aligned} \quad (16)$$

где  $0 \leq \xi, \psi \leq l$  – пространственная горизонтальная и вертикальная локальная координаты соответственно. В данных координатах строится вспомогательная расчетная сетка  $\xi_i, \psi_i$  для определения координат узлов  $x_i, y_i$  локально-ортогональной расчетной сетки. Коэффициенты  $\alpha, \beta, \omega$  определяются следующим образом

$$\alpha = \left( \frac{\partial x}{\partial \psi} \right)^2 + \left( \frac{\partial y}{\partial \psi} \right)^2, \quad \beta = \frac{\partial x}{\partial \psi} \frac{\partial x}{\partial \xi} + \frac{\partial y}{\partial \psi} \frac{\partial y}{\partial \xi}, \quad \omega = \left( \frac{\partial x}{\partial \xi} \right)^2 + \left( \frac{\partial y}{\partial \xi} \right)^2.$$

Пример получаемой локально-ортогональной контрольно-объемной сетки, полученной при деформации донной поверхности приведен на рис. 2с.

При решении эллиптических уравнений, искоемые сеточные неизвестные  $x_{ij}, y_{ij}$  на границах расчетной области  $\Gamma_{in}, \Gamma_{top}, \Gamma_{out}$  использовались граничные значения  $x, y$ , определенные по начальным фиксированным координатам узлов прямоугольной расчетной области  $x_{ij}^0 = x_{ij}^0, y_{ij}^0 = y_{ij}^0$ . При вычислении граничных координат  $x_{i0}, y_{i0}$  на границе подвижного дна

$\Gamma_{bed}$ , на каждой итерации по нелинейности при решении уравнений (16) использовался следующий алгоритм коррекции координат  $x_{i0}, y_{i0}$ .

$$\vec{\tau}_i = \vec{X}_{i+1,0} - \vec{X}_{i-1,0}, \quad \vec{n}_i = \vec{X}_{i,1} - \vec{X}_{i,0}, \quad \Delta x = \delta \vec{\tau}_i \vec{n}_i, \quad x_{i0} = x_{i0} + \Delta x, \quad y_{i0} = \zeta(x_{i0}) \quad (17)$$

где  $\vec{X}_{ij} = (x_{ij}, y_{ij})$  – искоемые значения координатных узлов [10],  $\zeta = \zeta(x)$  – кубический сплайн донных отметок, создаваемый на основе расчетных данных, получаемых из решения уравнения (7),  $0.05 < \delta < 0.1$ .

### 4. Алгоритм решения уравнения донных деформаций

Для решения уравнений (1)-(3) и (4)-(6) в работе используется метод контрольных объемов, подробно описанный в работах [9, 11]. Контрольно-объемный дискретный аналог для уравнения (7), записанный в нотации Патанкара [9], имеет следующий вид

$$a_p \zeta_p = a_0 \zeta_p^n + (a_E \zeta_E + a_W \zeta_W) + S_p,$$

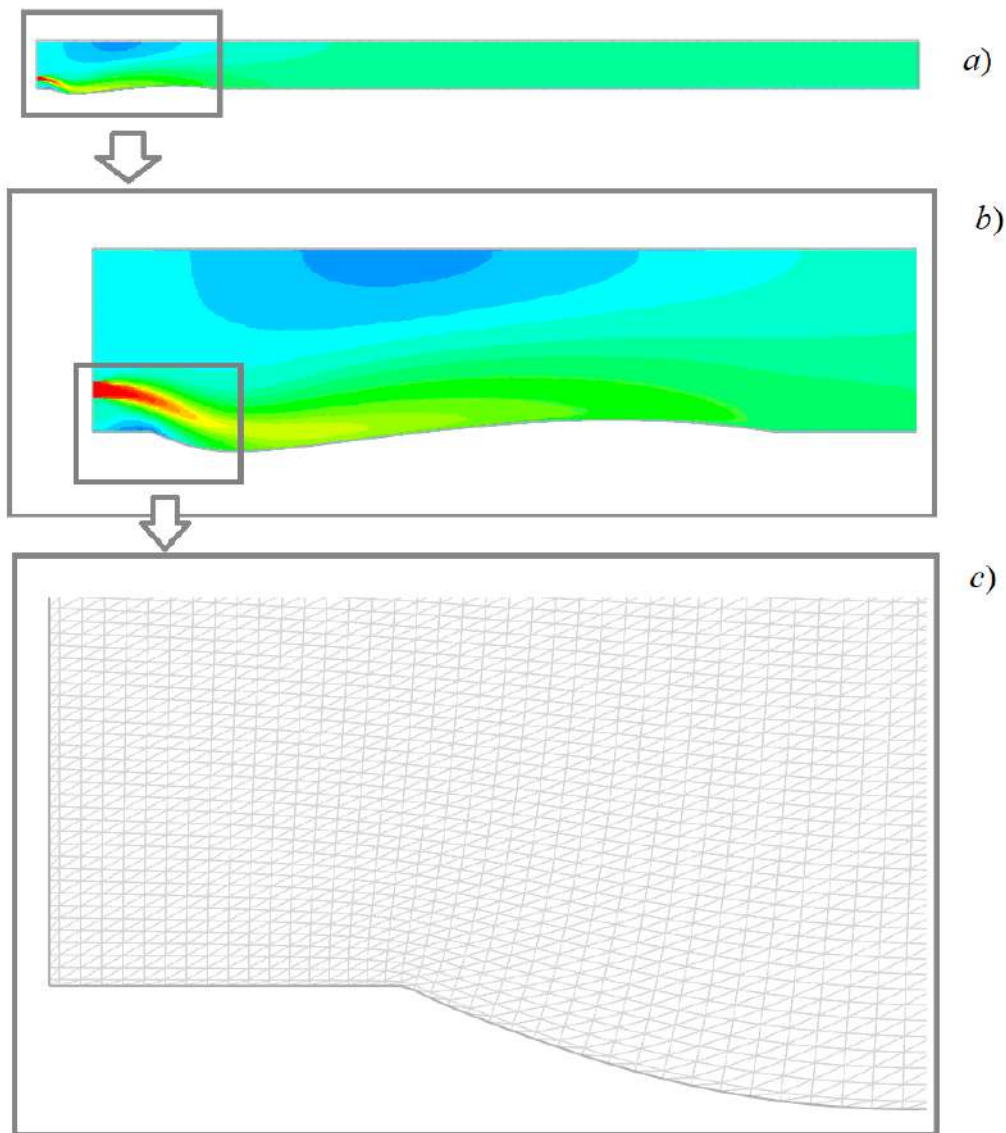


Рис. 2. Пример расчета с перестраиваемой ортогональной сеткой области.  
Fig. 2. Example of calculation with a reconfigurable orthogonal grid of the area.

$$\begin{aligned} a_E &= \frac{(G_0)_e B_e}{\Delta x_e}, \quad a_W = \frac{(G_0)_w B_w}{\Delta x_w}, \quad a_{p0} = \frac{\Delta x_p}{\Delta t}, \quad a_p = a_{p0} + a_E + a_W, \\ S_p &= c_E p_E - c_P p_P + c_W p_W - ((q_0 A)_e - (q_0 A)_w) + \Delta x_p Q_P, \\ c_E &= \frac{(G_0)_e C_e}{\Delta x_e}, \quad c_W = \frac{(G_0)_w C_w}{\Delta x_w}, \quad c_P = c_E + c_W, \\ \Delta x_e &= x_{i+1} - x_i, \quad \Delta x_w = x_i - x_{i-1}, \quad \Delta x_p = 0.5(x_{i+1} - x_{i-1}), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (G_0)_e &= G_* \frac{(\tau_{i+1})^{3/2}}{(\cos \gamma)_e}, \quad (G_0)_w = G_* \frac{(\tau_i)^{3/2}}{(\cos \gamma)_w}, \\
 (\cos \gamma)_e &= \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{\zeta_{i+1} - \zeta_i}{\Delta x} \right)^2}}, \quad (\cos \gamma)_w = \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{\zeta_i - \zeta_{i-1}}{\Delta x} \right)^2}}, \\
 A_e &= \max(0, 1 - \Xi_e), \quad B_e = \frac{1}{tg \varphi} \left( \frac{\Xi_e}{2} + A_e \frac{1+s}{s} \right), \quad C_e = \frac{A_e}{s tg \varphi}, \\
 G_* &= \frac{4}{3} \frac{(1-\varepsilon)^{-1}}{(\rho_s - \rho_w) g tg \varphi \sqrt{\rho_w \kappa}}, \quad \Xi_e = \sqrt{\frac{T_{*e}}{T_e}}, \quad \Xi_w = \sqrt{\frac{T_{*w}}{T_w}}, \\
 T_{*e} &= T_0 \left( 1 + \frac{1}{\tan \varphi} \frac{\zeta_{i+1} - \zeta_i}{x_{i+1} - x_i} \right).
 \end{aligned}$$

Здесь  $N$  – количество узлов расчетной области,  $x_i$ ,  $i = 0..N$  – координаты узлов расчетной области,  $\zeta_i$ ,  $i = 0..N$  – уровень донной поверхности, индекс  $P$  обозначает значение функции в центральной точке рассматриваемого контрольного объема, индексы  $W$  и  $E$  – в центральных точках контрольного объема, находящегося соответственно слева и справа от рассматриваемого, индексы  $w$  и  $e$  – на левой и правой гранях рассматриваемого контрольного объема соответственно.

Для определения придонных касательных напряжений в канале воспользуемся методом пристеночных функций [12]. Для этого рассмотрим течение в прилегающей ко дну ячейке с вертикальным сечением ячейки  $h_s$ . Средняя касательная скорость потока  $U_z$  в данной ячейке известна из решения задачи (1)-(3). Таким образом, можно вычислить динамическую скорость в придонной ячейке  $u_\tau = \nu h^+ / h_s$  с помощью итерационной схемы [12], где  $h^+$  определяется по методу Ньютона

$$h_{n+1}^+ = h_n^+ + \frac{F_* - F_n}{u_n^+}, \quad F_* = \frac{U_z h}{\nu}, \quad u_n^+ = \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{h_n^+}{0.13} \right), \quad F_n = \frac{h_n^+}{\kappa} \left( \ln \left( \frac{h_n^+}{0.13} \right) - 1 \right) - F_g$$

где  $n$  – временная итерация,  $F_g = 73.50481$ . Зная динамическую скорость в придонной ячейке, придонное касательное напряжение вычисляется по формуле [12]:  $T = \rho_w u_\tau^2$ .

## 5. Результаты численного моделирования

Для верификации предлагаемой модели (1)-(15) было выполнено решение нескольких тестовых задач, о воздействии взвешенной струи на несвязное размываемое дно. Расчеты проводилось при следующих физико-механических и гранулометрических параметрах [7]:  $\rho_w = 1000$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_s = 2650$  кг/м<sup>3</sup>,  $c_x = 0.45$ ,  $d_{50} = 0.71$  мм,  $\varepsilon_s = 0.375$ ,  $b = 0.0266$  м,  $h = 1.5b$ ,  $L = 3$  м,  $H = 8b$ ,  $u_{in} = 1.08$  м/с. Расчеты выполнялись на равномерных в начальный момент сетках с разрешением в  $60 \times 900$ ,  $120 \times 1800$ ,  $180 \times 2700$  узлов. Различия в донных деформациях полученные на сетка  $120 \times 1800$ ,  $180 \times 2700$  не превышали 3%, поэтому в качестве основной расчетной сетки была принята сетка  $120 \times 1800$ .

Параметры  $\kappa$  и  $tg \varphi$  в расчетах определялись по формулам [8].

$$\operatorname{tg} \varphi=1.15 d_{50}^{(1 / 7)}, \quad \kappa=\sqrt{\frac{c_x \theta_*}{\alpha_0 \operatorname{tg} \varphi}}, \quad \theta_*=0.047,$$

где  $\theta_*$ – критическое значение числа Шильдса,  $\alpha_0 \approx 1$  – форм фактор частиц.

Результаты одного из вариантов решения задачи (1)-(14) приведены на рис 3, 4. На рис. 3 представлены поля модуля скорости и функции тока.

На рис. 4 представлены донные профили (кривые 1-6) полученные под действием взвешенной струи в различные моменты времени. Их анализ (см рис. 4) показывает, что характер изменения максимальных отметок размыва донной поверхности качественно согласуется с экспериментальными данными [7]. Однако использование при моделировании донного размыва только уравнения русловых деформаций (7) без учета механизмов переноса наносов во взвешенном состоянии  $G_{xs}=0$ , приводит к значительному в несколько раз занижению глубины максимального размыва донной поверхности взвешенной струей. Это связано в первую очередь с низкими числами Рауза задачи  $R_a \leq 2$ , указывающим на необходимость учета в модели уравнения (8).

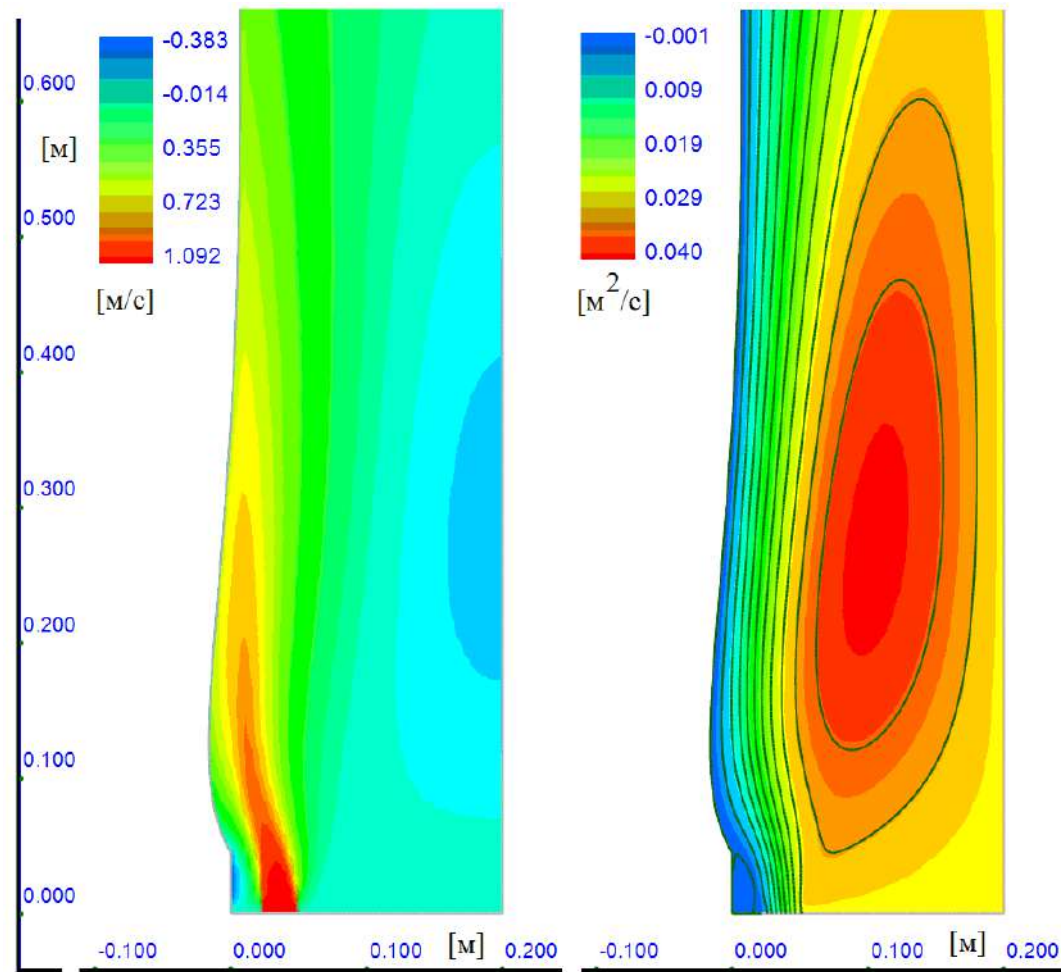


Рис. 3. Распределение поля модуля скорости и функции тока в окрестности сопла при  $t=1200$  с.  
Fig. 3. Distribution of the velocity module field and the current function  
in the vicinity of the nozzle at  $t=1200$  s.

Использование полной модели донных деформаций с учетом уравнений (8)-(9) позволили протестировать модель на решении задачи со следующими параметрами [13]:

$$h = 0.0515 \text{ м}, b = 0.0117 \text{ м}, L = 3 \text{ м}, H = 90 \text{ м}, u_{in} = 0.61 \text{ м/с}, d_{50} = 0.00022 \text{ м}, L_s = 0 \text{ м}.$$

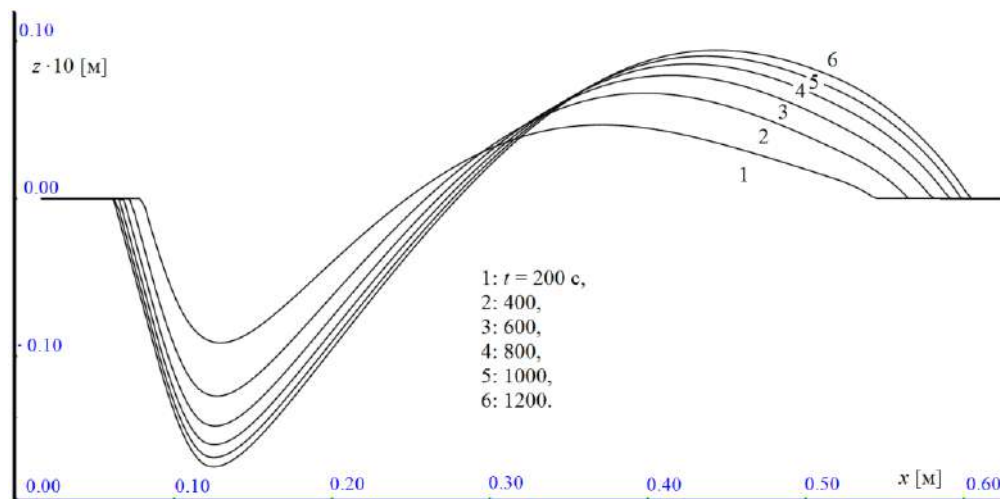


Рис. 4. Развитие поверхности дна при локальной эрозии  $h = 1.5b_0$ .  
Fig. 4. Development of the bottom surface during local erosion  $h = 1.5b_0$ .

Результаты моделирования, представленные на рис. 5 профилями донных отметок в различные моменты времени (кривые 1-7), показывают, что в условиях локального размыва предложенная модель (1)-(15) демонстрирует хорошее согласование вычисленных и экспериментальных данных в промоине. Рассогласование расчетных и экспериментальных данных не превышает 15% на всем протяжении численного эксперимента. Однако в области намыва, расчетные и экспериментальные результаты имеют существенное (до двух раз) расхождение.

Экспериментаторы [13] указывают, что взвешенная струя создает подпор напорного склона намываемой дюны, уклон которой за счет этого эффекта превышает угол естественного откоса донного материала. Некоторую настороженность в связи с этим вызывает таблица углов естественного откоса частиц  $\varphi$ , приведенная в работе [13] в которой из трех фракций использованных авторами наиболее мелкие частицы имеют максимальный угол естественного откоса, достигающий у частиц  $d_{50} = 0.00022 \text{ м}$ ,  $\varphi = 36.5^\circ$ , который уменьшается с ростом диаметра частиц. Эта зависимость противоречит используемой в модели формуле  $\text{tg} \varphi = 1.15 d_{50}^{(1/7)}$ , подтвержденной многочисленными экспериментами [14]. Возможно, авторы работы [14] привели «фиктивные» углы уклоны донной волны, возникающие в связи с подпором донных частиц на склоне восходящей вдоль склона струей. Однако это не объясняет возникновение аналогичных уклонов на подветренной стороне донной волны. С другой стороны, возможно искусственная диффузия выбранного численного метода, не позволяется образоваться отрывному течению за гребнем донной волны которое возможно смогло бы поддерживать высокий угол откоса с подветренной стороны дюны. Экспериментаторы не указывают нам на наличие такого обратного течения за донной волной, поэтому вопрос повышенной крутизны намываемой донной волны на наш взгляд требует дополнительного исследования.

Необходимо отметить трудности, возникающие при моделировании данной задачи предложенным методом. Так, при углублении каверны размыва ее подветренная сторона движется к границе  $\Gamma_{in}$ , поскольку граничные узлы (на  $\Gamma_{in}$ ) не являются скользящими, при полном размыве горизонтального участка дна под струей расчетная сетка перестает быть

ортогональной и расчет задачи приходится прекращать. Попытка использования скользящих узлов на стенке  $\Gamma_{in}$  привела к возникновению нефизичных пульсаций потока, связанных с трудностями в формировании граничных условий для взвешенной струи, когда фиксированную геометрию щели (область втекания струи) необходимо интерполировать на движущуюся во времени сетку границы.

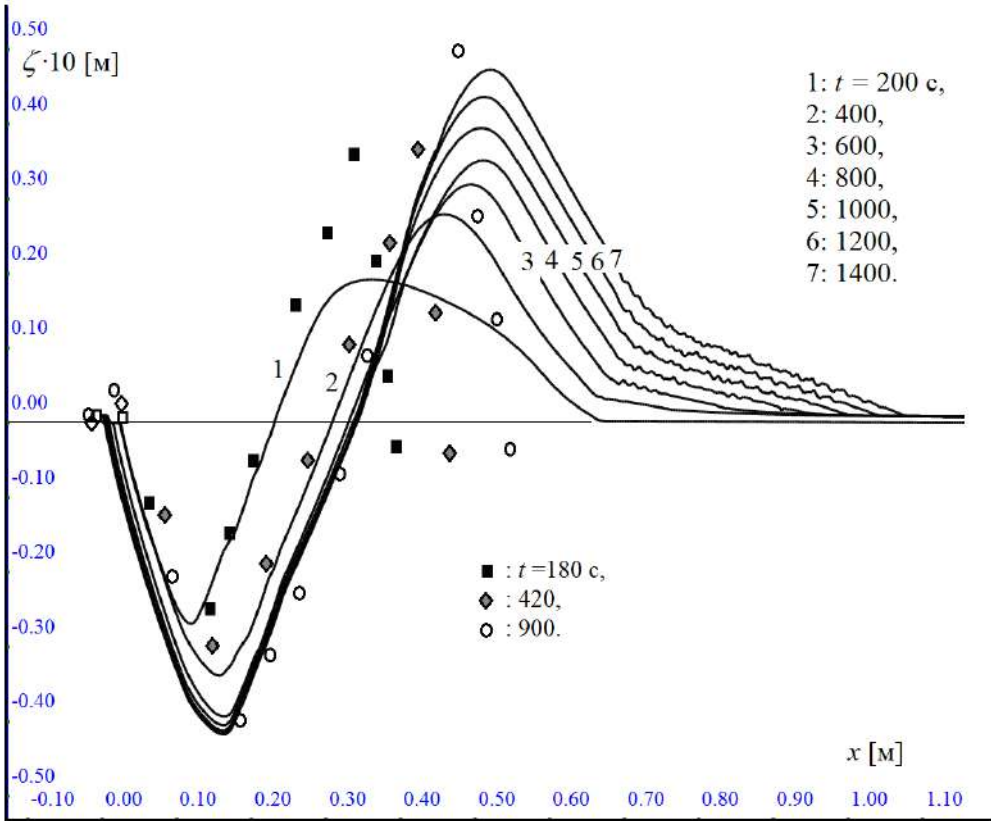


Рис. 5. Развитие донной поверхности при локальном размыве струей, взвешенной на высоту  $h = 4.5b$ . Сравнение расчетных (кривые 1-7) донных отметок с лотковыми экспериментальными данными (точечные множества), приведенными в работе [13].

Fig. 5. Development of the bottom surface during local erosion by a jet suspended at a height of  $h = 4.5b$ . Comparison of calculated (curves 1-7) bottom marks with experimental flume data (point sets) given in the work [13].

Для преодоления этого недостатка была рассмотрена задача с выносом струи на расстояние  $L_s$  в расчетную область (рис. 1). Вынос струи позволяет увеличить плоскую размываемую площадку дна под струей. Кроме того, вынос струи в расчетную область физически более оправдан при моделировании воздействия струй, порождаемых корабельными винтами.

В расчетах с выносом геометрия сетки в расчетной области замораживалась на высоте  $h$  при решении системы уравнений (16). Это делалось во избежание искривления канала при выносе струи в расчетную область, связанного с изменением геометрии сетки в расчетной области при возникновении донных деформаций. В расчетах на верхней и нижней границах выносимой струи задавались условия прилипания. Для самой струи выполнялись условия (11).

Результаты расчетов деформации донной поверхности для задачи с параметрами предыдущего примера, представленные на рис. 6 – 7.

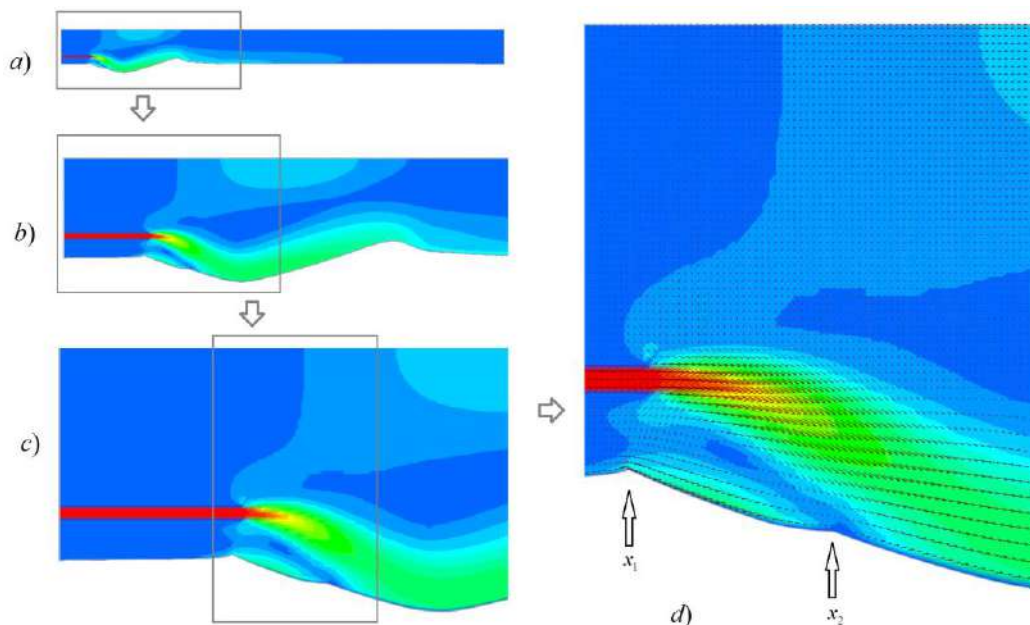


Рис. 6. Распределение поля модуля скорости (при  $t = 1200$  с) в районе сопла, представленное в разных масштабах (a-d). На рис. d показаны характерные изломы донной поверхности, возникающие под влиянием подструйного вихря.

Fig. 6. Distribution of the velocity modulus field (at  $t = 1200$  s) in the nozzle region, presented in different scales (a-d). Fig. d shows characteristic fractures of the bottom surface that arise under the influence of the underjet vortex.

Анализ полученных решений показал, что характер деформаций донной поверхности при их решении имеет как количественные, так и качественные отличия. Характер донных деформаций на начальном периоде времени, примерно до 400 с. в обеих задачах, отличается не более чем на 15%. Однако, уже на этом этапе гидродинамический характер потока под струей имеет значительные отличия, поскольку размер вихря обратного тока во втором случае существенно превышает таковой в задаче без выноса. При достижении максимальной глубины размыва, близкой к  $2b$ , в задаче с выносом струи происходят смещения области прижатия струи ко дну вверх по потоку. Смещение места присоединения струи вверх по потоку, вероятно, происходит из-за усиления под ней вихря обратного тока. В результате на дне образуется характерный перелом донной поверхности в области присоединения потока (рис. 6. c, d). В дальнейшем, в задаче с выносом струи существенно ускоряется размыв донной поверхности, как по фронту, так и в глубину.

Так, на 15 минуте размыва глубина каверны в задаче с выносом достигает глубины, полученной в работе [13] только через 30 минут с начала размыва. Поскольку в задаче с выносом струи фронт донной волны движется даже несколько быстрее, чем в задаче без выноса, ее результаты по длине донной волны еще больше не согласуются с данными работы [13]. Однако, поскольку полученный в расчетах напорный и подветренный склон донной волны близок к углу естественного откоса, авторы полагают, что полученное решение является физически более правдоподобным, чем уклоны, полученные в работе [13]. Неясным остается факт быстрого осаждения всех взвешенных частиц на подветренном склоне донной волны ниже по потоку, приведенный в работе [13]. Частицы, используемые в эксперименте [13], относятся к мелким пескам, обладающим относительно небольшими значениями гидравлической крупности, следовательно, за гребнем донной волны вниз по потоку должен быть шлейф их выпадения, сглаживающий подошву подветренного склона.

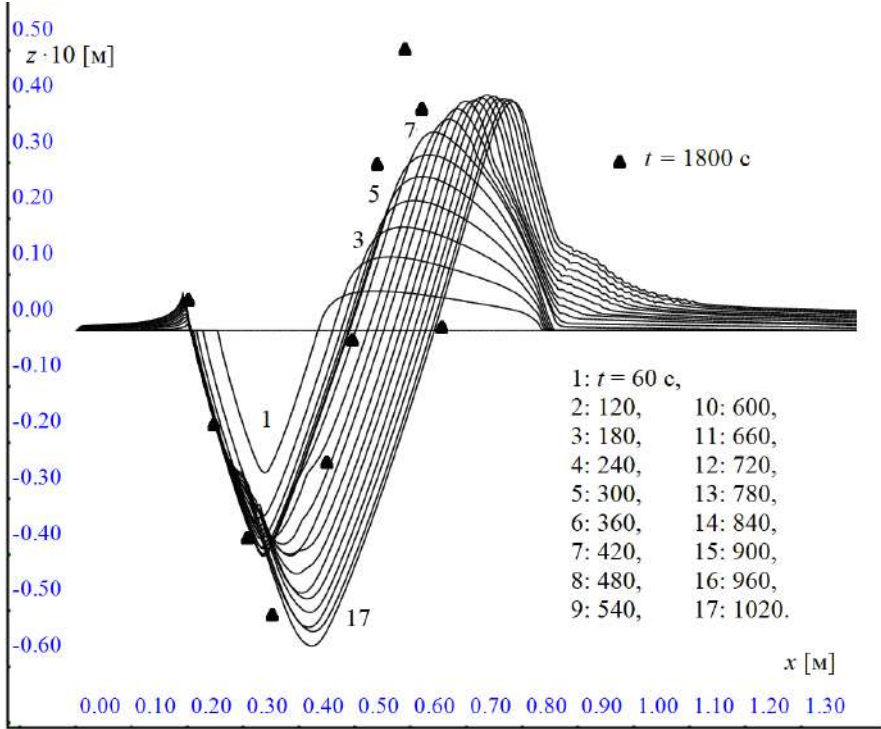


Рис. 7. Развитие донной поверхности при локальном размыве струей, взвешенной на высоту  $h = 4.5b$  с выносом в область  $L_s = 0.2 \text{ м}$ .

Fig. 7. The development of the bottom surface during local erosion by a jet suspended at  $h = 4.5b$  height with removal to the  $L_s = 0.2 \text{ m}$  region.

### Закключение

1. Из полученных результатов следует, что предложенная математическая модель позволяет делать достаточно точный прогноз изменения максимальной глубины размыва дна.
2. Решения двух задач, с выносом и без выноса взвешенной струи в расчетную область, показывают наличие качественных различий в получаемых результатах, из чего следует, что при прогнозировании влияния струй от корабельных винтов использование постановки без выноса струи может давать заниженные значения максимальных размывов донной поверхности.
3. Для повышения прогностической ценности предложенных моделей и ее дополнительной калибровки необходимо выполнение ее верификации на более обширном экспериментальном материале.

### Список литературы / References

[1]. B. M. Sumer, J. Fredsoe, The Mechanics of Scour in the Marine Environment//World Scientific, River Edge, NJ, 2002, pp. 101 -103.

[2]. A. Nasr, J. C. S. Lai A turbulent plane offset jet with small offset ratio// Springer-Verlag. Experiments in Fluids. 1998, Vol. 24, pp. 47-57.

[3]. Chen Fu, Mesbah Uddin, Alex Curley. Insights derived from CFD studies on the evolution of planar wall jets, Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2016. Vol.10:1, pp. 44-56.

- [4]. Yonggang Cui, Wei Haur Lam, Tianming Zhang, Chong Sun, Gerard Hamill. Scour Induced by Single and Twin Propeller Jets//J. Water. 2019, Vol. 1097, N. 11, pp. 2-19.
- [5]. Longe, P. Hebert, and R. Byl, "Erosion problems at existing quay constructions due to bow thrusters and main propellers of ships when berthing or leaving, «in Bulletin of the Permanent International Association of Navigation Congresses [PIANC], 1987.
- [6]. Maoxing Wei, Yee-Meng Chiew, Nian-Sheng Cheng. Recent advances in understanding propeller jet flow and its impact on scour // Phys. Fluids **32**, 101303, 2020, 32 p.
- [7]. Karki R., Faruque M. A. A., Balachandar R. Local scour by submerged offset jets// Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Water Management 160, Issue WM3, 2007, pp. 169–179.
- [8]. Петров А.Г., Потапов И.И. Избранные разделы русловой динамики // М.: Ленанд. 2019. 244 с. / Petrov A.G., Potapov I.I. Selected sections of channel dynamics // М.: Lenand. 2019. 244 p.
- [9]. Королёва К. С., Потапов И. И. О развитии донных форм, возникающих при набегании осветленного турбулентного потока на несвязное дно// ПМТФ, 2022, N. 63. № 1, с. 80-88./ Koroleva K. S., Potapov I. I. On the development of bottom forms arising from the onset of a clarified turbulent flow on a disjoint bottom// PMTF, 2022, N. 63, No. 1, pp. 80-88. (in Russian).
- [10]. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей: В 2 т. Т. 2. Методы расчета различных течений. М.: Мир, 1991, 552 с. / Fletcher K. Computational methods in fluid dynamics: In 2 vols. Vol. 2. Methods for calculating various flows. Moscow: Mir, 1991, 552 p. (in Russian).
- [11]. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984, 124 с. / Patankar S. Numerical methods for solving problems of heat transfer and fluid dynamics. Moscow: Energoatomizdat, 1984, 124 p. (in Russian).
- [12]. Луцкий А. Е., Северин А. В. Простейшая реализация метода пристеночных функций. М., 2013. (Препр. / Ин-т прикл. математики им. М. В. Келдыша; № 38)/ Lutsky A. E., Severin A. V. The simplest implementation of the wall functions method. Moscow, 2013. (Preprint / M. V. Keldysh Institute of Applied Mathematics; No. 38). (in Russian).
- [13]. K. H. M. Ali A. A. Salehi Neyshabour Localized scour downstream of a deeply submerged horizontal jet// Proc. Instn Ciu. Engrs, Part 2, 1991, 91, Mar., pp. 1-18.
- [14]. Потапов И.И. Использование информационной системы «Амур» для исследования гидродинамических и русловых процессов (<https://github.com/PotapovII/Amur>). // Открытые эволюционирующие системы: вектор развития. Материалы Седьмой международной научно-практической конференции г. Хабаровск, 20–21 ноября 2024 г., стр. 7-11.

## **Информация об авторах / Information about authors**

Александр Георгиевич ПЕТРОВ – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Института проблем механики Российской академии наук. Область научных интересов: механика жидкости, аналитическая механика.

Alexander Georgievich PETROV – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Chief Researcher at the Institute of Problems of Mechanics of the Russian Academy of Sciences. Research interests: fluid mechanics, analytical mechanics.

Игорь Иванович ПОТАПОВ – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лаборатории вычислительной механики Вычислительного центра Дальневосточного отделения Российской академии наук с 2009 года. Сфера научных интересов: численные методы, русловые и гидродинамические процессы в равнинных реках.

Igor Ivanovich POTAPOV – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Laboratory of Computational Mechanics of the Computing Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences since 2009. Area of scientific interests: numerical methods, channel and hydrodynamic processes in lowland rivers.





## Характеристики взаимодействия встречных недорасширенных струй из микросопел

<sup>1</sup> М.А. Корепанов, ORCID: 0000-0003-1272-0091 <kma@udman.ru>

<sup>1</sup> М.Р. Королева, ORCID: 0000-0001-5697-9199 <koroleva@udman.ru>

<sup>2</sup> Е.А. Митрюкова, ORCID: 0000-0002-5350-5366 <mit\_e\_a@mail.ru>

<sup>1</sup> Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН,  
Россия, 426067, Ижевск, ул. Т. Барамзиной, д.34.

<sup>2</sup> Ижевский Государственный Технический Университет им. М. Т. Калашникова,  
Россия, 426069, Ижевск, ул. Студенческая, д.7.

**Аннотация.** В работе представлены результаты параметрических исследований особенностей столкновения сверхзвуковых недорасширенных струй аргона, вытекающих из соосных микросопел, расположенных навстречу друг другу. Для численного моделирования газодинамики сверхзвуковых струй использовалась математическая модель вязкого сжимаемого газа, основанная на классических уравнениях Навье-Стокса, дополненных уравнениями состояния совершенного газа. Задача решалась в двумерной осесимметричной постановке в рамках гипотезы симметричного взаимодействия потоков. Задача решалась методом контрольных объёмов. Для дискретизации конвективных членов использовался метод Годунова, а для дискретизации диссипативных членов использовалась линейная интерполяция значений на границах контрольных ячеек. Интегрирование по времени выполнялось методом Рунге-Кутты третьего порядка. Параметрический анализ был направлен на оценку влияния расстояния между соплами на размеры области взаимодействия струй, а также уровня плотности в этой зоне. Полученные распределения основных газодинамических величин позволили описать структуру течения и оценить форму и размеры локальных зон течения, а также уровень плотности в области контакта двух сверхзвуковых микроструй. Анализ показал, что более плотную зону можно получить сближением сопел, однако в этом случае происходит уменьшение продольного размера этой зоны, что необходимо учитывать при планировании экспериментальных исследований.

**Ключевые слова:** микросопла; недорасширенные сверхзвуковые струи; встречные сопла; газодинамика; численное моделирование.

**Для цитирования:** Корепанов М.А., Королева М.Р., Митрюкова Е.А. Характеристики взаимодействия встречных недорасширенных струй из микросопел. Труды ИСП РАН, том 37, вып. 2, 2025 г., стр. 195– 206. DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(2)-14.

## Interaction of Opposed Underexpanded Jets from Micronozzles

<sup>1</sup> M.A. Korepanov, ORCID: 0000-0003-1272-0091 <kma@udman.ru>

<sup>1</sup> M.R. Koroleva, ORCID: 0000-0001-5697-9199 <koroleva@udman.ru>

<sup>2</sup> E.A. Mitryukova, ORCID: 0000-0002-5350-5366 <mit\_e\_a@mail.ru>

<sup>1</sup> Udmurt Federal Research Center of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
34, Tatyana Baramzina st., Izhevsk City, 426067, Russia.

<sup>2</sup> Kalashnikov Izhevsk State Technical University,  
7, Studencheskaya st., Izhevsk City, 426069, Russia.

**Abstract.** This paper presents the results of parametric studies of the interaction features of supersonic under-expanded argon jets, flowing from coaxial opposite micro-nozzles. A mathematical model of viscous compressible gas based on the classical Navier-Stokes equations supplemented by the equations of state of a perfect gas was used for numerical modelling of the gas dynamics of supersonic jets. The problem was solved in a two-dimensional axisymmetric formulation within the framework of the hypothesis of symmetric flow interaction. The problem was solved by the control volume method. The Godunov method was used to discretize the convective terms, and linear interpolation of the values on the edges of the control cells was used to discretize the dissipative terms. Time integration was performed by the third-order Runge-Kutta method. Parametric analysis was aimed at evaluating the influence of the nozzle spacing on the size of the jet interaction region, as well as the density level in this zone. The obtained distributions of the main gasdynamic quantities allowed us to describe the flow structure and estimate the shape and size of local flow zones, as well as the density level in the contact region of two supersonic microjets. Analysis showed that a denser zone can be obtained by bringing the nozzles closer together, but in this case its longitudinal size decreases, which should be taken into account when planning experimental studies.

**Keywords:** micronozzles; underexpanded supersonic jets; counter nozzles; gas dynamics; numerical modeling.

**For citation:** Korepanov M.A., Koroleva M.R., Mitryukova E.A. Interaction of opposed underexpanded jets from micronozzles. *Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS*, vol. 37, issue 2, 2025. pp. 195-206 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(2)-14.

### 1. Введение

Из-за увеличения числа практических приложений малоразмерных потоков исследования микротечений приобретают все большую актуальность и востребованность. Микротечения используются в системах малой тяги для точного управления ориентацией микроспутников и наноспутников [1], для генерации электроэнергии и охлаждения компонентов MEMS [2] и центральных процессоры [3], для лазерной обработки металлов [4], в технологиях вакуумного газоструйного осаждения наноструктурных пленок благородных металлов [5], в экстремально ультрафиолетовой литографии для генерации низкотемпературной плотной плазмы [6, 7].

В настоящей работе проводится параметрическое исследование особенностей столкновения сверхзвуковых недорасширенных струй аргона, вытекающих из соосных микросопел, расположенных навстречу друг другу. Такая расстановка сопел используется, в частности, для создания газовых мишеней высокой плотности в ЭУФ литографии. Влияние параметров торможения газа на входе в сопла на процессы формирования и развития газовых мишеней исследовались ранее в работах [6-9]. Однако характеристики газовых мишеней определяются еще и геометрическими размерами самих сопел, а также их взаимным расположением. В данной работе проводится численное исследование влияния расстояния между срезами сопел на параметры зоны взаимодействия встречных сверхзвуковых недорасширенных струй.

## 2. Постановка задачи и математическая модель

В работе численно исследуется взаимодействие двух противоположно направленных соосных сверхзвуковых струй аргона, истекающих из конических микросопел (рис. 1). Задача решается в осесимметричной постановке. Схема расчетной области показана на рис. 1. Радиус критического сечения сопла составляет  $R_{cr} = 72.5$  мкм, угол полураствора конуса  $\alpha = 4.3^\circ$ , длина диффузорной части  $L$  равна 5 мм. Радиус свободного объема за соплом составляет  $R_{ves} = 6$  мм, а длина  $L_{ves} = 4; 5; 5.6; 7; 9; 10$  мм.

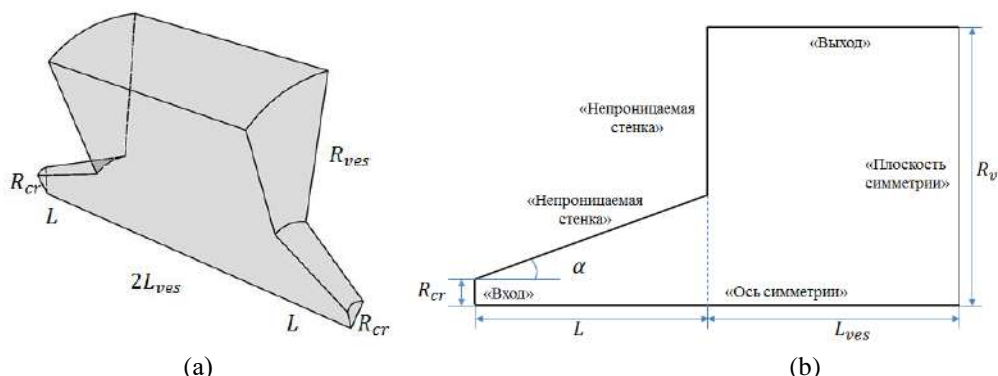


Рис. 1. Геометрическая постановка задачи (а) и схема расчетной области (б).  
Fig. 1. Geometric problem definition (a) and sketch of the calculation domain (b).

Математическое моделирование проводилось на основе численного решения полной системы уравнений Навье-Стокса, дополненной уравнением массовой доли конденсата и слагаемыми в уравнении сохранения энергии, отвечающими за теплоту фазового перехода. Система уравнений, соответствующая законам сохранения массы, импульса и энергии записывается следующим образом [8-10]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho v_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho v_r}{\partial r} + \frac{\rho}{r} v_r = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho v_x}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v_x^2 + p)}{\partial x} + \frac{\partial \rho v_x v_r}{\partial r} + \frac{\rho}{r} v_x v_r = \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{rx}}{\partial r}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho v_r}{\partial t} + \frac{\partial \rho v_x v_r}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v_r^2 + p)}{\partial r} + \frac{\rho}{r} v_r^2 = \frac{\partial \tau_{xr}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{rr}}{\partial r} + (\tau_{rr} + \tau_{\theta\theta}), \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho e}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v_x h)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v_r h)}{\partial r} + \frac{\rho}{r} v_r h = \\ & = \frac{\partial (v_x \tau_{xx} + v_r \tau_{xr} + q_x)}{\partial x} + \frac{\partial (v_x \tau_{rx} + v_r \tau_{rr} + q_r)}{\partial r} + \\ & + (v_x \tau_{rx} + v_r \tau_{rr} + q_r), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $v_x$  и  $v_r$  проекции скорости на оси координат,  $\tau_{xx}, \tau_{xr}, \tau_{rx}, \tau_{rr}, \tau_{\theta\theta}$  – компоненты тензора вязких напряжений,  $\rho$  – плотность газа,  $e$  – полная удельная энергия,  $h$  – полная удельная энтальпия,  $q = (q_x, q_r)$  – вектор плотности теплового потока.

Дополнительные уравнения математической модели описывали компоненты тензора вязких напряжений,

$$\begin{aligned}\tau_{xx} &= 2\eta \frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{2}{3}\eta \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} \right), \\ \tau_{rr} &= 2\eta \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{2}{3}\eta \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} \right), \\ \tau_{xr} &= \tau_{rx} = \eta \left( \frac{\partial v_r}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial r} \right), \\ \tau_{\theta\theta} &= -\frac{2}{3}\eta \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} \right),\end{aligned}\tag{5}$$

тепловые потоки

$$q_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}, q_r = -\lambda \frac{\partial T}{\partial r},\tag{6}$$

полную удельную энергию и энтальпию газа

$$e = \frac{v_x^2 + v_r^2}{2} + C_v T, \quad h = \frac{v_x^2 + v_r^2}{2} + C_p T,\tag{7}$$

и уравнение состояния

$$p = \rho RT,\tag{8}$$

где  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости (9),  $C_v, C_p$  – теплоемкости газа,  $R$  – универсальная газовая постоянная.

Коэффициенты динамической вязкости и теплопроводности газа определяются по формулам [10]:

$$\eta(T) = 26.69 \frac{\sqrt{\mu T}}{\sigma^2 \Omega(Tk/\epsilon)}, \quad \lambda(T) = \frac{\eta(T)C_p}{Pr},\tag{9}$$

$\mu$  является молярной массой газа,  $\sigma$  – потенциальный параметр Леннард-Джонса, характеризующий расстояние нулевого межмолекулярного взаимодействия,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, определяющийся коэффициентом вязкости,  $Pr = 0.7$  – число Прандтля,  $\Omega$  – интеграл столкновения (10), зависящий от закона взаимодействия

$$\Omega(\bar{T}) = \frac{A}{\bar{T}^{0.15}} + \frac{B}{e^{0.77\bar{T}}} + \frac{C}{e^{2.44\bar{T}}}, \quad \bar{T} = \frac{T}{\epsilon/k}\tag{10}$$

В уравнении (10)  $\bar{T}$  является безразмерной температурой, которая определяется энергетическим параметром Леннард-Джонса  $\epsilon$  и постоянной Больцмана  $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К, коэффициенты  $A, B, C$  для аргона задавались следующим образом

$$A = 1.16145, \quad B = 0.52487, \quad C = 2.16178$$

Задача решалась в безразмерном виде. Все физические величины были отнесены к критическим параметрам потока, геометрические к диаметру критического сечения.

На рис.1(б) представлена область интегрирования с указанием границ расчетной области – входная граница, твердые непроницаемые стенки, выходная граница, ось симметрии цилиндрической системы координат и плоскость симметрии. На входе в сопло задавались критические параметры потока, рассчитываемые из заданных параметров торможения. Полное давление равнялось  $4 \cdot 10^5$  Па, полная температура – 293 °К. На твердых стенках ставилось граничное условие прилипания. В начальный момент времени газ в сопле и присоединенном объеме считался неподвижным, давление устанавливалось равным 0.01 Па, температура 293 К. На выходной границе ставилось неотражающее граничное условие, которое позволило при небольшом радиальном размере расчетной области эффективно выводить возмущения за пределы области интегрирования.

Термодинамические свойства аргона определялись в соответствии с [10]:  $C_p = 520$  Дж/(кг·К),  $C_v = 312$  Дж/(кг·К),  $R = 208$  Дж/(кг·К),  $\gamma = \frac{C_p}{C_v} = 1.67$ ,  $\sigma = 3.542$ ,  $\varepsilon/k = 93.3$  К,  $Pr = 0.7$ .

### 3. Метод численного решения

Для расчетной области, показанной на рис. 1 построена блочно-структурированная расчетная сетка, заполненная четырехугольными элементами. Поперечные линии сетки строились вертикально, продольные линии в сопле адаптировались под наклон образующей сопла, а в присоединенном объеме были направлены горизонтально. Был проведен анализ сеточной сходимости на 6 расчетных сетках (рис. 2). Сетка № 1 содержала 27340 расчетных элементов, сетка № 2 – 23112, № 3 – 17715, № 4 – 14514, № 5 – 11848, № 6 – 9540. Сравнивались осевые распределения температур. Влияние мощности сетки особенно заметно в области разгона газа в сопле. Максимальная относительная разница в определении температуры для сеток №1 и №2 составила 3.6%. Для дальнейшего численного моделирования была выбрана сетка № 1. Задача решалась методом контрольных объемов на основе авторского кода [11, 12]. Значения газодинамических величин определялись в центре расчетной ячейки, а потоковые слагаемые на гранях ячеек.

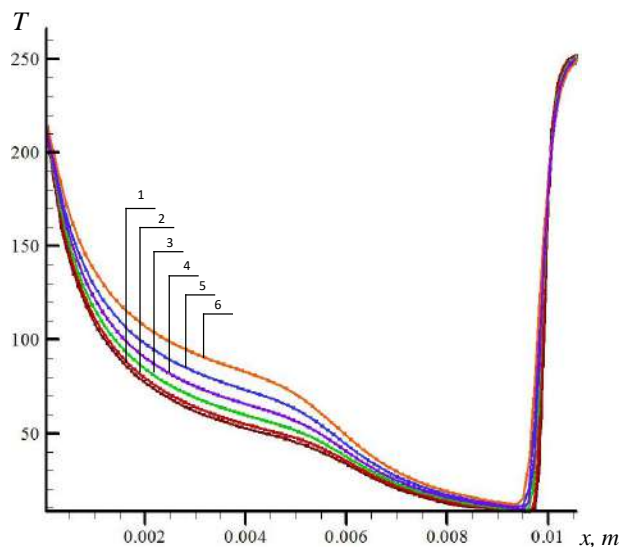


Рис. 2. Анализ сеточной сходимости по распределению температуры вдоль оси при  $L_{ves}=5,6$  мм.  
Fig. 2. Analysis of grid convergence by temperature distribution along the axis at  $L_{ves}=5,6$  mm.

Система уравнений (1)-(4) в интегральной форме может быть записана в следующем виде [13, 14]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_S \rho dS + \oint_L (\rho v_x n_x + \rho v_r n_r) dL + \int_S \frac{\rho v_r}{r} dS = 0, \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_S \rho v_x dS + \oint_L ((\rho v_x^2 + p) n_x + \rho v_x v_r n_r) dL + \int_S \frac{\rho v_x v_r}{r} dS \\ = \oint_L (\tau_{xx} n_x + \tau_{rx} n_r) dL, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_S \rho v_r dS + \oint_L (\rho v_x v_r n_x + (\rho v_r^2 + p) n_r) dL + \int_S \frac{\rho v_r^2}{r} dS = \\ = \oint_L (\tau_{xr} n_x + \tau_{rr} n_r) dL + \int_S (\tau_{rr} + \tau_{\theta\theta}) dS, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_S \rho e dS + \oint_L (\rho v_x h n_x + \rho v_r h n_r) dL + \int_S \frac{\rho v_r h}{r} dS = \\ = \oint_L ((v_x \tau_{xx} + v_r \tau_{xr} + q_x) n_x + (v_x \tau_{rx} + v_r \tau_{rr} + q_r) n_r) dL \\ + \int_S (v_x \tau_{rx} + v_r \tau_{rr} + q_r) dS, \end{aligned} \quad (14)$$

где  $S$  – ячейка сетки,  $L$  – контур сеточной ячейки, который в данном случае является полилинией из четырех отрезков,  $n_x, n_r$  – компоненты вектора единичной нормали к элементам контура  $L$ . В этом случае конечно-объемный аналог уравнений (11)-(14) примет вид:

$$\frac{\Delta \rho_c}{\Delta t} S_c + \sum_{e \in \{i,j,k,l\}} (\rho v_x n_x + \rho v_r n_r)_{ce} L_{ce} + \left( \frac{\rho v_r}{r} \right)_c S_c = 0, \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \frac{\Delta(\rho v_x)_c}{\Delta t} S_c + \sum_{e \in \{i,j,k,l\}} ((\rho v_x^2 + p) n_x + \rho v_x v_r n_r)_{ce} L_{ce} + \left( \frac{\rho v_x v_r}{r} \right)_c S_c \\ = \sum_{e \in \{i,j,k,l\}} (\tau_{xx} n_x + \tau_{rx} n_r)_{ce} L_{ce}, \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \frac{\Delta(\rho v_r)_c}{\Delta t} S_c + \sum_{e \in \{i,j,k,l\}} (\rho v_x v_r n_x + (\rho v_r^2 + p) n_r)_{ce} L_{ce} + \left( \frac{\rho v_r^2}{r} \right)_c S_c = \\ = \sum_{e \in \{i,j,k,l\}} (\tau_{xr} n_x + \tau_{rr} n_r)_{ce} L_{ce} + (\tau_{rr} + \tau_{\theta\theta})_c S_c, \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \frac{\Delta(\rho e)_c}{\Delta t} S_c + \sum_{e \in \{i,j,k,l\}} (\rho v_x h n_x + \rho v_r h n_r)_{ce} L_{ce} + \left( \frac{\rho v_r h}{r} \right)_c S_c = \\ = \sum_{e \in \{i,j,k,l\}} ((v_x \tau_{xx} + v_r \tau_{xr} + q_x) n_x + (v_x \tau_{rx} + v_r \tau_{rr} + q_r) n_r)_{ce} L_{ce} \\ + (v_x \tau_{rx} + v_r \tau_{rr} + q_r)_c S_c, \end{aligned} \quad (18)$$

Здесь  $S_c$  – площадь элемента сетки,  $c$  – номер элемента ( $c = \overline{1, N}$ ,  $N$  – общее число ячеек сетки),  $\{i, j, k, l\}$  – множество соседних элементов  $c$ -го элемента сетки,  $L_{ce}$  – длина  $c$ -го ребра  $c$ -го элемента сетки.

Приращение параметров по времени определялось по четырехстадийной схеме Рунге-Кутты. Параметры с индексом  $c$  в уравнениях (15)-(18) соответствуют значениям газодинамических величин в центре расчетной ячейки и вычислялись на основе значений газодинамических величин в центрах масс ячеек сетки. Конвективные потоковые комплексы с двойным индексом  $ce$  на соответствующих гранях рассчитывались по методу С.К. Годунова на основе

решения задачи о распаде разрыва [15]. Для вычисления вязких и тепловых потоковых слагаемых определялись компоненты тензора вязких напряжений и теплового потока. В частности, компонента  $(\tau_{xx})_{ce}$  на грани  $ce$  рассчитывалась по следующим соотношениям

$$\begin{aligned}(\tau_{xx})_{ce} &= 2\eta_{ce} \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} \right)_{ce} - \frac{2}{3}\eta_{ce} \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} \right)_{ce}, \\ \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} \right)_{ce} &= 0.5 \left( \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} \right)_c + \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} \right)_e \right), \\ \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} \right)_c &= \frac{1}{S_c} \sum_{e \in \{i,j,k,l\}} u_{ce} n_{x,ce} L_{ce}, \\ u_{ce} &= 0.5(u_c + u_e),\end{aligned}$$

где  $v_{x_{ce}}$  – продольная компонента скорости на грани, общей для  $c$ -го и  $e$ -го элементов,  $v_{x_c}$  – продольная компонента скорости в центре  $c$ -го элемента, а  $v_{x_e}$  – в центре  $e$ -го элемента сетки. Остальные компоненты тензора напряжений и компоненты теплового потока определялись аналогично. Коэффициент вязкости на грани  $\eta_{ce}$  рассчитывался в зависимости от температуры на грани, которая определялась на основе соотношения  $T_{ce} = 0.5(T_c + T_e)$ .

Дискретизация граничных условий проводилась с использованием фиктивных ячеек, значения газодинамических величин в которых задавались для достижения необходимого значения конвективных потоков на границе. На входной границе критические параметры потока задавались через величины, определяющие решение задачи Римана на границе, соответственно, использование фиктивных ячеек не требовалось. На стенке использовалось граничное условие непротекания, согласно которому значения компонентов вектора скорости в фиктивную ячейку переносились из приграничной расчетной точки расчетной области со знаком минус. На границе симметрии, на оси сопла в фиктивные ячейки переносились значения из приграничных точек для всех величин, кроме радиальной скорости, значение которой передавалось со знаком «минус». На границе симметрии, на линии столкновения струй, в фиктивные ячейки также переносились значения из приграничных точек для всех величин, кроме продольной компоненты скорости, которая передавалась со знаком «минус». На выходе из расчетной области задача Римана не решалась на границе расчетной области. Для определения потоков на границе использовалось неотражающее граничное условие, построенное на основе граничного условия waveTransmissive, реализованного в программном комплексе OpenFOAM. Для определения физических величин на границе расчетной области использовалось уравнение

$$\varphi_{wall}^{n+1} = \varphi_{wall}^n * refValue + (1 - \varphi_{wall}^n)(\varphi_c^n + refGrad * d), \quad (19)$$

где  $\varphi_c^n$  – значение параметра на предыдущем временном шаге в центре приграничной ячейки,  $\varphi_{wall}^{n+1}$  – значение параметра на границе на новом временном слое,  $\varphi_{wall}^n$  – значение параметра на границе на предыдущем временном слое. Реферативные величины в уравнении (19) определялись следующим образом:

$$\begin{aligned}refValue &= (\varphi_{wall}^n + k\varphi^\infty) \frac{1}{1+k}, \\ refGrad &= \frac{1+k}{1+\alpha+k},\end{aligned}$$

где  $\varphi^\infty$  – значение параметра в окружающей среде, на расстоянии  $L_\infty$  от границы, параметры  $\alpha$  и  $k$  определяются как  $\alpha = \omega\Delta t/d$ ,  $k = \omega\Delta t/L_\infty$ , а  $\omega$  – это скорость газа или сумма скорости газа и скорости звука,  $\Delta t$  – временной шаг интегрирования,  $d$  – расстояние от центра ячейки до границы,  $L_\infty$  – это масштаб длины релаксации для исходящих волн давления, чтобы вернуться к давлению в окружающей среде. Данный параметр устанавливался в размере 10 м, при давлении в окружающей среде 0.01 Па.

Задача решалась методом установления. Критерием окончания расчета являлось равенство расходов в критическом и выходном сечениях, которое устанавливалось с точностью  $\varepsilon = 10^{-10}$ . Расчеты проводились с постоянным шагом по времени, удовлетворяющим критерию Куранта  $10^{-9}$ .

Приведенный подход использовался в работах по численному исследованию процессов формирования сверхзвуковых газоструйных мишеней для лазеров, работающих в ЭУФ диапазоне [7, 8]. В работе [8] проводилось сравнение полученных результатов с данными экспериментов. Показано соответствие между распределением интенсивности излучения, полученной экспериментально и средней плотностью газовой мишени, полученной в результате численных расчетов.

#### **4. Результаты численного моделирования**

Численное моделирование проводилось при разных расстояниях между срезами противоположно направленных сопел.  $L_{ves} = 4, 5, 5.6, 7, 9$  и  $10$  мм. На рис. 2 - 4 представлены результаты расчетов в виде распределений и графиков изменения основных газодинамических величин. Изменение газодинамических величин в сопле соответствует теории идеального сопла Лавалья, за исключением пристеночной части, в которой за счет влияния сил трения формируется область дозвукового высокотемпературного пристеночного слоя. Эта область составляет почти 20% поперечного размера струи и резко уменьшается в выходном сечении, где она не превышает 3% от диаметра сечения. Данный эффект связан с резким ускорением газа при истечении недорасширенной струи в вакуумную камеру.

На рис. 2 представлены распределения давления, плотности, температуры газа и числа Маха для случая, когда расстояние между соплами составляет 5.6 мм. Данное расстояние соответствует данным экспериментов в работе [8], а результаты, полученные в ходе численных расчетов, качественно согласуются с экспериментальными [7]. Газодинамическая картина течения сопоставима с картиной взаимодействия сверхзвуковой струи с преградой [16, 17]. На рисунках видны волны разрежения и сжатия, возникающие в потоке. Столкновение струй формируется в виде отошедшего скачка уплотнения криволинейной формы, который находится в равновесии. Справа от него располагается область заторможенного потока, а слева высокоскоростная сверхзвуковая струя.

Границы скачка на рисунках можно определить по сгущающимся друг к другу линиям уровня, а также по положению звуковой линии. На всех рисунках звуковая линия выделена красным цветом.

Чтобы пропустить необходимый расход газа через ударный слой малой толщины линия скачка искривляется, формируя эллиптическую дугу. При переходе через эту линию поток разворачивается, теряет кинетическую энергию, и течение становится дозвуковым. В дозвуковой зоне взаимодействующих струй наблюдается повышение давления, плотности и температуры газа, и как следствие снижение скорости. Затем, струя реагирует на внешнее низкое давление в камере и снова разгоняется до сверхзвуковых скоростей. Высокие числа Маха в течении объясняются низкими температурами в газовой струе, максимальное же значение приведенной скорости не превышает 1.8, при максимально возможной величине для данных параметров течения равной 2.

Видно, что наиболее плотная зона с высоким давлением формируется при  $L_{ves} = 4$  мм, и, соответственно, наименее плотная с низким уровнем давления при  $L_{ves} = 10$  мм. Максимум плотности для  $L_{ves} = 4$  мм составляет  $0.054 \text{ кг/м}^3$ , а для  $L_{ves} = 5.6$  мм почти в 1.6 раза меньше и равен  $-0.034 \text{ кг/м}^3$ . Данный характер изменения плотности и давления в зоне столкновения струй следует учитывать при настройке, например, ЭУФ установок для формирования газовых мишеней.

Газодинамическая картина в общих чертах сохраняется при увеличении или уменьшении расстояний между соплами  $L_{ves}$  (рис. 3). Наибольшее влияние данный параметр оказывает на

поперечный и продольный размер дозвуковой зоны вблизи линии столкновения струй. Увеличение  $L_{ves}$  приводит почти к прямо пропорциональному росту продольного размера дозвуковой зоны от 0.45 мм до 1.6 мм для расстояний 4 мм и 10 мм соответственно. Радиальный размер зоны также увеличивается с увеличением  $L_{ves}$ , но нелинейно, постепенно замедляясь. Для  $L_{ves} = 9$  мм и 10 мм радиальный размер почти одинаков и составляет 4.5 мм. Геометрические размеры данной области в свою очередь оказывают влияние на уровень давления и плотности газа. Так на рис. 4 показано радиальное изменение давления и плотности вдоль линии симметрии между соплами.

Часть подпрограмм, используемых при получении описанных результатов, находится в свободном доступе на платформе GitHub [18].

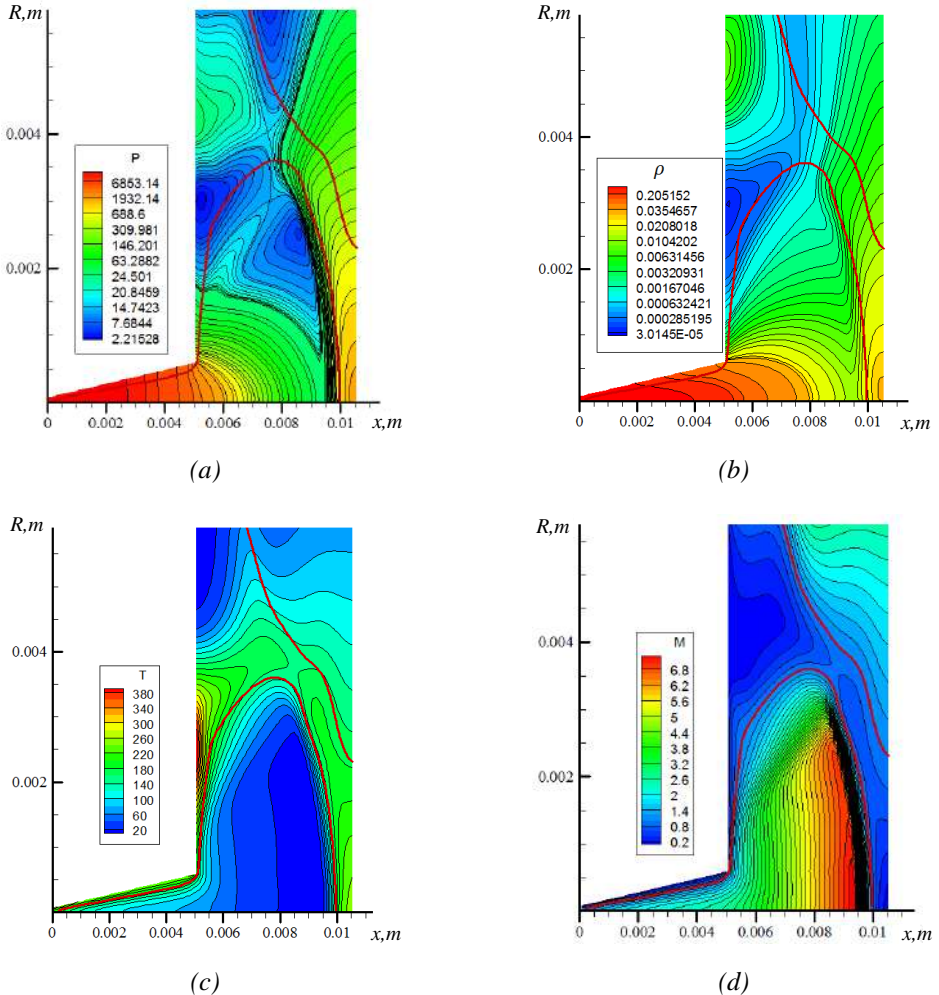


Рис. 2. Поля распределений давления (а), плотности (b), температуры (с) и числа Маха (d) при  $L_{ves}=5.6$  мм.

Fig. 2. Distribution fields of pressure (a), density (b), temperature (c) and Mach number (d) at  $L_{ves}=5.6$  mm.

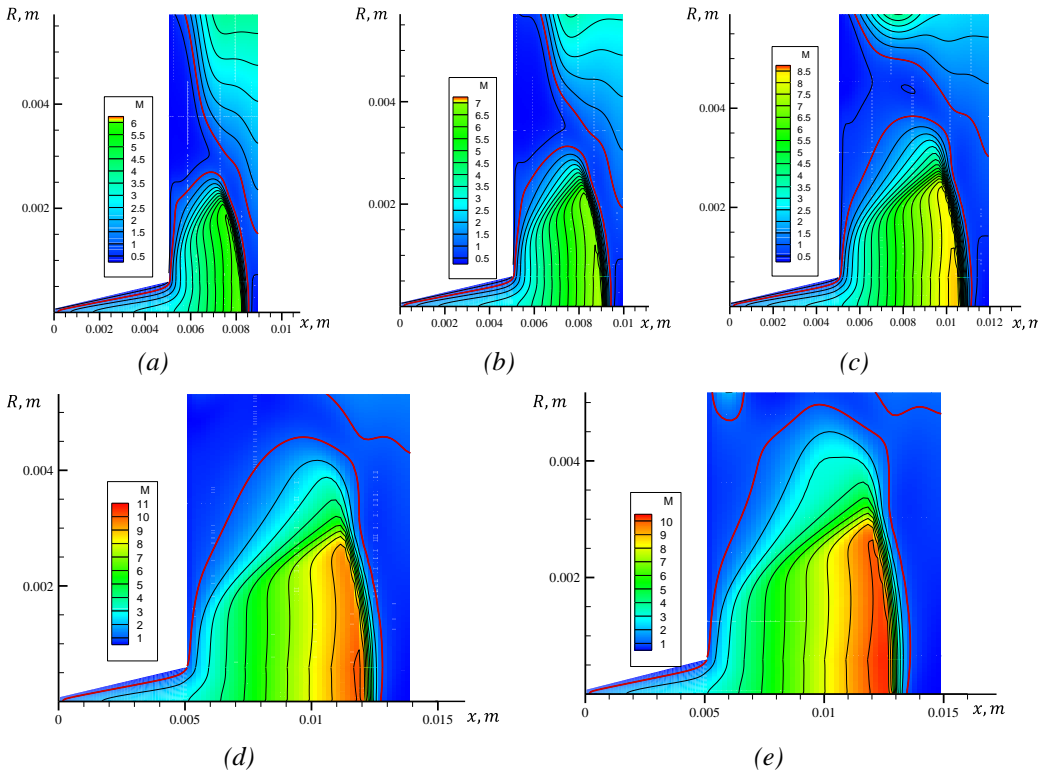


Рис. 3. Поля распределений числа Маха при  $L_{ves}=4$  (a), 5 (b), 7 (c), 9 (d) и 10 (e) мм.  
Fig. 3. The distribution fields of the Mach number at  $L_{ves}=4$  (a), 5 (b), 7 (c), 9 (d) and 10 (e) mm.

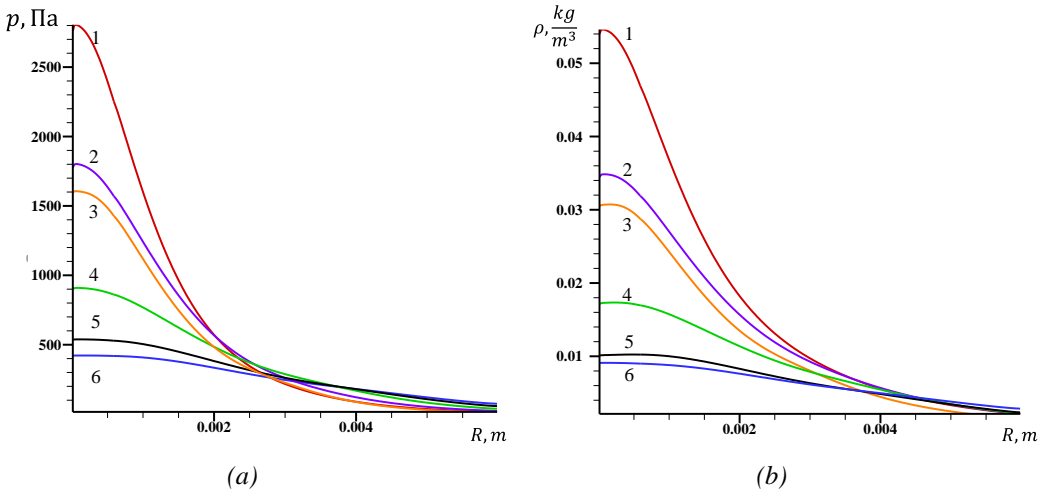


Рис. 4. Графики распределений давления(a) и плотности (b) вдоль плоскости симметрии, где  $L_{ves}=4$  мм (1), 5 мм (2), 5.6 мм (3), 7 мм (4), 9 мм (5), 10 мм (6).  
Fig. 4. Graphs of pressure(a) and density (b) distributions along the plane of symmetry, where  $L_{ves}=4$  mm (1), 5 mm (2), 5.6 mm (3), 7 mm (4), 9 mm (5), 10 mm (6).

## 5. Заключение

В работе проведены параметрические исследования особенностей столкновения сверхзвуковых недорасширенных струй аргона, вытекающих из соосных микросопел, расположенных навстречу друг другу. Полученные распределения основных газодинамических величин позволили детально описать структуру течения и оценить размеры зоны повышенной плотности, а также изменение уровня плотности в зависимости от расстояния между сопловыми срезами. Проведенные расчеты показали, что более плотную зону с более высоким показателем интенсивности ЭУФ излучения можно получить, сближая сопла, однако в этом случае уменьшается ее продольный размер, что необходимо учитывать при планировании экспериментальных исследований.

## Список литературы / References

- [1]. Markelov G.N. Numerical study of 2D/3D micronozzle flows. AIP Conference Proceedings, 2001, vol.585, pp. 539-546. DOI: 10.1063/1.1407607.
- [2]. Phalnikar K.A., Kumar R., Alvi F.S. Experiments on free and impinging supersonic microjets. Exp. Fluids 44, 2008, pp. 819-830. DOI:10.1007/s00348-007-0438-4.
- [3]. Takahashi Y., Okajima J., Iga Y., Komiya A., Maruyama S. Preliminary experiment of supersonic micro-channel gas flow visualization by using interferometer. Journal of Fluid Science and Technology 9(5): JFST0069-JFST0069, 2014, pp. 28-32. DOI:10.1299/jfst.2014jfst0069.
- [4]. Mai C.-C., Lin J. Flow structures around an inclined substrate subjected to a supersonic impinging jet in laser cutting. Opt Laser Technol, 2002, vol. 34, pp. 479-486. DOI:10.1016/S0030-3992(02)00046-4
- [5]. Быков Н.Ю., Фёдоров С.А. Формирование субнаноразмерных кластеров в разреженной струе смеси инертного газа и паров металла. Физико-химическая кинетика в газовой динамике, 2023, Т. 24. № 1, С. 82-94 / Bykov N.Y., Fedorov S.A. Formation of subnanosized clusters in a rarefied jet of a mixture of inert gas and metal vapors. Physico-chemical kinetics in gas dynamics, 2023, vol. 24, no. 1, pp. 82-94 (in Russian).
- [6]. Гусева В.Е., Корепанов М.А., Королева М.Р., Нечай А.Н., Перекалов А.А., Салашченко Н.Н., Чхало Н.И. Способы формирования газовых, кластерных спрейных и жидкостных мишеней в лазерно-плазменном источнике излучения. Приборы и техника эксперимента, 2023, № 4, С. 145-155. DOI: 10.31857/S0032816223030217 / Guseva V.E., Korepanov M.A., Koroleva M.R., Nechai A.N., Perekalov A.A., Salashchenko N.N., Chkhalo N.I. Methods of formation of gas, cluster spray and liquid targets in a laser-plasma radiation source. Instruments and experimental techniques, 2023, no. 4, pp. 145-155 (in Russian). DOI: 10.31857/S0032816223030217.
- [7]. Nechai, A. N., Perekalov, A. A., Chkhalo, N. I., Salashchenko, N. N., Korepanov, M. A., Koroleva, M. R. Emission properties of targets based on shock waves excited by pulsed laser radiation. Optics and Laser Technology, 2021, vol. 142, pp. 1-5. DOI:10.1016/j.optlastec.2021.107250.
- [8]. Korepanov M.A., Koroleva M.R., Mitrukova E.A., Nechai A.N. Mathematical modeling of the gas-jet target for extreme ultraviolet laser. Russian Journal of Nonlinear Dynamics, 2024, vol. 20, no. 3. pp. 413-424. DOI:10.1134/S1063785017110177.
- [9]. Митрюкова Е.А. Параметрические исследования течений в микросолах. Труды ИСП РАН, Т. 35, № 2, 2023, С. 225-234. DOI:10.15514/ISPRAS-2023-35(2)-16 / Mitryukova E.A. Parametric investigations of flows in micronozzles. Trudy ISP RAS, 2023, vol. 35 no. 2, pp. 225-234. (in Russian). DOI:10.15514/ISPRAS-2023-35(2)-16.
- [10]. Reid, R. C., Prausnitz, J. M., Sherwood, T. K. The properties of gases and liquids, 1977, 710 p. DOI: 10.1036/0070116822.
- [11]. Королева М.Р., Корепанов М.А., Митрюкова Е.А. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. Номер свидетельства RU: 2024618291. Программа численного моделирования течений газа с конденсацией в микросолах. Дата регистрации: 25.03.2024. Дата публикации: 10.04.2024. / Koroleva M.R., Korepanov M.A., Mitryukova E.A. Certificate of state registration of a computer program. Certificate number RU: 2024618291. Numerical simulation program for gas flows with condensation in micronozzles. Registration date: 25/03/2024. Date of publication: 10/04/2024.
- [12]. Митрюкова Е.А., Королева М.Р., Корепанов М.А. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. Номер свидетельства RU: 2023680879. Программа расчета истечения газа в вакуумную камеру через микросопло. Дата регистрации: 28.09.2023. Дата публикации: 06.10.2023. / Mitryukova E.A. Koroleva M.R., Korepanov M.A. Certificate of state registration of a computer program.

Certificate number RU: 2023680879. Program for calculating gas flow into a vacuum chamber through a micronozzle. Registration date: 28/09/2023. Date of publication: 06/10/2023.

- [13]. Липанов А.М., Дадикина С.Ю., Шумихин А.А., Королева М.Р., Карпов А.И. Численное моделирование внутрикамерных нестационарных турбулентных течений. Часть 1. Вестник Южно-Уральского государственного университета. Математическое моделирование и программирование, 2019, Т. 12, № 1, С. 32-43. DOI 10.14529/mmp190103 / Lipanov A.M., Dadikina S.Yu., Shumikhin A.A., Koroleva M.R., Karpov A.I. Numerical modeling of intra-chamber unsteady turbulent flows. Part 1. Bulletin of the South Ural State University. Mathematical modeling and programming, 2019, vol. 12, no. 1, pp. 32-43 (in Russian). DOI 10.14529/mmp190103.
- [14]. Шумихин А.А. Численное моделирование течения вязкого сжимаемого газа в РДТТ с центральным телом. Химическая физика и мезоскопия, 2020, Т. 22, № 2, С. 184-196. / Shumikhin A.A. Numerical modeling of viscous compressible gas flow in a solid rocket motor with a central body. Chemical physics and mesoscopy, 2020, vol. 22, no. 2, pp. 184-196 (in Russian). DOI: 10.15350/17270529.2020.2.18.
- [15]. Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я., Крайко А.Н., Прокопов Г.П. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. - 400 с / Godunov, S.K., Zabrodin, A.V., Ivanov, M.Ya., Krayko, A.N., Prokopov, G.P. Numerical solution of multidimensional problems of gas dynamics, Moskva, Nauka, 1976, 400 p. (in Russian).
- [16]. Bocharova, O.V., Lebedev, M.G. Modeling the time-dependent interaction between a sonic jet and a barrier. Mathematical Models and Computer Simulations, 2007, vol. 19, no. 8, pp. 31-36. DOI:10.17223/19988621/63/8.
- [17]. Pinchukov, V. I. Modeling of dynamics of unsteady flows near blunt bodies for large time intervals, Computational technologies, 2013, vol. 18, no. 1, pp. 74-86.
- [18]. <https://github.com/PhChMechLab/GodNozzleVac>, accessed 25.12.2024.

### **Информация об авторах / Information about authors**

Михаил Александрович КОРЕПАНОВ – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Удмуртского федерального исследовательского центра УрО РАН.

Mikhail Aleksandrovich KOREPANOV – Dr. Sci. (Tech.), Leading Researcher at the Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

Мария Равилевна КОРОЛЕВА – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Удмуртского федерального исследовательского центра УрО РАН.

Maria Ravilevna KOROLEVA – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher at the Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

Екатерина Александровна МИТРИУКОВА – старший преподаватель кафедры ракетной техники Ижевского государственного технического университета имени М.Т. Калашникова. Сфера научных интересов: математическое моделирование, газовая динамика.

Ekaterina Aleksandrovna MITRYUKOVA is a senior lecturer at the Department of Rocket Engineering of Izhevsk State Technical University named after M.T. Kalashnikov. Research interests: mathematical modeling, gas dynamics.



## Исследование распространения примеси в среде в одной прикладной осесимметричной задаче

<sup>1,2</sup> Е.А. Михайлов, ORCID: 0000-0002-9747-4039 <e.mikhajlov@lebedev.ru>

<sup>3</sup> И.О. Тепляков, ORCID: 0000-0002-2355-1935 <igor.teplyakov@mail.ru>

<sup>3</sup> Д.А. Виноградов, ORCID: 0009-0002-1575-9207 <st.zzz@mail.ru>

<sup>1</sup> Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН,  
Россия, 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53.

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1.

<sup>3</sup> Объединенный институт высоких температур РАН,  
Россия, 125412, Москва, Ижорская улица, д. 12, к. 2.

**Аннотация.** С точки зрения приложений представляет интерес распространение примеси в цилиндрическом объеме, заполненном воздухом низкой плотности. Она связана с испарением вещества из небольшого «стакана», в котором имеют место конвективные течения, связанные с нагревом его дна. Рассмотрено распространение примеси с учетом как диффузии, так и конвективного переноса за счет тепловых процессов внутри «стакана». Распределение скоростей в основном объеме ищется с помощью решения уравнения Навье – Стокса, для примеси решается уравнение переноса с диффузионным слагаемым. Использована конечно-разностная численная схема, реализованная с помощью собственного программного кода. Получены решения в случаях, соответствующих разной высоте стенок «стакана», различным соотношениям между коэффициентами, описывающими процессы конвективного переноса и диффузии. Показано, что высокие стенки существенно препятствуют процессу распространения примеси в основном объеме, и вещество в основном концентрируется внутри «стакана», не переходя за его пределы. Данные результаты имеют сходство с данными о переносе одной из компонент векторного потенциала в задаче об усилении в замороженного магнитного поля за счет конвекции в задаче, решавшейся ранее. Обсуждается вопрос о применении данных результатов на практике и их экспериментальной проверке в лабораторных условиях. Отмечено, что в целом распространение примеси соответствует данным, полученным в ходе экспериментальных исследований, проведенных ранее.

**Ключевые слова:** диффузия; примесь; конвекция; испарение; уравнение Навье–Стокса; параболическое уравнение; конечно-разностные схемы.

**Для цитирования:** Михайлов Е.А., Тепляков И.О., Виноградов Д.А. Исследование распространения примеси в среде в одной прикладной осесимметричной задаче. Труды ИСП РАН, том 37, вып. 2, 2025 г., стр. 207–216. DOI: 10.15514/ISPRAS–2025–37(2)–15.

**Благодарности:** Работа И.О.Теплякова и Д.А.Виноградова выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 23-29-00911). Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхпроизводительными вычислительными ресурсами МГУ им. М. В. Ломоносова.

## Research of the Propagation of an Impurity in a Medium in One Applied Axisymmetric Problem

<sup>1,2</sup> E.A. Mikhailov, ORCID: 0000-0002-9747-4039 <e.mikhajlov@lebedev.ru>

<sup>3</sup> I.O. Teplyakov, ORCID: 0000-0002-2355-1935 <igor.teplyakov@mail.ru>

<sup>3</sup> D.A. Vinogradov, ORCID: 0009-0002-1575-9207 <st.zzz@mail.ru>

<sup>1</sup> Lebedev Physical Institute of RAS,  
Russia, 119991, Moscow, Leninsky prospect 53.

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University,  
Russia, 119991, Moscow, Leninskie gori, 1.

<sup>3</sup> Joint Institute for High Temperatures of RAS,  
Russia, 125412, Moscow, Izhorskaya str. 13, bl 2.

**Abstract.** From the application point of view, the propagation of an admixture in a cylindrical volume filled with low-density air is of interest. It is associated with the evaporation of a substance from a small "glass" in which convective currents associated with the heating of its bottom take place. The propagation of an admixture is considered taking into account both diffusion and convective transfer due to thermal processes inside the "glass". The distribution of velocities in the main volume is sought by solving the Navier-Stokes equation, and the transfer equation with a diffusion term is solved for the admixture. A finite-difference numerical scheme implemented using our own program code is used. Solutions are obtained in cases corresponding to different heights of the "glass" walls, different ratios between the coefficients describing the processes of convective transfer and diffusion. It is shown that high walls significantly impede the process of admixture propagation into the main volume, and the substance is mainly concentrated inside the "glass" without moving beyond its limits. These results are similar to the data on the transfer of one of the components of the vector potential in the problem of amplification of the frozen magnetic field due to convection in the problem solved earlier. Just as there, structures are formed that repeat the features of the flow, and the maximum value is reached on the axis of symmetry. The issue of applying these results in practice and their experimental verification in laboratory conditions is discussed. It is noted that, in general, the propagation of the impurity corresponds to the data obtained in the course of experimental studies conducted earlier.

**Keywords:** diffusion; impurity; convection; vaporizing; Navier–Stokes equation; parabolic equation; finite-difference scheme.

**For citation:** Mikhailov E.A., Teplyakov I.O., Vinogradov D.A. Research of the propagation of an impurity in a medium in one applied axisymmetric problem. *Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS*, vol. 37, issue 2, 2025, pp. 207-216 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(2)-15.

**Acknowledgements.** The work of I.O.Teplyakov and D.A.Vinogradov has been supported by Russian Science Foundation (project 23-29-00911). The work was performed using the equipment of the Center for Collective Use of Supercomputing Resources of Lomonosov Moscow State University.

### 1. Введение

Перенос векторных и скалярных полей в потоке газа представляет большой интерес с точки зрения гидродинамики [1-3]. Он обусловлен действием как конвективного переноса, так и диффузионными эффектами. В случае не очень интенсивной диффузии могут образовываться достаточно интересные структуры, иногда ассоциируемые с коллапсом [4, 5]. Важно отметить, что как правило, особенности возникают на границе конвективных ячеек, а в случае осесимметричных набегающих потоков можно ожидать наличия подобных экстремальных значений на оси симметрии. Достаточно интересные результаты в данном направлении были получены для магнитного поля на границе конвективных ячеек [6]. В случае замороженности в хорошо проводящую жидкость или плазму происходит «сгребание» линий магнитного поля, и как следствие – его локальное усиление. Другим интересным примером является перенос завихренности, которая в случае эйлеровой гидродинамики также является примером замороженного поля. Было показано, что при столкновении двух

разнонаправленных вихрей происходит экспоненциальное нарастание решения в области разделяющего их фронта [7]. Можно предполагать, что аналогичный механизм может объяснять возникновение торнадо и других атмосферных явлений.

Тем не менее, хотя примеры, описанные выше, относятся к векторным полям, аналогичные процессы могут быть характерны и для распространения пассивных скалярных примесей. Так, можно отметить, что в случае задачи о конвективных валах и магнитном поле, по сути, речь шла лишь об одной из компонент векторного потенциала, которая является скалярной функцией [6]. Описывающие ее уравнения качественно схожи с законом распространения пассивной примеси, поэтому логично было бы ожидать при ее решении примерно тех же результатов.

С прикладной точки зрения имеет значение задача об испарении металла, нагреваемого индукционным способом, в разреженный воздух. Подобные процессы интересны при разработке космической техники, позволяя получать импульс в направлении, противоположном потокам образовавшегося пара. С целью исследования данного процесса в ОИВТ РАН был организован эксперимент, в ходе проведения которого были получены оценки для скорости испарения, плотности пара и связанных с этим динамических эффектов. Тем не менее, гидродинамическое описание подобного процесса представляет собой значительные сложности ввиду большого количества факторов.

Экспериментальная установка представляет собой камеру низкого давления (имитирующую космическое пространство), в центре которой расположен цилиндрический тигель, имитирующий рабочую камеру и сопло космического двигателя. Тигель помещен в индуктор, вызывающий разогрев содержимого тигля. В качестве рабочего материала использовался цинк, поскольку температура кипения цинка даже при атмосферном давлении составляет  $907^{\circ}\text{C}$ , а при пониженном (до 1800 Па в эксперименте)  $\sim 600^{\circ}\text{C}$ , эти температуры легко достижимы. При нагреве цинк испаряется и постепенно происходит процесс его распространения по соплу и по камере низкого давления.

Процесс распространения примеси представляется достаточно сложным и зависит от большого количества факторов, трудно поддающихся учету. Тем не менее, на наш взгляд, для понимания основных закономерностей можно упрощенно представить его следующим образом. При нагреве внутри сопла образуются конвективные потоки. Поле скоростей может быть найдено с помощью решения уравнения Навье – Стокса. После этого можно решать уравнение о переносе примеси как за счет соответствующих потоков, так и за счет диффузионных процессов.

Сформулированная задача представляет собой систему из параболических уравнений в частных производных, которая решалась нами численно. С этой целью нами использовалась конечно-разностная схема, реализованная с помощью собственного программного кода, составленного на языке C++. Создание собственного кода диктуется возможностью изучения наиболее важных для нас эффектов. Так, наш опыт решения задач о возникновении коллапса для магнитного поля показывает [6], что стандартные пакеты могут некорректно описывать быстро растущие решения, плохо воспроизводят их поведение около углов. Численные решения анализировались с целью установить влияние различных процессов на процесс распространения примеси, понимания соотношения между вкладом со стороны диффузии и конвективного переноса. Также интересно изучить соответствие между полученными результатами и тем, что было получено ранее для магнитных полей.

## 2. Основные уравнения

Как и говорилось выше, будем предполагать, что со дна стакана распространяются пары металла, подогреваемого индукционным способом (рис. 1). За счет этого внутри стакана можно ожидать возникновения конвективных потоков воздуха (хотя он и разрежен, его

плотность существенно превышает плотность паров металла). Их детальное описание может быть достаточно затруднительным.

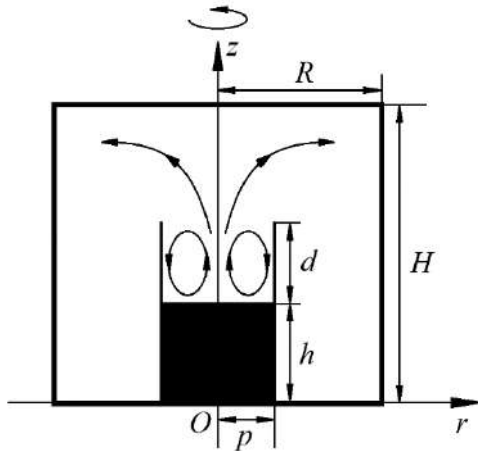


Рис. 1. Цилиндрический сосуд (камера низкого давления) радиуса R и высоты H, внутри которого находится тигель (сопло) высоты d.  
 Fig. 1. Cylindrical bowl (low pressure chamber) with radius R and height H inside it there is crucible (nozzle) with height d.

Тем не менее, в простейшем приближении можно предполагать, что они характеризуются с помощью скалярной функции тока  $\psi(r, z)$  [8], которая должна удовлетворять следующим граничным условиям (предположим, что течения в целом сосредоточены внутри стакана):

$$\psi|_{r=p} = \psi|_{z=0} = \psi|_{z=H} = \psi|_{r=0} = 0 \tag{1}$$

Согласно теореме Стеклова, решение для скалярной функции тока может быть представлено в виде ряда по собственным функциям векторного оператора Лапласа  $\hat{L} = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} - \frac{1}{r^2}$ , среди которых при установившемся течении ключевую роль будет играть старшая из них [9]:

$$\psi(r, z) \cong V \cdot J_1\left(\frac{r}{p} \mu_1^1\right) \sin\left(\frac{\pi(z-h)}{d}\right), \tag{2}$$

где  $\mu_1^1$  - старший из корней функции Бесселя первого порядка  $J_1(\bullet)$ .

Скорость в таком случае выражается по формуле

$$\vec{v} = \text{rot}(\psi \vec{e}_\varphi), \tag{3}$$

что покомпонентно означает следующее:

$$v_r = -\frac{\partial \psi}{\partial z} = -\frac{V\pi}{d} J_1\left(\frac{r}{p} \mu_1^1\right) \cos\left(\frac{\pi(z-h)}{d}\right); \tag{4}$$

$$v_z = \frac{\psi}{r} + \frac{\partial \psi}{\partial r} = V \left( \frac{\mu_1^1}{2d} J_0\left(\frac{r}{d} \mu_1^1\right) + \frac{1}{r} J_1\left(\frac{r}{d} \mu_1^1\right) - \frac{\mu_1^1}{2d} J_0\left(\frac{r}{d} \mu_1^1\right) \right) \sin\left(\frac{\pi(z-h)}{2d}\right) \tag{5}$$

В области над стаканом распределение скорости можно найти с помощью решения уравнений Навье–Стокса (мы предполагаем, что плотность и давление внутри внешней части объема – за пределами «стакана» меняются мало):

$$\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} = \frac{1}{R_1} \left( \frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right); \quad (6)$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = \frac{1}{R_1} \left( \frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right); \quad (7)$$

В качестве граничных условий используем следующее:

$$v_r|_{r=0, z>(h+d)} = v_r|_{r=R} = v_r|_{z=0, r>p} = v_r|_{z=H} = 0;$$

$$v_r|_{r<p, z=h+d} = \frac{V\pi}{d} J_1 \left( \frac{r}{p} \mu_1^1 \right);$$

$$v_z|_{r=0, z>(h+d)} = v_z|_{r=R} = v_z|_{z=0, r>p} = v_z|_{z=H} = 0.$$

В начальный момент полагается, что за пределами стакана ( $z > h + d$ ,  $r > p$ ) скорость является нулевой.

Для концентрации мы использовали следующее уравнение переноса с диффузионным слагаемым:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + v_r \frac{\partial q}{\partial r} + v_z \frac{\partial q}{\partial z} = \frac{1}{R_2} \left( \frac{\partial^2 q}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial q}{\partial r} + \frac{\partial^2 q}{\partial z^2} \right); \quad (8)$$

Граничные условия на стенках полагаются нулевыми (мы предполагаем, что около них происходит процесс конденсации металлического газа:

$$q|_{r=R} = q|_{z=H} = q|_{r=p, z<h+d} = q|_{r=0, z>h} = 0;$$

в то же время на дне «стакана» мы задаем поток среды  $F$  :

$$\left. \frac{\partial q}{\partial t} \right|_{z=h, r<p} = F.$$

Начальное распределение для примеси предполагается нулевым: исследуется, как область насыщается ей за счет испарения с поверхности.

Отметим, что задача решается в безразмерных единицах: поэтому интенсивность диссипативных процессов для скорости и для концентрации описывается с помощью безразмерных параметров  $R_1$  и  $R_2$ .

### 3. Численная схема

Задача решалась с помощью простой конечно-разностной схемы [10]. Мы рассматривали сетку:

$$r_i = i \cdot \Delta r; \quad i = 1, \dots, N; \quad \Delta r = \frac{R}{N};$$

$$z_j = j \cdot \Delta z; \quad j = 1, \dots, M; \quad \Delta z = \frac{H}{M};$$

$$t_k = k \cdot \Delta t; \quad k = 1, \dots$$

С ее точками ассоциируются сеточные значения функций:

$$u_{i,j}^k = v_r(r_i, z_j, t_k) \quad w_{i,j}^k = v_z(r_i, z_j, t_k) \quad q_{i,j}^k = q(r_i, z_j, t_k)$$

Разностные схемы для сеточных функций выглядят так:

$$\begin{aligned} & \frac{u_{i,j}^{k+1} - u_{i,j}^k}{\Delta t} + u_{i,j}^k \frac{u_{(i+1),j}^k - u_{(i-1),j}^k}{2 \cdot \Delta r} + w_{i,j}^k \frac{u_{i,(j+1)}^k - u_{i,(j-1)}^k}{2 \cdot \Delta z} = \\ & = \frac{1}{R_1} \left( \frac{u_{(i+1),j}^k - 2u_{i,j}^k + u_{(i-1),j}^k}{\Delta r^2} + \frac{u_{i,(j+1)}^k - 2u_{i,j}^k + u_{i,(j-1)}^k}{\Delta z^2} + \frac{1}{r_i} \frac{u_{(i+1),j}^k - u_{(i-1),j}^k}{2 \cdot \Delta r} - \frac{u_{i,j}^k}{(r_i)^2} \right); \\ & \frac{w_{i,j}^{k+1} - w_{i,j}^k}{\Delta t} + u_{i,j}^k \frac{w_{(i+1),j}^k - w_{(i-1),j}^k}{2 \cdot \Delta r} + w_{i,j}^k \frac{w_{i,(j+1)}^k - w_{i,(j-1)}^k}{2 \cdot \Delta z} = \\ & = \frac{1}{R_1} \left( \frac{w_{(i+1),j}^k - 2w_{i,j}^k + w_{(i-1),j}^k}{\Delta r^2} + \frac{w_{i,(j+1)}^k - 2w_{i,j}^k + w_{i,(j-1)}^k}{\Delta z^2} + \frac{1}{r_i} \frac{w_{(i+1),j}^k - w_{(i-1),j}^k}{2 \cdot \Delta r} \right); \\ & \frac{q_{i,j}^{k+1} - q_{i,j}^k}{\Delta t} + u_{i,j}^k \frac{q_{(i+1),j}^k - q_{(i-1),j}^k}{2 \cdot \Delta r} + w_{i,j}^k \frac{q_{i,(j+1)}^k - q_{i,(j-1)}^k}{2 \cdot \Delta z} = \\ & = \frac{1}{R_2} \left( \frac{q_{(i+1),j}^k - 2q_{i,j}^k + q_{(i-1),j}^k}{\Delta r^2} + \frac{q_{i,(j+1)}^k - 2q_{i,j}^k + q_{i,(j-1)}^k}{\Delta z^2} + \frac{1}{r_i} \frac{q_{(i+1),j}^k - q_{(i-1),j}^k}{2 \cdot \Delta r} \right). \end{aligned}$$

Данная схема является явной, что накладывает достаточно серьезные условия на шаг по времени:  $\Delta t < \min(R_1, R_2) \times \min(\Delta r^2, \Delta z^2)$ . Кроме того, он также должен удовлетворять условию  $\Delta t < \min(\Delta r, \Delta z) \times \left[ \max_{r,z} |u| \right]^{-1}$ . В противном случае алгоритм будет неустойчивым.

Если же указанные условия выполнены, то в силу того, что разностные уравнения аппроксимируют исходную дифференциальную задачу с точностью до  $O(\Delta t + \Delta r^2 + \Delta z^2)$ , можно ожидать сходимости [10, 11].

Реализация данной численной схемы осуществлялась с помощью собственного кода, составленного на языке C++. Его наиболее простая версия является свободно доступной [12]. Задача решалась на разных сетках, однако для воспроизведения необходимых нам эффектов оказывается достаточным использования разрешения 500x500. Отметим, что дальнейшее сгущение сетки не приводит к каким-либо значимым изменениям решения в пределах требуемой для нас точности. Более того, наши тестовые расчеты показали, что в отдельных случаях можно добиться приемлемых результатов даже на сетках с разрешением порядка 100x100.

## 4. Результаты

Расчеты показали, что достаточно быстро, за времена  $\max(R_1, R_2) \times \max(L^2, H^2)$  распределение примеси выходит на стационарный режим. По этой причине основное значение имеет именно распределение по пространству.

Сначала мы исследовали, каким будет распределение в предположении отсутствия конвективных потоков ( $V = 0$ ). Результаты показаны на рис. 2 и рис. 3. Можно отметить, что высота тигля существенно влияет на процесс распространения примеси: высокие стенки заметно препятствуют диффузионному процессу. В то же время, при низких стенках происходит достаточно активное распространение металла в газообразном агрегатном

состоянии. Достаточно интересно также изучить влияние более низкой диссипации для скорости (рис. 4).

Включение конвекции приводит к более интенсивному распространению примеси (рис. 5). Тем не менее, гораздо более эффективно оказывается понижение границ тигля: в таком случае можно видеть (рис. 3), что примесь распространяется более активно.

С целью корректности расчета исследовалось поведение интеграла от плотности  $M = \iint \rho r dr dz$ , ассоциируемого с массой примеси. Согласно физическим представлениям, можно ожидать испарения вплоть до момента насыщения пара, после чего ее масса должна стать постоянной. Результаты для разной высоты границы тигля показаны на рис. 6. Со временем масса примеси выходит на постоянное значение, и не меняется в пределах значащих цифр переменной типа double. Нельзя не отметить, что при высоких границах насыщение происходит раньше.

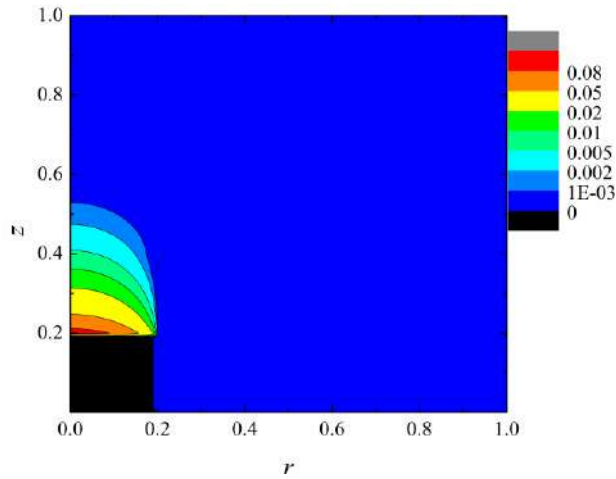


Рис. 2. Распространение примеси при  $H = R = 1$ ,  $p = h = d = 0.2$ .  
Предполагается, что  $R_2 = 1$ , конвекцией можно пренебречь ( $V=0$ ).

Fig. 2. Spread of impurity for  $H = R = 1$ ,  $p = h = d = 0.2$ .  
It is assumed that  $R_2 = 1$ , convection is neglected ( $V=0$ ).

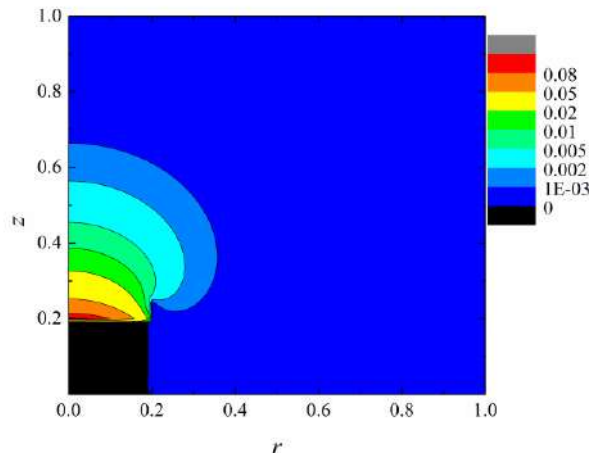


Рис. 3. Распространение примеси при  $H = R = 1$ ,  $p = h = 0.2$ ,  $d = 0.05$ .  
Предполагается, что  $R_2$  бесконечно велико (диссипативное слагаемое отсутствует),  
конвекцией можно пренебречь ( $V=0$ ).

Fig. 3. Spread of impurity for  $H = R = 1$ ,  $p = h = 0.2$ ,  $d = 0.05$ .

It is assumed that  $R_2$  is infinitely large (dissipative term is omitted), convection is neglected ( $V=0$ ).

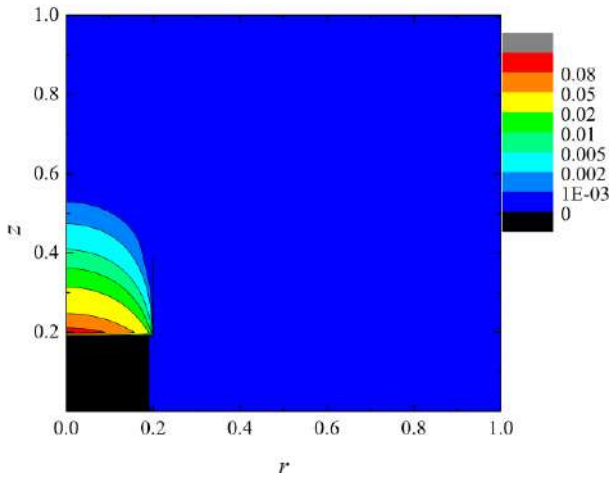


Рис. 4. Распространение примеси при  $H = R = 1$ ,  $p = h = d = 0.2$ .

Предполагается, что  $R_1 = 1$ ,  $R_2 = 10$ ,  $V = 0$ .

Fig. 4. Spread of impurity for  $H = R = 1$ ,  $p = h = d = 0.2$ . It is assumed that  $R_1 = 1$ ,  $R_2 = 10$ ,  $V = 0$ .

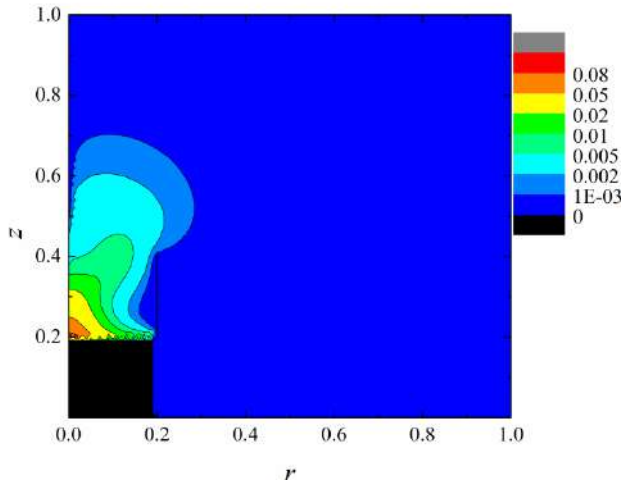


Рис. 5. Распространение примеси при  $H = R = 1$ ,  $p = h = d = 0.2$ .

Предполагается, что  $R_1 = 1$ ,  $R_2 = 1$ ,  $V = 10$ .

Fig. 5. Spread of impurity for  $H = R = 1$ ,  $p = h = d = 0.2$ . It is assumed that  $R_1 = 1$ ,  $R_2 = 1$ ,  $V = 10$ .

5. Выводы

Нами был проанализирован процесс распространения примеси (паров металла, нагреваемого индукционным способом) в разреженный воздух в цилиндрическом сосуде. Получено, что ключевую роль в распространении играет высота стенок тигля, внутри которого происходит испарение. Что касается конвекции, то ее роль выражена не столь ярко, как это было в случае плоских конвективных валов.

Нельзя не отметить, что схожие задачи решались также другими авторами [13, 14]. Стоит подчеркнуть, что несмотря на наличие стандартных пакетов – как свободно

распространяемых, так и коммерческих – подобные подходы имеют свои преимущества, поскольку есть возможность оптимизировать код для потребностей конкретной вычислительной задачи, учитывая ее особенности и уделяя дополнительное внимание факторам, важным с экспериментальной и прикладной точек зрения.

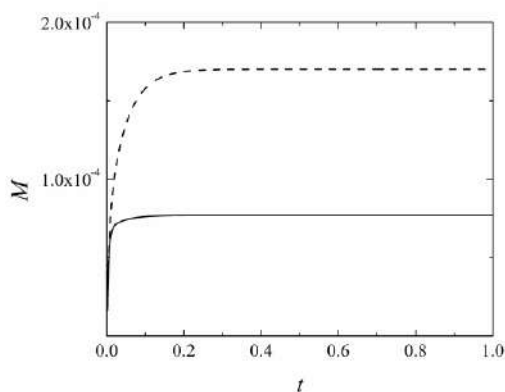


Рис. 6. Масса примеси при различной высоте стенок.

Сплошная кривая показывает  $d = 0.2$ , пунктирная –  $d = 0.05$ .

Fig. 6. Impurity mass for different height of border. Solid line shows  $d = 0.2$ , dashed –  $d = 0.05$ .

## Список литературы / References

- [1]. Chae D. // Handbook of Differential Equations: Evolutionary Equation, ed. by C. M. Dafermos and M. Pokorný. Amsterdam: Elsevier, 2008.
- [2]. Gibbon J. D. The three-dimensional Euler equations: Where do we stand? // *Physica D*. 2008. V. 237, No. 14–17 P. 1 894–1 904. <https://doi.org/10.1016/j.physd.2007.10.014>.
- [3]. Кузнецов Е. А., Рубан В. П. Коллапс вихревых линий в гидродинамике // *ЖЭТФ*. 2000. Т. 118, № 10. С. 893–905.
- [4]. Wolibner, W. Un théorème sur l'existence du mouvement plan d'un fluide parfait, homogène, incompressible, pendant un temps infiniment long. *Math Z* 1933, 37, 698–726.
- [5]. Kuznetsov, E.A.; Naulin, V.; Nielsen, A.H.; Rasmussen, J.J. Effects of sharp vorticity gradients in two-dimensional hydrodynamic turbulence. *Phys. Fluids* 2007, 19, 105110.
- [6]. Кузнецов Е. А., Михайлов Е. А. Заметки о коллапсе в магнитной гидродинамике // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2020. – Т. 158, № 3 (9). – С. 561–572.
- [7]. Кузнецов Е. А., Михайлов Е. А., Сердюков М. Г. Нелинейная динамика проскальзывающих течений // *Известия высших учебных заведений. Радиофизика*. – 2023. – Т. 66, № 2-3. – С. 145–160.
- [8]. Белевич М.Ю. Гидромеханика. Основы классической теории. СПб., изд. РГМУ, 2006.
- [9]. Свешников А.Г., Боголюбов А.Н., Кравцов В.В. Лекции по математической физике. М., Изд-во МГУ, 1993.
- [10]. Самарский А.А., Попов Ю.П. Разностные схемы задач газовой динамики. М., 1992.
- [11]. Калиткин Н.Н. Численные методы. СПб., БХВ-Петербург, 2011.
- [12]. [https://gitflic.ru/project/eamsci/impurity\\_hd](https://gitflic.ru/project/eamsci/impurity_hd).
- [13]. Каминский В.А., Обвинцева Н.Ю., Калачинская И.С., Дильман В.В. Моделирование конвекции Релея в нестационарном процессе испарения // *Математическое моделирование*. – 2007. – Т.19, № 11. С. 3–10.
- [14]. В.А.Каминский, Н.Ю.Обвинцева. Испарение жидкости в условиях конвективной неустойчивости в газовой фазе // *Журнал физической химии*. – 2008. – Т.82, № 7. – С. 1368 – 1373.

## Информация об авторах / Information about authors

Евгений Александрович МИХАЙЛОВ – доктор физико-математических наук, доцент кафедры математики физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова с 2022 года, старший

научный сотрудник Физического института имени П.Н. Лебедева РАН с 2021 года. Сфера научных интересов: магнитная гидродинамика, перенос полей в жидкости и газе.

Evgeny Alexandrovich MIKHAILOV – Dr. Sci. (Phys.-Math.), associate professor of chair of mathematics of faculty of physics of Lomonosov Moscow State University since 2022, senior researcher of P. N. Lebedev Physical Institute of RAS since 2021. Scientific interests: magnetohydrodynamics, field transition in fluids.

Игорь Олегович ТЕПЛЯКОВ – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Объединенного института высоких температур. Его научные интересы включают магнитную гидродинамику, исследование течений жидких металлов.

Igor Olegovich TEPLYAKOV – Cand. Sci. (Tech.), senior researcher of Joint Institute for High Temperatures of RAS. Scientific interests: magnetohydrodynamics, liquid metals flows.

Дмитрий Андреевич ВИНОГРАДОВ – научный сотрудник Объединенного института высоких температур РАН. Научные интересы: магнитная гидродинамика, тепломассообмен, исследование течений жидких металлов.

Dmitrii Andreevich VINOGRADOV – researcher of Joint Institute for High Temperatures of RAS. Scientific interests: magnetohydrodynamics, heat and mass transfer, liquid metals flows.

DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(2)-16



## Поиск именованных сущностей в инструкциях по медицинскому применению лекарственных средств с использованием глубокого обучения и методов обработки естественного языка

*Ю.П. Титов, ORCID: 0000-0002-9093-6755 <kalengul@mail.ru>*

*Н.В. Кильмишкин, ORCID: 0009-0007-4732-3260 <kilmiskinn@gmail.com>*

*Д.Д. Кубраков, ORCID: 0000-0003-2986-9343 <kubrakoff.dmitry@yandex.ru>*

*П.М. Иванова, ORCID: 0009-0005-4579-4603 <polianna\_654@mail.ru>*

*Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова,  
Россия, 115054, г. Москва, Стремянный пер., д. 36.*

**Аннотация.** В рамках работы создан специализированный словарь для поиска ключевых терминов в текстах медицинских инструкций, с использованием данных из глобальной базы данных VigiAccess, классификации МКБ-10 и ресурса rlsnet.ru. Текстовый корпус был предварительно очищен и приведён к единому формату для улучшения качества обучения модели. В дальнейшем планируется использовать источник grls.rosminzdrav.ru, как более авторитетный и полный, для получения информации о зарегистрированных лекарственных средствах. Для автоматизации аннотации данных разработан алгоритм, который выполняет поиск и разметку терминов из словаря в формате BIO (Begin, Inside, Outside), обеспечивая структурированную разметку для обучения моделей. Модель на основе глубоких нейронных сетей продемонстрировала высокую эффективность в распознавании именованных сущностей благодаря учёту контекстных зависимостей. Построение семантического графа лекарственных средств осуществлялось с помощью алгоритмов нахождения связей между именованными сущностями. Однако автоматическое выявление более глубоких связей между узлами графа затруднено и требует ручной доработки данных для учёта сложных грамматических структур, что позволит улучшить анализ взаимодействий в текстах медицинских инструкций.

**Ключевые слова:** машинное обучение; глубокое обучение; нейронные сети; обработка естественного языка NLP; инструкции к лекарственным средствам; семантический граф.

**Для цитирования:** Титов Ю.П., Кильмишкин Н.В., Кубраков Д.Д., Иванова П.М. Поиск именованных сущностей в инструкциях по медицинскому применению лекарственных средств с использованием глубокого обучения и методов обработки естественного языка. Труды ИСП РАН, том 37, вып. 2, 2025 г., стр. 217–236. DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(2)-16.

**Благодарности:** Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ № 23-75-30012.

# Use of Deep Learning and Natural Language Processing Techniques for Searching Named Entities in the Medical Instructions for Use of Drugs

*Y.P. Titov, ORCID: 0000-0002-9093-6755 <kalengul@mail.ru>*

*N.V. Kilmishkin, ORCID: 0009-0007-4732-3260 <kilmiskinn@gmail.com>*

*D.D. Kubrakov, ORCID: 0000-0003-2986-9343 <kubrakoff.dmitry@yandex.ru>*

*P.M. Ivanova, ORCID: 0009-0005-4579-4603 <polianna\_654@mail.ru>*

*Plekhanov Russian University of Economics,  
36, Stremyanny Lane, Moscow, 115054, Russia.*

**Abstract.** As part of the work, a specialized dictionary has been created to search for key terms in the texts of medical instructions, using data from VigiAccess, ICD-10 and rlsnet.ru. The text corpus was previously cleaned and brought to a single format to improve the quality of model training. In the future, it is planned to use the source grls.rosminzdrav.ru, as more authoritative and complete, for information about registered medicines. To automate data annotation, an algorithm has been developed that searches and marks terms from the dictionary in BIO (Begin, Inside, Outside) format, providing structured markup for model training. The model based on deep neural networks has demonstrated high efficiency in recognizing named entities by taking into account contextual dependencies. The semantic graph of medicines was constructed using algorithms for finding connections between named entities. However, automatic identification of deeper connections between graph nodes is difficult and requires additional data markup to account for complex grammatical structures, which will improve the analysis of interactions in the texts of medical instructions.

**Keywords:** machine learning; deep learning; neural networks; natural language processing; medical drug instructions; semantic graph.

**For citation:** Titov Y.P., Kilmishkin N.V., Kubrakov D.D., Ivanova P.M. Use of deep learning and natural language processing techniques for searching named entities in the medical instructions for use of drugs. *Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS*, vol. 37, issue 2, 2025. pp. 217-236 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(2)- 16.

**Acknowledgements.** The study was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation No. 23-75-30012.

## 1. Введение

Анализ медицинских инструкций к лекарственным средствам представляет собой сложную задачу, требующую обработки значительных объемов текстовой информации, содержащей данные о фармакодинамике, фармакокинетике, показаниях, противопоказаниях, дозировке, побочных эффектах и других аспектах, критически важных для безопасности и эффективности применения лекарств. Объем и сложность таких документов делают ручной анализ трудоемким и подверженным ошибкам, поэтому современные методы обработки естественного языка (NLP) и глубокого обучения становятся важным инструментом автоматизации этого процесса, позволяя выделять именованные сущности (Named Entity, NE) и связывать их внутри текста.

Методы NLP обеспечивают преобразование текстов медицинских инструкций в машиночитаемый формат, что открывает возможности для последующего анализа и построения семантических графов, отображающих взаимосвязи между словами и словосочетаниями, такими как механизмы действия и побочные эффекты. Такие графы позволяют выявить ключевые связи и узлы взаимодействия, упрощая интерпретацию информации.

Распознавание именованных сущностей (Named Entity Recognition, NER) [1] является сложной задачей NLP, решающей проблему автоматического выделения категорий объектов

в тексте. NER играет важную роль в структурировании текстовой информации, выделяя важные медицинские сущности и облегчая их дальнейший анализ [2]. Методы NER, использующие глубокое обучение, демонстрируют высокую точность по сравнению с традиционными методами, основанными на правилах и словарях [3]. Современные трансформерные модели, обученные на больших объемах данных, учитывают контекст и специфику медицинского языка, где одно слово может приобретать различные значения в зависимости от контекста.

Выделенные именованные сущности могут использоваться для построения семантических графов, отображающих свойства и взаимодействие различных лекарственных средств, их воздействие на организм и потенциальные взаимодействия между лекарственными средствами. Такой граф способен стать важным элементом в системах поддержки принятия решений для медицинских специалистов, оказывая помощь при назначении лечения и подборе медикаментозных средств.

Исследования, проведенные на основе обычных методов машинного обучения и ансамблевом подходе, используют различные наборы данных для обучения или различные алгоритмы обучения для создания базовых классификаторов. Различные алгоритмы машинного обучения, такие как SVM и CRF, использовались для Clinical-NER [4]. Керетна (Keretna) и др. [5] представили гибридный подход, использующий подходы на основе правил и словарей для идентификации названий лекарств в неструктурированных и неформальных текстах, оценена на наборе данных для испытания лекарств i2b2 2009 и сообщила о 66,97% f-score. Словари и подходы на основе правил широко использовались для извлечения клинических сущностей в клинических информационных системах, таких как MedLEE, разработанная Фридманом и др. [6], MetaMap, разработанная Арнсоном и Лангом [7], и cTAKES, разработанная Савовой и др. [8]. Гурулингappa (Gurulingappa) и др. [9] обучили CRF на текстовых признаках, улучшенных с помощью вывода системы NER на основе правил. Они оценили свою работу с использованием набора данных медицинских задач i2b2/VA 2010 и сообщили о значении метрики f-score, равном 81,2%. Халгрим (Halgrim) и др., [10] разработали гибридный подход, который включал CRF и подход на основе правил для клинического NER. Чжан и Эльхадад (Zhang и Elhadad) [11] разработали неконтролируемый подход для извлечения клинических сущностей из свободного текста. Они использовали обратную частоту документов в качестве основы для фильтрации потенциальных клинических именованных сущностей. Экбал и Саха (Ekbali and Saha) [12] использовали подход с накопленным ансамблем для извлечения биомедицинских именованных сущностей. Шаширеха (Shashirekha) и Найел (Nayel) [13] изучали производительность биомедицинского NER с использованием различных моделей. Керетна (Keretna) и др. [14] представили метод повышения клинического NER путем расширения модели IOBES и ввели новый тег для решения проблемы неоднозначности. Они оценили предложенную методику на наборе данных медицинских задач i2b2/VA 2010. Ву (Wu) и др. [15] обучили глубокую модель нейронной сети для извлечения клинических сущностей из китайских текстов. Последние годы серьёзного успеха в решении задачи NER были получены с помощью методов на основе искусственных нейронных сетей, в частности, на основе архитектуры трансформеров, о чём говорится в работах Джорджи Дж.М. и Бадер Г.Д. (Giorgi J.M. и Bader G.D) [16], Хабиби (Habibi) и др. [17], Ван (Wang) и др. [18], Юн (Yoon) и др. [19].

Предложенные алгоритмы не учитывают специфику медицинских документов, инструкций к лекарственным средствам (ЛС), поэтому для применения данных методов требуется интеллектуальная предобработка текстов. Термины в текстах инструкций к лекарственным средствам часто состоят из нескольких слов, которые представляют различный смысл как по отдельности, так и в совместном виде. Так как инструкции пишутся для лекарственных средств, которые могут быть зарегистрированы под различными торговыми названиями, торговым маркам, то для одного лекарственного средства (рассматривается международное

непатентованное название, МНН) может быть множество инструкций, написанных в разное время различными фирмами, что, в совокупности с отсутствием стандартов написания, затрудняют исследование текстов представленными методами статистического анализа слов.

## **2. Постановка задачи**

Задача, рассматриваемая в данной работе, заключается в автоматизированной обработке текстовых данных инструкций к медицинским лекарственным средствам для построения графовой семантической модели. Предложенная модель должна определять риски возникновения побочных эффектов при одновременном применении нескольких (более 3-х) лекарственных средств – при полифармакотерапии.

На первом этапе необходимо осуществить чтение текста из файлов, содержащих инструкции, и выполнить его предварительную обработку, включая форматирование, разбиение на главы и отдельные предложения для дальнейшего анализа. Далее создается словарь именованных сущностей и алгоритм для автоматической разметки данных, которые будут использованы в качестве тренировочного набора для последующего обучения модели глубокого обучения для задачи NER. На следующем этапе применяется модель глубокого обучения, обученная на соответствующей области медицинских текстов, для автоматического выделения именованных сущностей. Этот процесс направлен на структурирование неупорядоченной текстовой информации и получение набора значимых сущностей, связанных с медицинским контекстом. После извлечения сущностей проводится анализ их взаимосвязей. Данные взаимосвязи используются для построения семантического графа, который представляет собой структурированное представление информации, извлеченной из текста.

## **3. Модели и методы**

### **3.1 Создание словаря именованных сущностей и подготовка корпуса текста**

В контексте NER словарь может включать в себя различные категории именованных сущностей, такие как побочные действия, названия лекарственных средств и другие слова, которые стоит учитывать при построении семантического графа. Для формирования специализированного словаря были использованы источники:

- **VigiAccess** – глобальная база данных Всемирной организации здравоохранения, содержащая информацию о возможных побочных эффектах лекарственных средств [20]. Информация содержится в табличном виде, где для каждого лекарственного средства можно получить количество случаев выявления побочного эффекта;
- **МКБ-10** – международная классификация болезней десятого пересмотра, используемая для систематизации заболеваний и патологических состояний [21];
- Тексты инструкций к лекарственным средствам, взятые с [rslnet.ru](https://rslnet.ru) [22];

Процесс отбора лексических единиц из вышеупомянутых источников был организован в полуавтоматическом режиме. Исходные тексты подвергались разбиению на отдельные слова, после чего происходил отбор лексем на основании морфологических признаков, таких как префиксы и суффиксы, а также с применением алгоритмов для выделения аббревиатур: алгоритм в тексте анализирует каждое слово, считывая количество заглавных букв. Если слово содержит две или более заглавных буквы, оно классифицируется как аббревиатура. Этот этап позволил автоматизировать часть рутинной работы по выделению терминов и облегчить дальнейшую обработку данных.

Данные из базы **VigiAccess** и классификации **МКБ-10** потребовали дополнительной обработки и преобразования для их структурирования и приведения к формату, который позволяет взаимодействовать с ними в рамках построения словаря. Такие преобразования

включали, в частности, нормализацию и унификацию текстовых данных, устранение дублированных элементов, а также разработку специализированных алгоритмов для выделения и категоризации терминов.

Программа для подготовки корпуса обрабатывает исходный текст, выполняя его очистку, форматирование и структурирование. Этапы включают чтение текста, удаление избыточной информации (например, содержания в скобках), упоминание таблиц, сегментацию на предложения и запись в файл, где каждое предложение занимает отдельную строку. Использование библиотеки «razdel» обеспечивает высокую точность сегментации текста на предложения для русского языка, что улучшает качество данных для задач классификации [23].

### 3.2. Токенизация слов и объединение в нотацию BIO

После того как был подготовлен текстовый корпус и сформирован словарь, слова помечаются тегами. Для этого для каждой строки выполняется предобработка предложений и последующая классификация слов с использованием библиотеки «spaCy» [24]. Алгоритм разметки слов включает этапы:

- 1) токенизация и определение частей речи – используется библиотека «spaCy» для разделения строки на отдельные токены. Для каждого токена сохраняется его текстовое представление и часть речи;
- 2) нормализация токенов – приведение их к единой форме (например, к леммам). Это позволяет исключить вариативность, связанную с различными грамматическими формами одного и того же слова;
- 3) тегирование слов – для каждого нормализованного слова вызывается функция, которая на основе самого слова и его части речи (полученной в предыдущем шаге) назначает соответствующий тег, слова могут быть помечены как существительные, прилагательные, глаголы или другие части речи в зависимости от их морфологической характеристики и контекста;
- 4) учёт отрицания – для корректной обработки отрицаний в предложении вызывается функция, которая изменяет тег отрицательной частицы "не", на тот, который стоит после этой частицы;
- 5) нахождение зависимых слов для поиска словосочетаний – функция выполняет поиск зависимостей между словами в предложении. Главные слова (например, глаголы или существительные) могут иметь зависимые слова (например, прилагательные, наречия), и этот этап позволяет связать их в одну серию для анализа синтаксических связей.

Структурная схема алгоритма представлена на рис. 1.

Задача извлечения именованных сущностей NER заключается в автоматическом выявлении в тексте сегментов, представляющих собой имена собственные или другие значимые объекты, с последующей их категоризацией по типу сущности. Основной целью NER является улучшение качества текстовой классификации за счёт уменьшения разреженности данных. Это позволяет моделям работать более эффективно, избегая ошибок, связанных с редкостью определённых токенов. Ключевым стандартом для разметки текста в задачах NER является пословная разметка последовательности с использованием BIO-нотации. Она представляет собой схему для маркировки слов в предложении, которая помогает структурировать текст и выделить границы сущностей:

- B (beginning) — помечает начало именованной сущности, например, первый токен имени, компании или другого объекта;
- I (inside) — используется для пометки последующих токенов, которые являются частью той же сущности, что и токен с меткой B;

- О (outside) — обозначает слова, не относящиеся к именованным сущностям, таким образом маркируя всю остальную часть текста.

ВЮ-разметка помогает формализовать процесс выделения сущностей, определяя границы между ними и уточняя их роль в тексте (табл. 1).



Рис. 1. Структурная схема алгоритма разметки текста словами из словаря.  
Fig. 1. Block diagram of the text markup algorithm with words from the dictionary.

Табл. 1. Пример разметки в нотации ВЮ текстов инструкций к лекарственным средствам.  
Table 1. Example of marking in BIO notation of texts of instructions for medicinal products.

Слово	Разметка ВЮ
Аценокумарол	B-prepar
усиливает	B-glag
эффект	B-noun
пероральных	I-noun
гипогликемических	I-noun
средств	I-noun
,	O
токсическое	B-noun
действие	I-noun
фенитоина	I-noun
,	O
ульцерогенное	B-noun
действие	I-noun
глюкокортикоидов	B-prepar
.	O

В качестве анализа предложений были рассмотрены такие библиотеки как: spaCy, MyStem и UDPipe. MyStem не поддерживает построение деревьев синтаксических зависимостей. Она предназначена для морфологического анализа и лемматизации текста. Сравнительный анализ разметки текста (рис. 2) с использованием инструментов udiре и spaCy показал, что второй инструмент в большинстве случаев обеспечивает более точные и логичные зависимости. В частности, в udiре наблюдаются неточности в установке зависимостей, такие как использование связи parataxis (параллельный синтаксис) для слова "ЦОГ", что не всегда соответствует смыслу, поскольку в контексте это слово является уточняющим приложением. В отличие от этого, spaCy правильно интерпретирует зависимость как conj (сочинение). Также стоит отметить, что в udiре лемматизация, хотя и в целом корректная, содержит некоторые несоответствия, например, лемматизация "ЦОГ-1" и "ЦОГ-2" в "Цог", что не отражает оригинальное написание. В spaCy лемматизация также не всегда идеальна, как в случае с леммой для слова "Ингибирует", но в целом она более точна. Кроме того, в udiре часто наблюдаются ошибки в разметке пунктуации, особенно в сложных конструкциях, где

она неправильно связывается с зависимыми словами. В spaCy пунктуация правильно связана с предыдущими элементами, что улучшает понимание синтаксической структуры предложения. В целом, несмотря на наличие некоторых ошибок в лемматизации и разметке, spaCy демонстрирует более высокую точность, особенно при работе с синтаксическими зависимостями и сложными структурами предложений, что делает его более подходящим инструментом для анализа текста в рамках данной задачи.

a)

id	form	lemma	upostag	head	deprel
1	Ингибирует	ингибировать	VERB	0	root
2	циклооксигеназу	циклооксигеназа	NOUN	3	obj
3	(	(	PUNCT	4	punct
4	ЦОГ-1	ЦОГ-1	PROPN	3	appos
5	и	и	CCONJ	3	cc
6	ЦОГ-2	ЦОГ-2	PROPN	3	appos
7	)	)	PUNCT	3	punct
8	и	и	CCONJ	9	cc
9	необратимо	необратимо	ADV	10	advmod
10	тормозит	тормозить	VERB	0	root
11	циклооксигеназный	циклооксигеназный	ADJ	12	amod
12	путь	путь	NOUN	10	obj
13	метаболизма	метаболизм	NOUN	12	nmod
14	арахидоновой	арахидоновый	ADJ	15	amod
15	кислоты	кислота	NOUN	13	nmod
16	.	.	PUNCT	10	punct

b)

id	form	lemma	upostag	head	deprel
1	Ингибирует	Ингибировать	VERB	0	root
2	циклооксигеназу	циклооксигеназ	NOUN	1	obj
3	(	(	PUNCT	4	punct
4	ЦОГ	Цог	PROPN	2	parataxis
5	-	-	PUNCT	4	punct
6	1	1	NUM	4	nummod
7	и	и	CCONJ	8	cc
8	ЦОГ	Цог	PROPN	2	conj
9	-	-	PUNCT	8	punct
10	2	2	NUM	8	nummod
11	)	)	PUNCT	10	punct
12	и	и	CCONJ	14	cc
13	необратимо	необратимо	ADV	14	advmod
14	тормозит	тормозить	VERB	1	conj
15	циклооксигеназный	циклооксигеназный	ADJ	16	amod
16	путь	путь	NOUN	14	nsubj
17	метаболизма	метаболизм	NOUN	16	nmod
18	арахидоновой	арахидоновый	ADJ	19	amod
19	кислоты	кислота	NOUN	17	nmod
20	.	.	PUNCT	19	punct



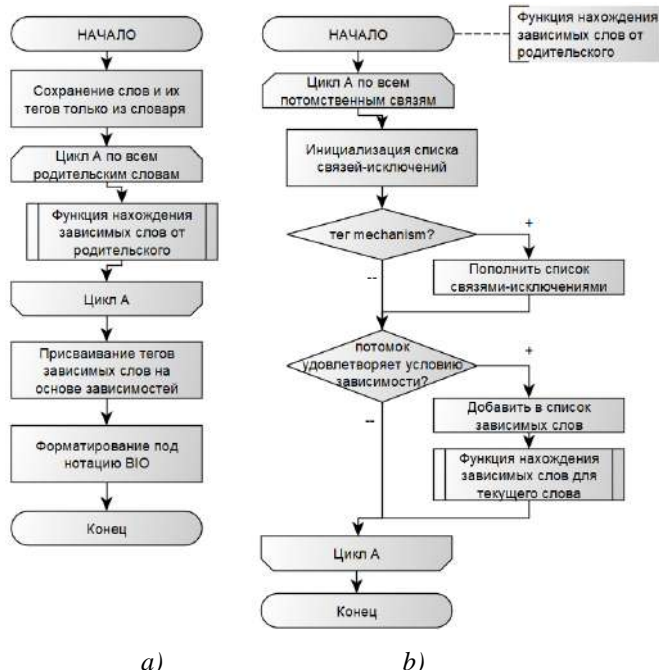


Рис. 4. Структурная схема алгоритма нахождения зависимых слов от главного:  
 а – подготовка и изменение тегов зависимых слов,  
 б – рекурсивная функция для нахождения зависимых слов от родительского.

Fig. 4. A block diagram of the algorithm for finding dependent words from the main one:  
 а – preparation and modification of tags of dependent words;  
 б – a recursive function for finding dependent words from the parent.

В алгоритме, показанном на структурной схеме рис. 4а, сначала происходит фильтрация токенов и тегов для извлечения только тех слов, которые имеют специфичные теги. Затем осуществляется рекурсивный поиск зависимых слов у этих тегов (структурная схема на рис. 4б). Эта функция предназначена для извлечения зависимых токенов из данного слова с учетом определенных исключений в типах зависимостей.

В процессе выполнения алгоритм инициализирует пустой список, который будет содержать зависимые токены. Затем происходит итерация по всем дочерним токенам текущего слова. В зависимости от тега текущего слова, алгоритм задает список исключений, который, в случае тега 'mechanism', включает зависимости 'nmod' и 'nsubj' по классификации «Universal Dependencies». Далее осуществляется проверка условий для добавления дочернего токена в список зависимых. Если уровень равен 1 и зависимость токена имеет тип 'amod' или 'nmod', при этом не находится в списке исключений, или если уровень больше 1 и зависимость принадлежит к одному из типов 'amod', 'nmod', 'cc', 'nsubj', 'conj' или 'case', то дочерний токен добавляется в список зависимых токенов. В случае добавления токена в список, осуществляется рекурсивный вызов функции для получения зависимых токенов от текущего дочернего токена, при этом уровень увеличивается на единицу. В завершение рекурсивная функция возвращает полный список зависимых токенов, собранный на основе заданных условий и исключений.

На следующем этапе алгоритм модифицирует теги зависимых токенов в зависимости от тегов головного токена. Для каждого головного слова, представленного в словаре зависимостей, осуществляется обход его зависимых токенов, и тег каждого зависимого токена заменяется на тег головного. После обновления тегов всех токенов выполняется их преобразование в

последовательность BIO-тегов, где используется функция для маркировки каждого токена в формате "Begin", "Inside" или "Outside" в зависимости от его роли в последовательностях сущностей.

Результатом работы алгоритма является последовательность BIO-тегов, которая отражает начало и продолжительность именованных сущностей в тексте. Использование BIO-нотации даёт возможность точно выделять в тексте именованные сущности, не смешивая их с другими элементами, а также правильно обозначать связи между зависимыми словами. Это улучшает обобщающие способности модели и позволяет создавать более точные и детализированные модели для классификации текста и других задач обработки естественного языка.

### 3.3. Обучение модели для задачи NER

Для задачи NER применяются системы на основе правил (с использованием словарей терминов), методы машинного и глубокого обучения. Наилучшую предсказательную способность обеспечивают методы глубокого обучения с использованием искусственных нейронных сетей (ИНС), которые лучше улавливают сложные зависимости в данных, особенно при их большом объеме. Среди моделей ИНС часто используют свёрточные сети (CNN), рекуррентные сети (RNN) и трансформеры. Для решения задачи NER рассматривались модели BERT, ruBERT, RuBioBERT, ruT5 и ruT5-multitask, загруженные из huggingface. BERT, использующий только механизм энкодера трансформера, отличается двунаправленным вниманием и хорошо подходит для задач классификации и извлечения информации (NLU). Модель ruBERT обучена на общих русскоязычных текстах, RuBioBERT – на медицинских статьях, что делает ее более подходящей для медицинского текста. Модели T5, такие как ruT5 и ruT5-multitask, решают широкий спектр задач NLP в формате «входной текст → выходной текст» и подходят для генеративных задач. Все четыре модели дообучались на инструкциях к лекарственным средствам, размеченных по нотации BIO, что позволяет применять их для распознавания именованных сущностей в текстах медицинских инструкций. Инструкции к лекарственным средствам были размечены по нотации BIO, таким образом, чтобы каждому предложению как последовательности слов соответствовала последовательность тег BIO, то есть получается формат «слово» – «тег BIO».

Для подбора оптимальных гиперпараметров модели был использован метод Grid Search. Полученные результаты визуализированы с помощью тепловой карты, что позволило наглядно оценить влияние различных комбинаций параметров на качество модели. Тепловая карта для гиперпараметров скорости обучения и количества эпох (рис. 5).

Обучение всех четырёх моделей проводилось с одинаковыми гиперпараметрами. Скорость обучения модели (learning rate) со значением  $2e-5$ . Скорость обучения – величина, с которой модель обновляет свои веса на каждом шаге обучения. Контролирует, насколько сильно обновляются веса модели после каждой итерации. Слишком большое значение может привести к нестабильному обучению, тогда как слишком малое — к очень медленному обучению или застреванию в локальном минимуме.

Размер обучающего пакета (train batch size) пакета (батча) – 16 точек данных. Размер батча (пакета) для обучения – количество примеров, которые обрабатываются моделью за один шаг на одном устройстве. Большой размер батча может ускорить обучение и стабилизировать градиенты, но требует больше памяти. Размер батча нужно выбирать в зависимости от доступных ресурсов и особенностей задачи.

Размер проверяющего (валидирующего) (eval batch size) пакета – 16 точек данных. Он необходим для оценки модели. Большой батч для оценки позволяет быстрее пройти по всем данным, однако также требует больше памяти.

Число эпох обучения (итераций обучения) (epochs) – 6 эпох. Одна эпоха — это полный проход по всему тренировочному набору данных. Большее количество эпох может улучшить

качество модели, но, если их слишком много, модель может переобучиться. Обычно с каждой эпохой модель всё лучше подстраивается под тренировочные данные, но улучшение метрик на валидационном наборе замедляется.

Коэффициент регуляризации (затухания весов) (weight decay) – 0.01. Коэффициент регуляризации (затухания весов), который применяется для контроля величины весов модели, чтобы избежать переобучения. Добавляет штраф за слишком большие значения весов, уменьшая их с каждым шагом. Это помогает сделать модель более обобщающей и устойчивой к шуму, особенно в случае сложных моделей или небольших наборов данных.

Обучение проводилось на корпусе, содержащем 11 801 предложение, из которых 15% были выделены в качестве выборки для оценки качества модели.

Набольшая эффективность обнаружена при числе эпох равном 6. Большее количество эпох ведёт к переобучению, из-за чего качество работы модели перестаёт расти и начинает падать. Для численной оценки качества работы моделей использовались специальные метрики: правильность (accuracy), точность (precision), полнота (recall), F-score (F1).

Эти метрики вычисляются как соотношение правильных и не правильных ответов модели. Для подсчёта ответов модели используется матрица ошибок (confusion matrix) [25]. Таким образом, ошибки классификации бывают двух видов: ложноотрицательные (False Negative, FN) и ложноположительные (False Positive, FP).

Правильность (accuracy) – доля правильных ответов модели среди всех предсказаний, метрика, которая характеризует качество модели, агрегированное по всем классам [26]. Ее использование полезно, когда классы для нас имеют одинаковое значение [27]:

$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (1)$$

Точность (precision) – доля истинно-положительных ответов среди всех положительных ответов модели [28]:

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2)$$

Полнота (recall) – доля истинно-положительных ответов среди всех правильных ответов:

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3)$$

Стремление к увеличению точности не позволяет сводить все объекты в один класс, так как в этом случае возникает рост уровня ложноположительных решений. Метрика полноты демонстрирует способность алгоритма обнаруживать данный класс вообще, а метрика точности – способность отличать этот класс от других классов [29]. Точность и полнота не зависят (в отличие от правильности) от соотношения классов и потому применимы в условиях несбалансированных выборок.

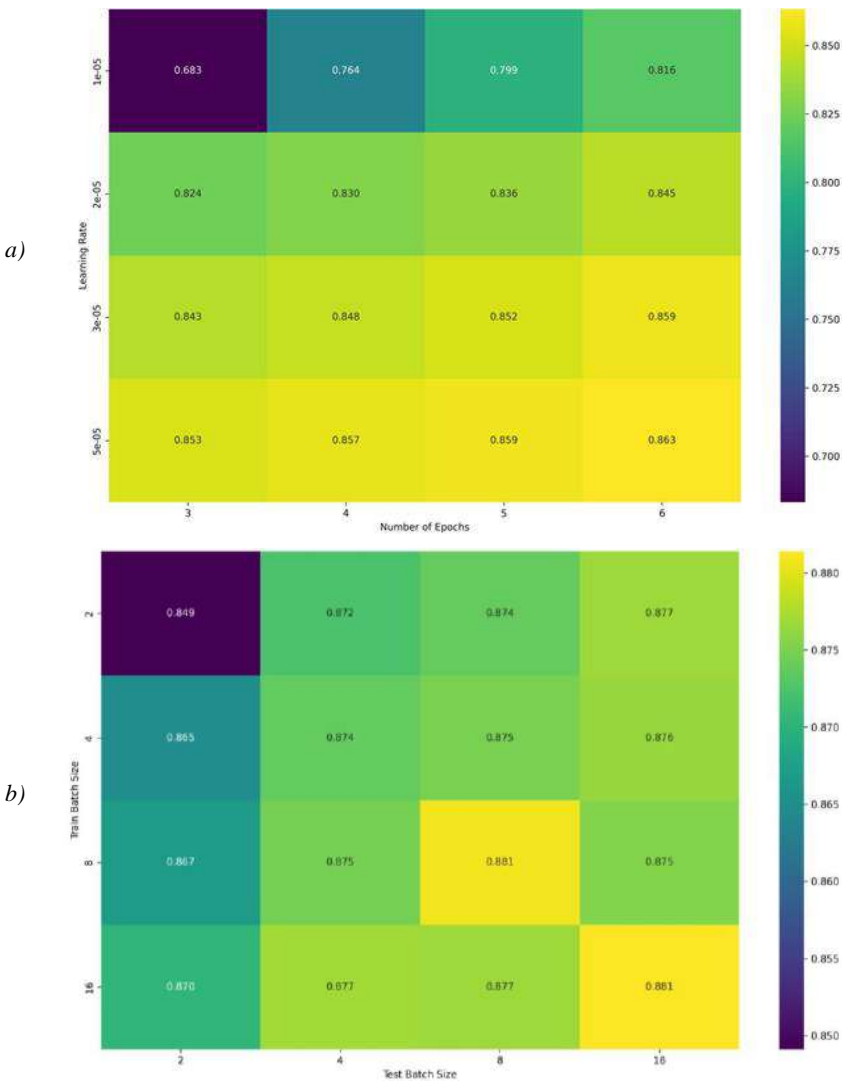


Рис. 5. Тепловая карта метрики F1 score: а – скорость обучения/количество эпох; б – размер обучающего пакета/размер валидирующего пакета.  
Fig. 5. Heat map of the F1 score metric: a – learning rate/number of epochs; b – size of the training package /size of the validating package.

Существует несколько подходов к объединению точности (Precision) и полноты (Recall) в единую метрику качества. Одним из таких подходов является использование F-меры (F-score) [30], которая представляет собой взвешенное гармоническое среднее между точностью и полнотой:

$$F_{\beta} = (1 + \beta^2) * \frac{precision * recall}{(\beta^2 * precision) + recall} \tag{4}$$

Когда коэффициент  $\beta$ , регулирующий баланс между полнотой и точностью, равен 1, F-мера сводится к частному случаю – F1-мере (F1-score), которая равномерно учитывает точность и полноту (Precision = Recall = 1). При  $\beta > 1$  большее значение придается полноте, при  $\beta < 1$  – точности.

Сравнительный анализ ruBERT и RuBioBERT показал, что качество работы модели ruBERT выше, чем модели RuBioBERT. Результаты сравнительного анализа показаны ниже (табл. 3-5).

Интересно отметить, что, хотя RuBioBERT специально обучена для работы с медицинской терминологией, полученные результаты, вероятно, связаны с тем, что её обучение проводилось на медицинских статьях. Научные статьи сами по себе имеют определённую специфику, а тексты медицинских инструкций к лекарственным средствам – ещё более узкую. Эта особенность обуславливает различия в закономерностях, характерных для научных и медицинских текстов, по сравнению с общеупотребительными текстами, на которых была обучена модель ruBERT.

Следовательно, для приближения закономерностей, свойственных текстам инструкций к лекарствам, больше подходят закономерности, характерные для общих текстов, поскольку они отражают более универсальные свойства естественного языка. В отличие от специализированных текстов, эти общие закономерности применимы к любым разновидностям языка и дают более точные результаты.

Сравнительный анализ, проведённый авторами данного исследования, показал, что качество однозадачных моделей ruT5 ниже, чем у многозадачной модели ruT5 (см. табл. 3–5). Это является интересным результатом, учитывая, что многозадачные модели, как правило, демонстрируют худшие результаты по сравнению с однозадачными. Предполагается, что причина этого заключается в том, что однозадачная модель была обучена на меньшем объёме данных и является многоязычной.

Кроме того, в рамках проведённого анализа было установлено, что оптимальное количество эпох для обучения модели BERT в задаче распознавания именованных сущностей (NER) составляет 6. Увеличение числа эпох за пределы этого значения не приводит к существенному улучшению качества модели, при этом продолжительность обучения значительно возрастает. Таким образом, авторы пришли к выводу, что шесть эпох являются оптимальным числом для обучения данной модели.

### 3.4 Поиск зависимостей между именованными сущностями для построения семантического графа

Из кортежей вычлняются именованные сущности и создаются узлы. Главным узлом является наименование лекарственного средства. В каждом предложении определяются связи между словами:

- подлежащего и сказуемого;
- зависимых слов от глагола;
- зависимых глаголов от текущего глагола.

После добавления всех необходимых узлов производится поиск глаголов, не зависящих от других глаголов. Именованные сущности, ассоциированные с этими независимыми глаголами, связываются с главной вершиной графа. Образованное ребро подписывается наименованием соответствующего независимого глагола (рис. 6). Например, в предложении «Флуконазол повышает плазменную концентрацию сиролимуса предположительно из-за ингибирования метаболизма сиролимуса» слово «повышает» зависит от отглагольного существительного «ингибирования», что позволяет идентифицировать «ингибирование» как независимый элемент, не имеющий дополнительных зависимостей. Так как у глагола «ингибирование» имеется зависимая именованная сущность – «метаболизма сиролимуса», данная связь будет отображена на графе в виде ребра между главной вершиной и зависимой сущностью «метаболизма сиролимуса» с указанием на независимый глагол «ингибирование». Структурная схема алгоритма представлена на рис. 7.

Затем устанавливаются связи между именованными сущностями в случаях, когда один глагол зависит от другого. Для этого создаётся словарь, в котором каждому глаголу сопоставлен список слов, зависящих от него. Если обнаруживается зависимость одного глагола от другого, то выстраивается иерархическая структура связей: зависимые существительные подчинённого глагола будут также зависеть от существительных главного глагола (рис. 8). Например, в предложении «Флуконазол повышает плазменную концентрацию сиролимуса предположительно из-за ингибирования метаболизма сиролимуса» глагол «повышает» находится в зависимости от отглагольного существительного «ингибирования». В этом случае на графе устанавливается связь между зависимыми словами глаголов «повышает» и «ингибирования». Структурная схема алгоритма представлена на рис. 9.

На завершающем этапе в граф добавляются именованные сущности, играющие роль подлежащих, при этом сказуемое оформляется в виде ребра, выходящего из узла подлежащего (рис. 10). Например, в предложении «Флуконазол повышает плазменную концентрацию сиролимуса предположительно из-за ингибирования метаболизма сиролимуса» подлежащим является «Флуконазол», а сказуемым – «повышает». Следовательно, необходимо произвести редактирование графа, удаляя лишние ребра и располагая узел, соответствующий подлежащему «Флуконазол», перед ребром с пометкой «повышает». Структурная схема алгоритма представлена на рис. 11.

Реализованные авторами алгоритмы позволили построить семантический граф на основе текста инструкции к лекарственному средству (рис. 12).

Табл.3. Сравнение оценок качества работы ruBERT и RuBioBERT.

Table 3. Comparison of ruBERT and RuBioBERT work quality ratings.

Название модели	Accuracy	Precision	Recall	F1	AUC
rubert-base-cased_3	0,890909	0,736842	0,7	0,717949	0,899238
RuBioBERT_3	0,868182	0,672414	0,65	0,661017	0,887158
rubert-base-cased_4	0,9	0,745763	0,733333	0,739496	0,902762
RuBioBERT_4	0,927273	0,852459	0,866667	0,859504	0,923765
rubert-base-cased_5	0,922727	0,822581	0,85	0,836066	0,915715
RuBioBERT_5	0,913636	0,737705	0,75	0,743802	0,914775
rubert-base-cased_6	0,931818	0,868852	0,883333	0,876033	0,919964
RuBioBERT_6	0,909091	0,725806	0,75	0,737705	0,913922

Табл.4. Сравнение оценок качества работы ruT5 и ruT5 – multitask.

Table 4. Comparison of ruT5 and ruT5- multitask performance ratings.

Название модели	Accuracy	Precision	Recall	F1	AUC
ruT5 3	0,653958	0,482142	0,290322	0,362416	0,624223
ruT5 multitask 3	0,700879	0,533333	0,430107	0,476190	0,725815
ruT5 4	0,706744	0,5	0,440860	0,468571	0,741036
ruT5 multitask 4	0,703812	0,452380	0,408602	0,429378	0,755976
ruT5 5	0,695014	0,487804	0,430107	0,457142	0,740040
ruT5 multitask 5	0,712609	0,476190	0,430107	0,451977	0,748181
ruT5 6	0,689149	0,425287	0,397849	0,411111	0,737326
ruT5 multitask_6	0,697947	0,464285	0,419354	0,440677	0,742045

Табл.5. Сравнение результатов работы *rubert-base-cased*, *RuBioBERT*, *rut5-base*, *rut5-base-multitask*.  
Table 5. Comparison of the results of *rubert-base-cased*, *RuBioBERT*, *rut5-base*, *rut5-base-multitask*.

rubert-base-cased		RuBioBERT		rut5-base		rut5-base-multitask	
[CLS]	O	[CLS]	O	Эффективность	B-noun	Эффективность	B-noun
Эффективность	B-noun	Эффективность	B-noun	арипипразола	I-noun	арипипразола	I-noun
арипипразола	I-noun	арипипразола	I-noun	при	O	при	O
при	O	при	O	адьюнктивным	B-noun	адьюнктивным	B-noun
адьюнктивным	B-noun	адьюнктивным	B-noun	лечения	O	лечения	O
лечения	I-noun	лечения	I-noun	БДР	I-noun	БДР	I-noun
БДР	I-noun	БДР	I-noun	была	O	была	O
была	B-glag	была	B-glag	продемонстрирована	B-glag	продемонстрирована	B-glag
продемонстрирована	B-glag	продемонстрирована	B-glag	в	O	в	O
в	O	в	O	двух	O	двух	O
двух	O	двух	O	краткосрочных	O	краткосрочных	O
краткосрочных	B-noun	краткосрочных	B-noun	платцебо-контролируемых	O	платцебо-контролируемых	O
платцебо	B-glag	платцебо	B-glag	исследованиях	B-noun	исследованиях	B-noun
-	B-glag	-	B-glag	у	O	у	O
контролируемых	B-glag	контролируемых	B-glag	взрослых	O	взрослых	O
исследованиях	B-noun	исследованиях	B-noun	пациентов,	I-noun	пациентов,	I-noun
у	O	у	O	соответствующих	B-glag	соответствующих	B-glag
взрослых	B-noun	взрослых	B-noun	критериям	B-noun	критериям	B-noun
пациентов	I-noun	пациентов	I-noun	DSM-IV	I-noun	DSM-IV	B-noun
,	O	,	O	для	O	для	O
соответствующих	B-glag	соответствующих	B-glag	БДР,	B-noun	БДР,	B-noun
критериям	O	критериям	O	у	O	у	O
DSM	B-noun	DSM	B-noun	которых	B-noun	которых	B-noun
-	B-noun	-	B-noun	был	B-glag	был	B-glag
IV	B-noun	IV	B-noun	неадекватный	B-noun	неадекватный	B-noun
для	O	для	O	ответ	I-noun	ответ	O
БДР	B-noun	БДР	B-noun	на	O	на	O
,	O	,	O	предыдущее	B-noun	предыдущее	B-noun
у	O	у	O	лечение	O	лечение	O
которых	B-noun	которых	B-noun	антидепрессантами	I-noun	антидепрессантами	I-noun
был	B-glag	был	B-glag	в	O	в	O
неадекватный	B-noun	неадекватный	B-noun	текущем	O	текущем	O
ответ	O	ответ	O	эпизоде	I-noun	эпизоде	I-noun
на	O	на	O	и	O	и	O
предыдущее	B-noun	предыдущее	B-noun	которые	O	которые	O
лечение	I-noun	лечение	I-noun	также	O	также	O

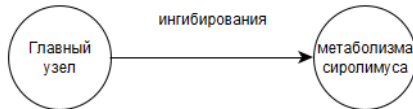


Рис. 6. Пример построения связи от главного узла к независимому глаголу.  
Fig. 6. An example of building a connection from the main node to an independent verb.



Рис. 7. Структурная схема алгоритма построения связи от главного узла к независимому глаголу.  
Fig. 7. A block diagram of the algorithm for building a connection from the main node to an independent verb.



Рис. 8. Пример построения связи от независимого глагола к зависимому глаголу.  
Fig. 8. An example of building a connection from an independent verb to a dependent verb.

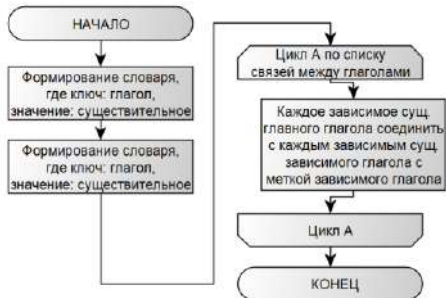


Рис. 9. Структурная схема алгоритма построения связи от независимого глагола к зависимому глаголу.  
Fig. 9. A block diagram of an algorithm for building a connection from an independent verb to a dependent one.



Рис. 10. Пример построения связей подлежащего и сказуемого.  
Fig. 10. An example of building links between a subject and a predicate.

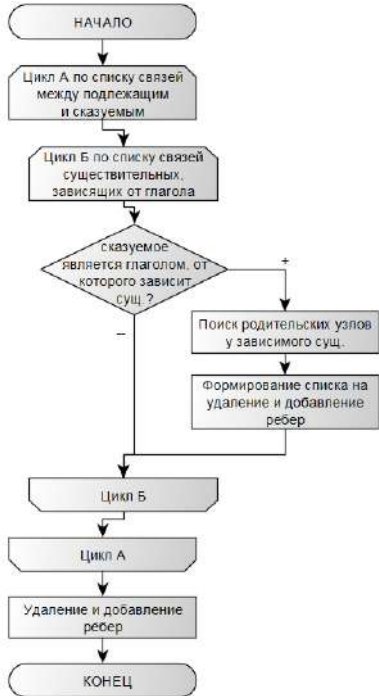


Рис. 11. Структурная схема алгоритма построения связей подлежащего и сказуемого.  
Fig. 11. A block diagram of the algorithm for building connections between the subject and predicate.

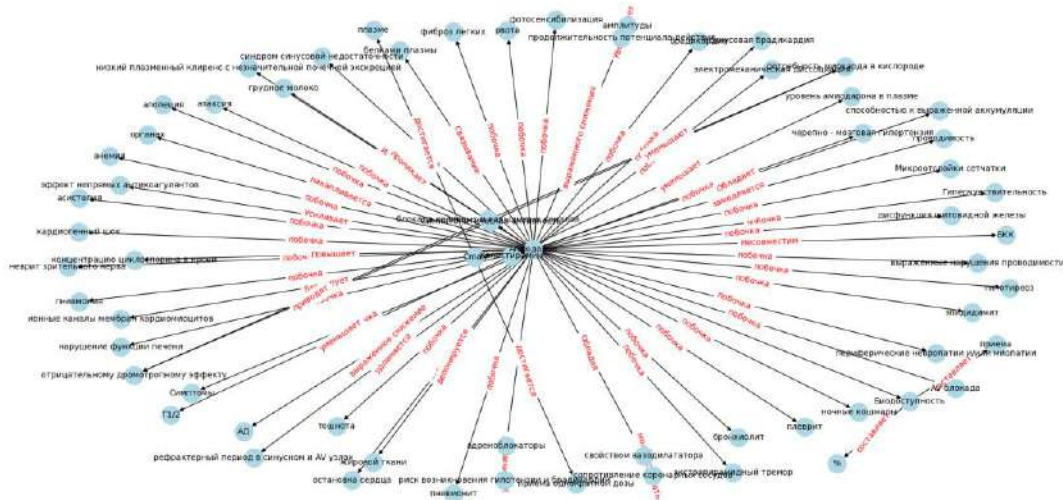


Рис. 12. Семантический граф текста инструкции к лекарственному средству «Амиадазон».  
Fig. 12. Semantic graph of the text of the medical drug "Amiadarone".

### 3.5. Формализация графа для байесовской сети определения рисков возникновения побочных эффектов при полифармакотерапии

В результате анализа большого количества инструкций к различным лекарственным средствам возможно объединение одинаковых вершин. В результате возможно построить большую графовую модель, описания медицинских процессов, правил приема, особенностей приема и другой важной информации с точки зрения текстов инструкций к лекарственным средствам. Первичными вершинами графа для построения байесовской сети являются названия лекарственных средств, имеющие два состояния: принимается ( $A_1$ ) или не принимается ( $A_0$ ).  $P = \{p_1, p_2 \dots p_i, \dots p_n\}$ ;  $p_i \in \{A_{0,i}, A_{1,i}\}$ , где  $P$  – множество всех введенных в систему лекарственных средств;  $p_i$  –  $i$ -ое лекарственное средство;  $A_{0,i}, A_{1,i}$  – состояния  $i$ -го лекарственного средства. Для препаратов с различными способами ввода или дозировками возможно добавление состояний с уменьшенными вероятностями действия лекарственного средства  $p_i \in \{A_{0,i}, A_{1,i} \dots A_{q_i,i}\}$ , где  $q_i$  – количество состояний для  $i$ -го лекарственного средства. Представленные вершины могут объединяться в группы аналогично медицинской классификации для удобства определения аналогов, альтернатив и обобщения действий.  $H = \{h_1, h_2 \dots h_s, \dots h_S\}$ , для  $\forall p_i \exists h_s: p_i \in h_s$ , где  $H$  – множество групп лекарственных средств  $S \ll n$ .

При назначении лекарственных средств происходит активация соответствующих вершин, перевод состояний вершин  $p_i$  для каждого назначенного лекарственного средства с  $A_{0,i}$  – лекарственное средство не принимается, до  $A_{1,i}$  – прием лекарственного средства, или другое состояние, если для лекарственного средства указывается дозировка или способ приема. Требуется оценить вероятности различных состояний ( $C_{0,k}$  – побочный эффект не наблюдается,  $C_{1,k}$  – наблюдается побочный эффект) для всех вершин побочных эффектов. Оценки вероятностей побочных эффектов позволяют оценить риски при одновременном приеме нескольких лекарственных средств. В результате одновременной активации нескольких вершин лекарственных средств определяются риски возникновения различных побочных эффектов, риски при полифармакотерапии.

## 4. Заключение

В процессе выполнения работы был создан специализированный словарь для поиска ключевых терминов в текстах медицинских инструкций. Этот словарь включает в себя термины, отобранные из различных авторитетных источников, таких как база данных VigiAccess, Международная классификация болезней (МКБ-10), а также справочные материалы с сайта rlsnet.ru. Собранный текстовый корпус был тщательно подготовлен и отформатирован для обеспечения высокого качества обучения модели, включающего процедуры очистки данных и приведения их к единому формату.

В будущем, для сбора текстового корпуса, планируется перейти к использованию более авторитетного источника grls.rosminzdrav.ru, чтобы использовать тексты инструкций с официального сайта, поскольку данный источник считается более достоверным с точки зрения точности и полноты информации о зарегистрированных лекарственных средствах.

Для автоматизации процесса аннотации данных был разработан алгоритм, который осуществлял поиск терминов из созданного словаря и автоматически размечал их в формате BIO (Begin, Inside, Outside). Это позволило упорядочить процесс меток, обеспечивая структурированную разметку, необходимую для последующего обучения моделей машинного обучения.

В ходе работы была разработана модель на основе глубоких нейронных сетей, продемонстрировавшая высокую эффективность в задаче распознавания именованных сущностей. Применение методов глубокого обучения позволило учитывать контекстные зависимости между словами, что обеспечило более точное выделение медицинских терминов в текстах.

Решение задачи построения семантического графа лекарственных средств опирается на реализованные алгоритмы нахождения связей между именованными сущностями, которые, однако, не предусматривают нахождение глубоких связей между узлами графа, так как в текстах важную роль играют подлежащие и сказуемые. Для углубления связей на уровень ниже необходимо, чтобы в тексте зависимое слово, которое занимает конечное положение в графе, являлось подлежащим в другом предложении. Однако структура естественного языка не всегда соответствует этому требованию, что важно для работы алгоритма, но не обязательно для текста. В связи с этим возникает потребность в ручной доработке инструкций, позволяющей выявлять более сложные зависимости.

## Список литературы / References

- [1]. Popov A. M. Adaskina Yu. V. Andreyeva D. A. Charabet Ja. K. Moskvina A. D. Protopopova E. V. Yushina T. A. Named Entity Normalization for Fact Extraction Task. *Computational Linguistics and Intellectual Technologies: Proceedings of the International Conference "Dialogue 2016"* Moscow, June 1–4, 2016.
- [2]. Sysoev A. A. Andrianov I. A. Named Entity Recognition in Russian: the Power of Wiki-Based Approach. *Computational Linguistics and Intellectual Technologies: Proceedings of the International Conference "Dialogue 2016"* Moscow, June 1–4, 2016.
- [3]. Stepanova M. E. Budnikov E. A. Chelombeeva A. N. Matavina P. V. Skorinkin D. A. Information Extraction Based on Deep Syntactic-Semantic Analysis. *Computational Linguistics and Intellectual Technologies: Proceedings of the International Conference "Dialogue 2016"* Moscow, June 1–4, 2016.
- [4]. Dingcheng Li, Karin Kipper-Schuler, and Guergana Savova. Conditional random fields and support vector machines for disorder named entity recognition in clinical texts. In *Proceedings of the Workshop on Current Trends in Biomedical Natural Language Processing, 2008, BioNLP '08*, pages 94–95, Stroudsburg, PA, USA. Association for Computational Linguistics.
- [5]. S. Keretna, C. P. Lim, and D. Creighton. A hybrid model for named entity recognition using unstructured medical text. In *2014 9th International Conference on System of Systems Engineering (SOSE), 2014*, pages 85–90, June.

- [6]. Carol Friedman, Philip O Alderson, John HM Austin, James J Cimino, and Stephen B Johnson. A general natural-language text processor for clinical radiology. *Journal of the American Medical Informatics Association*, 1994, 1(2):161–174.
- [7]. Alan R Aronson and Francis-Michel Lang. An overview of metapmap: historical perspective and recent advances. *Journal of the American Medical Informatics Association*, 2010, 17(3):229–236.
- [8]. Guergana K Savova, James J Masanz, Philip V Ogren, Jiaping Zheng, Sunghwan Sohn, Karin C KipperSchuler, and Christopher G Chute. Mayo clinical text analysis and knowledge extraction system (ctakes): architecture, component evaluation and applications. *Journal of the American Medical Informatics Association*, 2010, 17(5):507–513.
- [9]. Gurulingappa H, Hofmann-Apitius M, and Fluck J. Concept identification and assertion classification in patient health records. In *Proceedings of the 2010 i2b2/VA Workshop on Challenges in Natural Language Processing for Clinical Data*. 2010.
- [10]. Scott Halgrim, Fei Xia, Imre Solti, Eithon Cadag, and Ozlem Uzun. Extracting medication information from discharge summaries. In *Proceedings of the NAACL HLT 2010 Second Louhi Workshop on Text and Data Mining of Health Documents*, Louhi'10, 2010, pages 61–67, Stroudsburg, PA, USA. Association for Computational Linguistics.
- [11]. Shao-dian Zhang and Noemie Elhadad. Unsupervised biomedical named entity recognition: Experiments with clinical and biological texts. *Journal of Biomedical Informatics*, 2013, 46(6):1088 – 1098.
- [12]. Asif Ekbal and Sriparna Saha. Stacked ensemble coupled with feature selection for biomedical entity extraction. *Knowledge-Based Systems*, 2013, 46(0):22 – 32.
- [13]. H. L. Shashirekha and H. A. Nayel. A comparative study of segment representation for biomedical named entity recognition. In *2016 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)*, 2016, pages 1046– 1052, Sept.
- [14]. Sara Keretna, Chee Peng Lim, Doug Creighton, and Khaled Bashir Shaban. Enhancing medical named entity recognition with an extended segment representation technique. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 2015, 119(2):88 – 100.
- [15]. Yonghui Wu, Min Jiang, Jianbo Lei, and Hua Xu. Named entity recognition in chinese clinical text using deep neural network. *Studies in health technology and informatics*, 2015, 216:624.
- [16]. Giorgi J.M. and Bader G.D. Transfer learning for biomedical named entity recognition with neural networks. *Bioinformatics*, 2018, 34, 4087.
- [17]. Habibi M. et al. Deep learning with word embeddings improves bio- medical named entity recognition. *Bioinformatics*, 2017, 33, i37–i48.
- [18]. Wang X. et al. Cross-type biomedical named entity recognition with deep multi-task learning. *Bioinformatics*, 2018, 35, 1745–1752.
- [19]. Yoon W. et al. Collabonet: collaboration of deep neural networks for biomedical named entity recognition. *BMC Bioinformatics*, 2019, 20, 249.
- [20]. VigiAccess. Глобальная база данных Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ). <https://vigiaccess.org>. 2024.
- [21]. МКБ-10. Международная классификация болезней 10-го пересмотра. <https://mkb-10.com>. 2024.
- [22]. Регистр лекарственных средств. Энциклопедия лекарств РЛС. <https://www.rlsnet.ru>. 2024.
- [23]. Razdel. rule-based system for Russian sentence and word tokenization. <https://github.com/natasha/razdel>. 2024.
- [24]. Б.И. Гельцер, Т.А. Горбач, В.В. Грибова, О.В. Карпик, Э.С. Клышинский, Н.А. Кочеткова, Д.Б. Окунь, М.В. Петряева, К.И. Шагельдян, Синтаксический анализ текстов предметной области при помощи онтологии. *Труды ИСП РАН*, 2021, том 33, вып. 4.
- [25]. Sebastian Raschka, Model Evaluation. Model Selection, and Algorithm Selection in Machine Learning. University of Wisconsin–Madison Department of Statistics November 2018.
- [26]. Gaël Varoquaux, Olivier Colliot. Evaluating machine learning models and their diagnostic value. *HAL open science* Submitted on 21 Jan 2023 (v4), last revised 20 Apr 2023 (v5).
- [27]. Pedregosa F, et al. Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*. 2011. 12(85):2825–2830.
- [28]. Vickers AJ, Van Calster B, Steyerberg EW. Net benefit approaches to the evaluation of prediction models, molecular markers, and diagnostic tests, 2016, *bmj* 352.
- [29]. Powers D Evaluation: From precision, recall and f-measure to roc, informedness, markedness & correlation. *Journal of Machine Learning Technologies*. 2011. 2(1):37–63.

- [30]. Perez-Lebel A, Morvan ML, Varoquaux G. Beyond calibration: estimating the grouping loss of modern neural networks. ICLR. 2023.

### **Информация об авторах / Information about authors**

Юрий Павлович ТИТОВ – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник научной лаборатории «Перспективных систем хранения и обработки сверхбольших массивов данных» Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова. Сфера научных интересов: метаэвристическая оптимизация, графовые модели, машинное обучение, нечеткая логика и имитационные модели.

Yuri Pavlovich TITOV – Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Leading Researcher of the Scientific Laboratory of “Advanced Systems for Storage and Processing of Ultra-Large Data Arrays” of the Plekhanov Russian University of Economics. Research interests: metaheuristic optimization, graph models, machine learning, fuzzy logic and simulation models.

Никита Владимирович КИЛЬМИШКИН является сотрудником лаборатории «Прикладное моделирование» Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова. Его научные интересы включают машинное обучение.

Nikita Vladimirovich KILMISHKIN is an employee of the laboratory "Applied Modeling" of the Plekhanov Russian University of Economics. His research interests include machine learning.

Дмитрий Дмитриевич КУБРАКОВ – является сотрудником лаборатории «Перспективных систем хранения и обработки сверхбольших массивов данных» Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова. Его научные интересы включают машинное обучение, машинная лингвистика, обработка больших данных.

Dmitry Dmitrievich KUBRAKOV is an employee of the laboratory of "Advanced Storage and Processing systems for Ultra-large data arrays" of the Plekhanov Russian University of Economics. His research interests include machine learning, machine linguistics, and big data processing.

Полина Михайловна ИВАНОВА – является сотрудницей лаборатории «Перспективных систем хранения и обработки сверхбольших массивов данных» Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова. Ее научные интересы включают обработка больших данных.

Polina Mikhailovna IVANOVA – is an employee of the laboratory of "Advanced Storage and Processing systems for Ultra-large data arrays" of the Plekhanov Russian University of Economics. Her research interests include big data processing.



# What Status of the Vasyugan Khanty Vernacular Do Calculations on the LingvoDoc Platform Support from the Point of View of Systemic Morphological Characteristics?

<sup>1,2</sup> V.V. Vorobeva, ORCID: 0000-0002-8729-0375 <victoriavorobeva@mail.ru>

<sup>3</sup> I.V. Novitskaya, ORCID: 0000-0003-1559-8810 <irno2012@yandex.ru>

<sup>1</sup> *Ivannikov Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences,  
25, Alexander Solzhenitsyn st., Moscow, 109004, Russia.*

<sup>2</sup> *National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin ave., Tomsk, 634050, Russia.*

<sup>3</sup> *National Research Tomsk State University,  
36, Lenin ave., Tomsk, 634050, Russia.*

**Abstract.** In this study the object of analysis is Vasyugan Khanty. Its status raises controversial opinions in Khanty studies. To clarify the status of the Vasyugan idiom as a separate dialect or as an accent of the Vakh-Vasyugan dialect, we employed modern methods of language data analysis. We used corpus data of the two varieties of the Khanty language, namely, Vakh Khanty and Vasyugan Khanty, available at the LingvoDoc platform to calculate their morphological proximity by means of the online virtual laboratory tool. The analysis results point to the fact that the morphological systems of the Vakh and Vasyugan Khanty vernaculars coincide by 98%, which confirms their morphological unity and affiliation with one and the same dialectal continuum. The machine analysis of the morphological dictionaries, cognate groups and transcriptions identified only three autonomous affixes in each idiom. Due to the fact that the volumes of the corpus data of the two varieties are unbalanced, the unique autonomous morphological affixes in each idiom can be regarded as a tentative argument subject to correction.

**Keywords:** Khanty language Vasyugan dialect; field data; text corpora; LingvoDoc; data analysis; language documentation.

**For citation:** Vorobeva V.V., Novitskaya I.V. What status of the Vasyugan Khanty vernacular do calculations on the LingvoDoc platform support from the point of view of systemic morphological characteristics? Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS, vol. 37, issue 2, 2025, pp. 237-246. DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(2)-17.

**Acknowledgements.** The authors are grateful to the anonymous reviewers for their insightful comments to the article. The research was funded by the Russian Science Foundation, project no. 25-78-20002 “Capabilities of Artificial Intelligence for Comparative-Historical Study of Low-Resource Languages of the Peoples of the Russian Federation”.

## Какой статус васюганского варианта хантыйского языка подтверждают вычисления на платформе ЛингвоДок с точки зрения его системных морфологических характеристик?

<sup>1,2</sup> В.В. Воробьева, ORCID: 0000-0002-8729-0375 <[victoriavorobeva@mail.ru](mailto:victoriavorobeva@mail.ru)>

<sup>3</sup> И.В. Новицкая, ORCID: 0000-0003-1559-8810 <[irno2012@yandex.ru](mailto:irno2012@yandex.ru)>

<sup>1</sup> Институт системного программирования им. В.П. Иванникова РАН,  
Россия, 109004, Москва, ул. Александра Солженицына, 25.

<sup>2</sup> Национальный Исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, проспект Ленина, д. 30.

<sup>3</sup> Национальный Исследовательский Томский государственный университет,  
Россия, 634050, проспект Ленина, д. 36.

**Аннотация.** В данном исследовании объектом анализа выступает васюганский вариант хантыйского языка. Его статус вызывает противоречивые мнения в исследованиях хантологов. Для уточнения статуса васюганского идиома как отдельного диалекта или как говора вах-васюганского диалекта мы использовали современные методы анализа языковых данных. На платформе LingvoDoc были использованы корпусные данные двух вариантов хантыйского языка, а именно, ваховского хантыйского и васюганского хантыйского, для расчета их морфологической близости с помощью онлайн-инструмента виртуальной лаборатории. Результаты анализа указывают на то, что морфологические системы ваховского и васюганского вариантов хантыйского языка совпадают на 98%, что подтверждает их морфологическое единство и принадлежность к одному и тому же диалектному континууму. Машинный анализ морфологических словарей, родственных групп и транскрипций выявил только три автономных аффикса в каждом идиоме. В связи с тем, что объёмы корпусных данных двух диалектных разновидностей несбалансированы, уникальные автономные морфологические аффиксы в каждом идиоме можно рассматривать как аргумент, подлежащий дальнейшей корректировке.

**Ключевые слова:** васюганский хантыйский; полевые данные; текстовые корпуса; платформа LingvoDoc; анализ данных; языковое документирование.

**Для цитирования:** Воробьева В.В., Новицкая И.В. Какой статус васюганского варианта хантыйского языка подтверждают вычисления на платформе ЛингвоДок с точки зрения его системных морфологических характеристик? Труды ИСП РАН, том 37, вып. 2, 2025 г., стр. 237–246 (на английском языке). DOI: 10.15514/ISPRAS–2025–37(2)–17.

**Благодарности.** Авторы выражают искреннюю благодарность анонимным рецензентам за их ценные комментарии к статье. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФН, грант 25-78-20002 «Возможности искусственного интеллекта для сравнительно-исторического изучения малоресурсных языков народов РФ».

### 1. Introduction

To date, linguists have reached no consensus on the status of the Vasyugan Khanty vernacular, which is considered to be a member of the eastern dialect continuum. According to one point of view, Vasyugan, together with Vakh, forms a single Vakh-Vasyugan dialect of the eastern Khanty [1-4]. Another viewpoint is that Vakh and Vasyugan belong to different Eastern Khanty dialects [5-7]. Russian researcher N.I. Tereshkin argues that the eastern group includes three vernaculars [8]:

- a) the Vakh-Vasyugan type, encompassing the dialects of the Vakh, Vasyugan and Aleksandrovsk Khanty;
- b) the Surgut type, encompassing the dialects of the Agan, Trom-Yugan, Pim and Yugan Khanty;
- c) the Salym type, encompassing two dialects [8], which are no longer in use.

According to N.I. Tereshkin's opinion, it is the dialects of the Vakh-Vasyugan subgroup alone that display some differences [8]. The Vakh dialect belongs to the l-type, the Vasyugan and Aleksandrovsky dialects belong to the j-type. The main difference is revealed in the use of the initial phoneme in word forms: cf. the form of the 3rd person singular pronoun with [l] in the Vakh *lõy* and the form with [j] in the Vasyugan *jõy*.

The same pattern is illustrated by the following examples: *lantjw – jantjw* 'ribbon, tape', *lalmjla – jalmjla* 'to steal', etc. [8]. In addition to phonetic differences, N.I. Tereshkin's dictionary also lists lexical differences between the two dialects, for example, Vakh. *wālā* – Vas. *wāla* 'bed, bunk' [8], Vakh. *ķāruyāl* – Vas. *qāruwāl* 'part of a rifle' [8], etc. Some lexical units, according to the dictionary materials, are specific to only one of the dialects, for example, Vakh. *ķarik* 'junk, rubbish', Vakh. *lāl* 'a gap between two spacers', [8], Vas. *kāyri* 'protection, hook', Vas. *kõt'kāmnaŋ* 'prey, trade' [8] and others.

In this study we draw on the opinion expressed by A.Yu. Filchenko [9], a researcher of the Vasyugan Khanty idiom, that the Vasyugan idiom is an autonomous dialect of the eastern group and is separate from the Vakh dialect [10-11]. The notion of dialect, however, is opposed to the notion of accent in the Russian linguistic tradition, so it is necessary to determine the status of the Vakh and Vasyugan varieties of the Khanty language either as dialects or as accents.

A dialect is understood as a regionally or socially distinctive variety of the language spoken by residents of a certain area, and identified by a particular set of words and grammatical structures [12]. An accent is defined as the cumulative auditory effect of those features of pronunciation which identify where a person is from, regionally or socially [12].

From the social and cultural perspective, the Vakh and Vasyugan Khanty peoples have a relatively common linguistic landscape, material and spiritual culture, traditions, literature, ethnic self-awareness, mutual intelligibility, and identity of speakers. From the linguistic perspective, there are differences between the Vakh and Vasyugan varieties of the language at the phonetic-phonological and lexical levels mentioned above. Differences of the phonetic type have also been dealt with in [9]. However, no discrepancies in the field of grammar have so far been described comprehensively in the scientific literature. This raises the question of the status of the Vasyugan Khanty vernacular. As it is known, dialects of one language display discrepancies in pronunciation, vocabulary and grammar of the language system. This poses the question of how legitimate it is to classify the Vasyugan Khanty as an autonomous dialect.

The purpose of this article is to clarify the status of the Vasyugan Khanty vernacular which is calculated on the corpus data by means of the tools on the LingvoDoc platform. It should be noted that it is the first attempt to calculate the degree of proximity between the Vakh and Vasyugan idioms of the Khanty language using online tools, although the effectiveness of the tools available on the LingvoDoc linguistic platform has already been tested with regard to the morphological and etymological analysis of a number of the Ural and Altai languages [13, 14].

The study was carried out on the corpora of the Vakh and Vasyugan varieties of the Khanty language of the eastern group. Both corpora are openly accessible at the LingvoDoc platform [15]. The platform uses Russian as an interface language.

The corpus of the Vakh dialect of the Khanty language, contains about 13 thousand word forms, is authored by V.V. Vorobeva [16] and S.V. Kovylin [17], and is represented by the materials from the expeditions to the village of Korliki in the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug–Yugra in 2017–2019. The corpus of the Vasyugan dialect of the Khanty language containing about 2,500 word forms, includes texts annotated by L.I. Kalinina (1966), a text by V. Steinitz (1950), texts obtained in the expeditions of A.Yu. Filchenko (2008) [18], and the Khanty written monument of St. Macarius (Nevskiy) (1887) [19].

2. Results of analysis and their interpretation

The calculation of the degree of proximity of the two eastern Khanty vernaculars was carried out in the virtual laboratory LingvoDoc [20].

LingvoDoc is a service designed with the focus on documenting languages by creating dictionaries of any structure, establishing etymological links between them and performing calculations based on language data [13, 21].

The calculation and analysis of the proximity of the two eastern idioms was carried out by means of the tool “Degree of morphological proximity of different dialects”. The program calculates mathematically a distance between different dialects/accents and presents results instantly in the form of diagrams and tables, which require further description and generalization.

At the initial stage, the corpora of the vernaculars under analysis are converted into morphological dictionaries to enable calculation of the morphological similarity between the Vakh and Vasyugan language varieties. The morphological dictionaries obtained from the corpus data represent a conglomerate of unordered affixes with their meanings, which are retrieved from the text corpora. Then comes the stage at which all cases of homonymy are manually removed. This results in creating dictionaries in which each affix is terminologically designated, is given one lexical entry. If it is necessary, a comment can be manually added that describes functional peculiarities of the affix. In addition, all instances of how this affix has been used are retrieved from the corpus and listed (see Fig. 1).

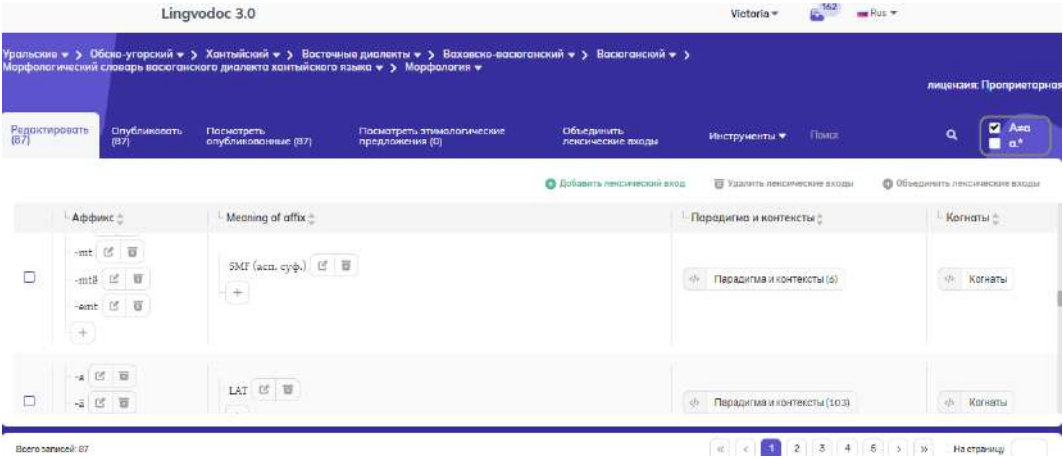


Fig. 1. Morphological dictionary on the Lingvodok platform.

After the manual removal of homonymy instances, the dictionaries under analysis can be connected with one another by invisible threads – cognates. To this end, one can add the “Cognates” column via the dictionary properties feature, which will offer etymologies for each affix obtained from the multiple dictionaries available on the LingvDoc. All one needs to do is to select the right one.

After all dictionaries have been prepared as described above, one can activate another virtual laboratory tool that mathematically calculates the proximity of the distance between the given vernaculars. This tool is called “Degree of morphological proximity between dialects”, which is available to all registered users of the laboratory. The tool enables one to obtain a portrait of the morphological proximity of the perspectives in the form of a report “from different angles”, which requires further interpretation.

In our case, the machine analysed the data of 2 dictionaries, 75 cognate groups and 171 transcriptions (Fig. 2). None of the cognate groups was excluded, which speaks about the accuracy of the results. The results of the machine analysis can also be exported in the format .xlsx.



Fig.2. Summary of the data included in the calculation.

The software of the LingvoDoc platform shows the morphological proximity between dialects according to the processed dictionaries in the form of a graph that represents an etymological tree of distances between the two eastern varieties (see Fig. 3). In the diagram, the red dot represents the “Morphological Dictionary of the Vasyugan Idiom”, the green dot - the “Morphological Dictionary of the Vakh Idiom”. The diagram demonstrates the closest possible distance between perspectives 1 and 2, since the dots are located on the same line.

This result is further confirmed in terms of percentage in the table. One can see that the Vakh and Vasyugan Khanty idioms are 98% grammatically close (see Fig. 4).

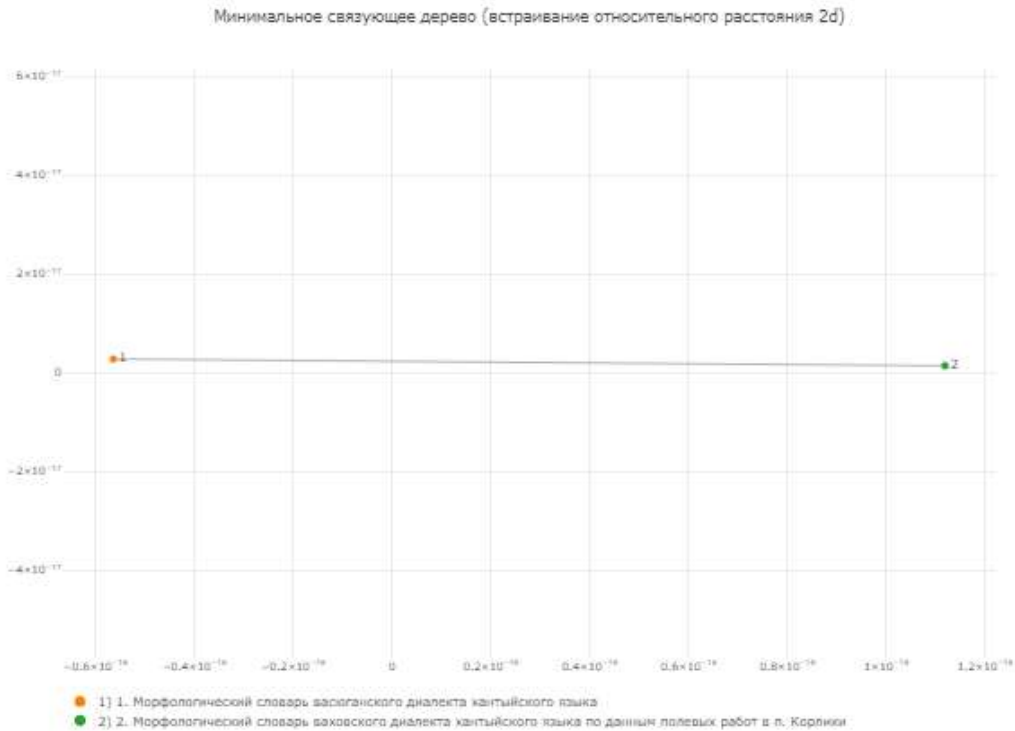


Fig. 3. Etymological tree of distance.

	1. Морфологический словарь васюганского диалекта хантыйского языка	2. Морфологический словарь ваховского диалекта хантыйского языка по данным полевых работ в п. Корлики
1	n/a	0.36 (98%)
2	0.36 (98%)	n/a

Fig. 4. Morphological calculation of the proximity of Vakh and Vasyugan Khanty in percentages.

Drawing on the analysis results of the two dictionaries, a common consolidated database of affixes is formed. The results of the calculation show that the Vakh and Vasyugan morphological dictionaries have 76 etymologically related affixes. All affixes that share etymologies are presented in Fig. 5a-f. The right column lists the affixes of the Vakh Khanty, and the left column – those of the Vasyugan Khanty.

1. Морфологический словарь васюганского диалекта хантыйского языка	2. Морфологический словарь ваховского диалекта хантыйского языка по данным полевых работ в п. Корлики
-a; -ä ( LAT )	-ä; -a ( LAT )
-at ( PASS.3PL )	-ät; -at ( PASS.3PL )
-i ( ATTR )	-j ( ATTR )
-i; -j ( NST.PASS.3SG; PASS.3SG )	-j; -i ( PASS.3SG; NST.PASS (только в бессуф. вр. PASS) )
-i; -ы ( IMP (со всеми ч. суб. и об. спр. кроме SG.S); IMP.SG<SG.S (только в SG об. спр., т.к. ч. суф. нулевой) )	-j; -i ( IMP.SG<SG.S (только в SG об. спр., т.к. ч. суф. нулевой); IMP (со всеми ч. суб. и об. спр. кроме SG.S) )
-im; -im ( SG<1SG.S )	-im; -im ( NST.SG<1SG.S (только бессуф. вр.); SG<1SG.S )
-jm; -äm; -m; -am; -im; -am; -äm; -äm ( NST.1SG.S (только в бессуф. вр.); 1SG; 1SG.S; POSS.1SG )	-äm; -äm; -äm; -im; -im; -jm; -äm; -m; -am ( NST.1SG.S (только в бессуф. вр.); 1SG; 1SG; 1SG.S; 1SG.S; POSS.1SG )
-jw ( SG<1PL.S )	-üy; -öy; -öy; -öy; -öy; -öy; -öy; -uü ( POSS.1PL; 1PL; 1PL; 1PL.S; NST.1PL.S (только в бессуф. вр.); SG<1PL.S )
-öw; -aw ( SG<1PL.S; 1PL; 1PL; 1PL.S; NST.1PL.S (только в бессуф. вр.); POSS.1PL )	
-jñ; -ñ; -añ; -äjñ ( PROPR )	-əñ ( PROPR )
-j; -n; -k; -y; -ñ ( EP )	-j; -k; -ñ; -y ( EP )
-kas; -yas ( PST2.3SG.S; PST2 )	-kas; -käš; -kas; -yäs; -yas ( PST2.3SG.S; PST2 )

Fig 5a. Common affixes for Vakh and Vasyugan idioms

-kke; -əke; -əkj; -iki ( PRD )	-əkj; -əkj; -jki; -ki; -iki; -ikə; -əkj ( PRD )
-käi; -yal; -käi; -yäl ( PST3.3SG.S; PST3 )	-yäl; -yal; -yal; -käi ( PST3.3SG.S )
-kan; -yan; -ayen; -əken; -əyən; -iyən ( NST.3SG.S )	-áyən; -äyən; -yən; -iyən ( NST.3SG.S )
-l ( NPST (кроме 3SG, 2SG, 3PL) )	-l ( NPST (кроме 3SG, 2SG, 3PL) )
-lin; -ljin ( POSS.PL<2PL; POSS.PL<3DU; POSS.2DU.PL )	-lin; -ljin ( POSS.PL<3DU; POSS.2DU.PL; POSS.PL<2PL )
-l-ämən ( POSS.PL<1DU )	-l-ämən ( POSS.PL<1DU )
-l-öw ( POSS.PL<1PL )	-l-öy; -l-öy ( POSS.PL<1PL )
-li; -li; -lë; -el ( MULT (acn. cyф.) )	-li; -lië; -li ( MULT (acn. cyф.) )
-la ( PL<SG.S (чис. cyф. IMP) )	-lä; -la ( PL<SG.S (чис. cyф. IMP) )
-lij; -li ( ATTR )	-äli; -äli; -ali; -ali ( DIM )
-ali; -ali; -äli ( DIM )	-li ( ATTR )
-lte ( CAUS (acn. cyф.) )	-lte ( CAUS (acn. cyф.) )
-m ( PFV.PTCP )	-m; -mä; -em; -äm; -më ( PFV.PTCP )
-m; -emt; -mtë; -mt ( SMF (acn. cyф.) )	-m ( SMF (acn. cyф.) ) -mtë; -emt; -lte ( MONT ) -më; -m ( SMF (acn. cyф.) )
-min; -man ( CVB )	-min; -mjin ( CVB )
-mat ( ORD )	-mät ( ORD )
-na; -nä ( COM )	-nä; -na; -nä ( COM )
-nte; -ant; -nt ( MULT.INTR (acn. cyф.) )	-ënt; -nte ( MULT.INTR (acn. cyф.) )
-nä; -nə; -ən ( LOC )	-nä; -n; -na; -nä; -nə; -ni; -në; -në; -än; -ön; -ən; -ən ( LOC )

Fig. 5b. Common affixes for Vakh and Vasyugan idioms.



The program for calculating the proximity between perspectives also distinguishes autonomous affixes and lists them in a separate group. In our case, there are only 6 of them, three affixes in each dictionary (see Fig. 6). The peculiarity of the Vasyugan idiom is three suffixes: the aspectual suffix with the meaning of instant intransitivity *-əyiŋ* (MONT.INTR), the word-formation suffix *-əw* (ATTR) and the reflexive suffix of pronouns *-nām*; *-nam* (REFL). The suffixes specific to the Vakh dialect alone are: the aspectual suffix of reflexivity *-ysə* (REFL), the case suffix *-ətəl*; *-ətəl*; *-təl*; *-əl* (DISTR (fall. suffix) and the reflexive suffix of pronouns *-ä*; *-a* (REFL).

-yäl-äm ( POSS.DU<1SG )	-yäl-äm; -yäl-äm; -əyäl-äm; -yäl-äm; -käl-äm; -əkäl-äm ( POSS.DU<1SG )
-a; -ä; -a ( IMP.SG.S (только в SG суб. спр., т.к. ч. суф. нулевой) )	-a; -ä; -ä ( IMP.SG.S (только в SG суб. спр., т.к. ч. суф. нулевой) )
-өлә ( PL<3SG.S )	-l; -l; -l; -l; -l; -l; -l; -l ( POSS.3SG; 3SG )
-la; -l; -äl; -äl; -al; -l; -l ( 3SG; POSS.3SG )	-t; -ä; -ät; -ät; -ə; -ə; -ät; -ät; -ät; -tə ( PL )
-ət; -ə; -t ( PL )	-l; -l; -l; -l; -l; -l; -l; -l ( POSS.PL<3SG; NST.PL<3SG.S (только в бессыф. вр.); PL<3SG.S )
-лаа; -лаа; -лаа ( POSS.PL<3PL; PL<3PL.S )	-l; -l; -l; -l; -l; -l; -l; -l ( NST.PL<3PL.S (только в бессыф. вр.); PL<3PL.S )
-ла-ам; -ла-им; -ла-ям ( PL<1SG.S; POSS.PL<1SG )	-l; -l; -l; -l; -l; -l; -l; -l ( POSS.PL<1SG; PL<1SG.S )
-ла-ань ( PL<2PL.S )	-l; -l; -l; -l; -l; -l; -l; -l ( PL<2DU.S; PL<PL.S (ч. суф. IMP); PL<3DU.S; PL<2PL.S; PL<DU.S (ч. суф. IMP) )
-лихь ( ABS )	-l; -l; -l; -l; -l; -l; -l; -l ( ABS )
-ра; -рә ( REP )	-r; -r; -r; -r; -r; -r; -r; -r ( REP )
-тахь; -итахь; -етахь; -тыхь; -тыг ( 2PL.S )	-t; -t; -t; -t; -t; -t; -t; -t ( PL.S (ч. суф. пов. накл.); 2PL.S )
-ты ( PTCL )	-t; -t; -t; -t; -t; -t; -t; -t ( PTCL )
-ыль; -л; -l ( 3PL; SG<3PL.S )	-l; -l; -l; -l; -l; -l; -l; -l ( NST.SG<3PL.S (только в бессыф. вр.) )

Fig. 5e. Common affixes for Vakh and Vasyugan idioms.

-ымын; -ымын; -əmən; -mən ( POSS.1DU; 1DU.S )	-imən ( SG<1DU.S )
-imən; -imən ( SG<1DU.S )	-mən; -amən; -əmən; -mən ( 1DU; POSS.1DU; NST.1DU.S (только в бессыф. вр.); 1DU.S )
-ətən; -tən; -ətən ( SG<3DU.S; SG<DU.S (ч. суф. IMP); SG; 2DU.S; DU.S (ч. суф. IMP); POSS.2DU; POSS.3DU; NST.2DU.S (только в бессыф. вр.); POSS.3PL )	-tən; -ətən; -ətən ( S<DU.S (ч. суф. IMP); DU.S (ч. суф. IMP); NST.2DU.S (только в бессыф. вр.); POSS.2DU; SG<3DU.S; POSS.2PL; POSS.3DU; 2DU.S )
kam ( INDEF )	-kam ( INDEF )

Fig. 5f. Common affixes for Vakh and Vasyugan idioms.

<b>1. Морфологический словарь васюганского диалекта хантыйского языка</b>	<b>2. Морфологический словарь ваховского диалекта хантыйского языка по данным полевых работ в п. Корлики</b>
-əyiŋ ( MONT.INTR (асп. суф.) )	
-əw ( ATTR )	
-nām; -nam ( REFL )	
	-ysə ( REFL (асп. суф.) )
	-ətəl; -ətəl; -təl; -əl ( DISTR (пад. суф.) )
	-ä; -a ( REFL )

Fig. 6. Autonomous affixes of Vakh and Vasyugan idioms.

Thus, some minor differences in the grammar of Vakh and Vasyugan Khanty vernaculars have been experimentally identified. However, it is clear that such a low number of differing features of the two idioms cannot affect mutual intelligibility between ethnic communities living in separate groups. The analysis results speak in favour of the conclusion that Vakh and Vasyugan form a single dialectal continuum and represent one Vakh-Vasyugan dialect with its two varieties: Vakh and Vasyugan.

The differences revealed in the system of grammatical affixes, namely, the autonomous affixes, can not be regarded as final and decisive, since the Vakh and Vasyugan corpora are currently not balanced in volume. The Vakh corpus exceeds significantly that of Vasyugan, therefore, an error may surface arising from the fact that some aspectual affixes do not simply occur in these corpora or have not been marked by the authors of these corpora. The distributive case, which is currently identified in the Vakh idiom alone, is rarely used due to its semantics, therefore it can be absent or unidentified in the Vasyugan texts uploaded to the LingvoDoc.

The discrepancy of the reflexive suffix of pronouns may arise from the lacking unification of the marking and designation of glosses. The autonomous morphological affixes should be further studied and analyzed. However, new findings can hardly affect the conclusion that Vakh and Vasyugan Khanty form a single dialect space, which has been confirmed by machine calculations.

### 3. Conclusion

The status of Vasyugan Khanty has not been clearly defined in scientific literature. To confirm its status, we conducted a mathematical analysis of the dictionaries of Vasyugan and Vakh Khanty, obtained from the corpus data, in the LingvoDoc online linguistic laboratory. For the analysis, we used one of the LingvoDoc tools “Degree of morphological proximity between dialects”. The results of the analysis show that the degree of morphological similarity between Vakh and Vasyugan is 98%, which indicates that Vakh and Vasyugan represent a single dialect space, and Vasyugan is a variety of the Vakh-Vasyugan dialect. Machine calculation of the morphological similarity of idioms of the Khanty language was carried out for the first time.

### References

- [1]. V. N. Solovarov, G. L. Nakhracheva A. A. Shiyanova, “Dialects of Khanty”. Khanty-Mansiysk Izhevsk: Print-2 Publ., 2016, 349 p.
- [2]. M. Chepregi, “Surgut dialect of the Khanty language”. Khanty-Mansiysk: Pechatnyj mir g. Khanty-Mansiysk Publ., 2017, 275 p.
- [3]. E. Vértés, Einwandfrei Aufhebbare Widersprüche zweier Mitteilungen über die Vach-Mundart, *Linguistica Uralica*, 1965, vol. 1 (3), pp. 213–217.
- [4]. S. Sosa, Functions of morphosyntactic alternations, and information flow in Surgut Khanty Discourse. Helsinki, 2017. 254 p.
- [5]. P. Hajdú, “The Uralic languages and peoples”. Moscow: Progress, 1985, 425 p.
- [6]. L. Honti, Die ostjakische Sprache. The Uralic Languages. Description, History and Foreign Influences. *Handbuch der Orientalistik*, Ed. D. Sinor. Leiden; New York; København; Köln: Brill, 1988, pp. 172–196.
- [7]. K. F. Karjalainen, Grammatikalische Aufzeichnungen aus Ostjakischen Mundarten. Bearbeitet und herausgegeben von Edith Vertes, Helsinki: Suomalais-Ugrilainen Seura, 1964. 234 p.
- [8]. N. I. Tereshkin, Dictionary of the Eastern Khanty dialects. Leningrad: Nauka Publ., 1981, 544 p.
- [9]. A. Yu. Filchenko, A Grammar of Eastern Khanty. Doctor of Philology Thesis. Houston, Texas, 2007.
- [10]. V. Vorobeva, I. Novitskaya, Inflectional morphology of nouns in Eastern Khanty (Vakh, Vasyugan, Surgut, Salym). *Ural-Altaic Studies*, vol. 38, 2020, pp. 33-70.
- [11]. V.V. Vorobeva, I.V. Novitskaya, Functional and semantic analysis of the case markers in Vakh Khanty (a case study of the latest field data on LingvoDoc). *Proc. ISP RAS*, vol. 36, issue 2, 2024, pp. 199-210. DOI: 10.15514/ISPRAS-2023-35(2)-15.
- [12]. D. Crystal, A dictionary of linguistics and phonetics. 6th edition. Singapore, Blackwell Publishing Ltd, 2008. 529 p.
- [13]. Yu. V. Normanskaya, “Possibilities of “LingvoDoc” for identifying the degree of closeness of languages and dialects and describing graphic and phonetic features”. Information technologies in humanitarian research: Proc. Int. scientific-practical. conf. Krasnoyarsk, September 25-28, 2023, Ed. M. A. Lapteva.

- Krasnoyarsk: Sibirskij federalnyj universitet Publ., 2023, pp. 251–260. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7385533>.
- [14]. I. P. Novak Distribution of anterior fricative consonants in the dialects of the Karelian language of Central Karelia (based on the application of the “cognate analysis” algorithm of the LingvoDoc linguistic platform). *Ural-Altai studies*. 2022. No. 02 (45). P. 79-105.
- [15]. [https://lingvodoc.ispras.ru/language\\_databases](https://lingvodoc.ispras.ru/language_databases) (дата обращения 01.02.2025).
- [16]. Text corpus of Vakh Khanty. Author V.V. Vorobeva. URL: <https://lingvodoc.ispras.ru/dictionary/7349/279/perspective/7349/283/view/> (дата обращения 11.09.2024).
- [17]. Text corpus of Vakh Khanty. Author S. V. Kovylin. URL: <https://lingvodoc.ispras.ru/dictionary/3021/71/perspective/3021/75/view/> (дата обращения 05.09.2024).
- [18]. Texts corpus of Vasyugan Khanty. Author V.V. Vorobeva. URL: <https://lingvodoc.ispras.ru/dictionary/2488/8764/perspective/2488/8767/view/> (дата обращения 12.09.2024).
- [19]. Texts corpus of Vasyugan Khanty. Monument of St. Macarius (Nevsky). Author S.V. Kovylin. С. В. Ковылин.
- [20]. <https://www.lingvodoc.ispras.ru> (дата обращения 01.02.2025).
- [21]. Yu. V. Normanskaya, A. I. Avetisyan, I. B. Beloborodov, O. D. Borisenko, “The LingvoDOC software system and the possibilities it offers for documenting and analyzing Ob-Ugric languages”. / “Reports of the Russian Academy of Sciences. Mathematics, informatics, control processes”, 2022, no. 504 (1), pp. 60–82.

## **Информация об авторах / Information about authors**

Виктория Владимировна ВОРОБЬЕВА – кандидат филологических наук, доцент ОИЯ ШОН Томского политехнического университета с 1999 года. В настоящее время также ведет исследования в лаборатории Лингвистических платформ ИСП им. В.П. Иванникова РАН. Сфера научных интересов: корпусная лингвистика, обско-угорские языки, документация исчезающих языков России.

Victoria Vladimirovna VOROBEOVA – Cand. Sci. (Philology), Associate Professor of Department of Foreign Languages, School of Social Sciences of National Research Tomsk Polytechnic University since 1999. At the present time she is a researcher at the Linguistic Platforms Laboratory of Information Systems Department as well. Research interests: comparative typological linguistics, Uralic family of languages, corpus linguistics, documentation and digital processing of endangered languages of Russia.

Ирина Владимировна НОВИЦКАЯ – доктор филологических наук, профессор кафедры английской филологии Томского государственного университета. Сфера научных интересов: морфология и семантика древнегерманских языков, сравнительные и типологические исследования морфологии языков, морфосинтаксические характеристики лексики хантыйского языка, прикладная лингвистика.

Irina Vladimirovna NOVITSKAYA – Dr. Sci. (Philology), professor at the Department of English Philology, National Research Tomsk State University. Research interests: morphology and semantics of the Old Germanic languages, typological studies, comparative studies, morpho-syntactical properties of Khanty lexical units, applied linguistics.

DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(2)-18



## Названия украшений в тюркских и финно-угорских языках Урало-Поволжья

*Р.Т. Муратова, ORCID: 0000-0003-4223-0675 <bairima@yandex.ru>*

*Институт истории, языка и литературы  
Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук,  
Россия, 450054, г. Уфа, пр. Октября, д. 71.*

**Аннотация.** В статье рассматриваются названия украшений в тюркских и финно-угорских языках Урало-Поволжья, выявляются общие и специфические особенности в их номинации. Исследования проводились с учетом данных лингвистических, этнографических, археологических трудов. Были построены ареалы распространения названий и предпринималась попытка датировать появление лексем. Поиск этимологий и картографирование проводились на лингвистической платформе Лингводок. Выявлены следующие особенности названий украшений в тюркских и финно-угорских языках Урало-Поволжья: 1) лексемы для обозначения кольца, серег и бус в тюркских языках являются более древними и восходят к праформам; в финно-угорских они являются либо заимствованиями, либо производными от других слов. Данный вывод полностью совпадает с результатами исследований археологов, которые относят украшения тюрок к гунно-сарматской эпохе; 2) названия подтверждают этнографические данные, например, арабское заимствование для обозначения бус из кораллов встречается в тех языках, в которых этот тип бус встречается; 3) названия налобной повязки соответствуют типам и функциям повязок. Таким образом, на основе лингвистических сведений нам удалось подтвердить данные археологических и этнографических исследований, в некотором смысле даже датировать происхождение названий.

**Ключевые слова:** народы Урало-Поволжья; тюркские языки; финно-угорские языки; названия украшений; лингвистическое картографирование; лингвистическая платформа Лингводок.

**Для цитирования:** Муратова Р.Т. Названия украшений в тюркских и финно-угорских языках Урало-Поволжья. Труды ИСП РАН, том 37, вып. 2, 2025 г., стр. 247–254. DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(2)-18.

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-28-01562, <https://rscf.ru/project/24/-28-01562/>.

## Names of Jewelry in the Turkic and Finno-Ugric Languages of the Ural-Volga Region

*R.T. Muratova, ORCID: 0000-0003-4223-0675 <bairima@yandex.ru>*

*Institute for History, Language and Literature,  
Ufa Federal Research Centre of Russian Academy of Sciences,  
71, prospekt Oktyabrya, Ufa, 450054, Russia.*

**Abstract.** The article considers the names of jewelry in the Turkic and Finno-Ugric languages of the Ural-Volga region, reveals common and specific features in their nomination. The research was conducted taking into account the data of linguistic, ethnographic, archaeological works. The areas of distribution of names were constructed and an attempt was made to date the appearance of lexemes. The search for etymologies and mapping were carried out on the linguistic platform Lingvodok. The following features of the names of jewelry in the Turkic and Finno-Ugric languages of the Ural-Volga region were revealed: 1) lexemes denoting a ring, earrings and beads in the Turkic languages are more ancient and go back to the proto-forms; in the Finno-Ugric languages, they are either borrowings or derivatives of other words. This conclusion confirms the research of archaeologists who attribute the jewelry of the Turks to the Hunno-Sarmatian era; 2) the names confirm ethnographic data, for example, the Arabic loanword for coral beads is found in the languages in which this type of beads is found; 3) the names of the headbands correspond to the types and functions of the headbands. Thus, on the basis of linguistic data, the data of archaeological and ethnographic studies were confirmed, in a sense sometimes even dating the origin of the names.

**Keywords:** peoples of the Ural-Volga region; Turkic languages; Finno-Ugric languages; names of jewelry; linguistic mapping; linguistic platform Lingvodok.

**For citation:** Muratova R.T. Names of jewelry in the Turkic and Finno-Ugric languages of the Ural-Volga region. *Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS*, vol. 37, issue 2, 2025, pp. 247-254 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(2)-18.

**Acknowledgements.** The reported study was granted by Russian Science Foundation, project no. 24-28-01562, <https://rscf.ru/project/24/-28-01562/>.

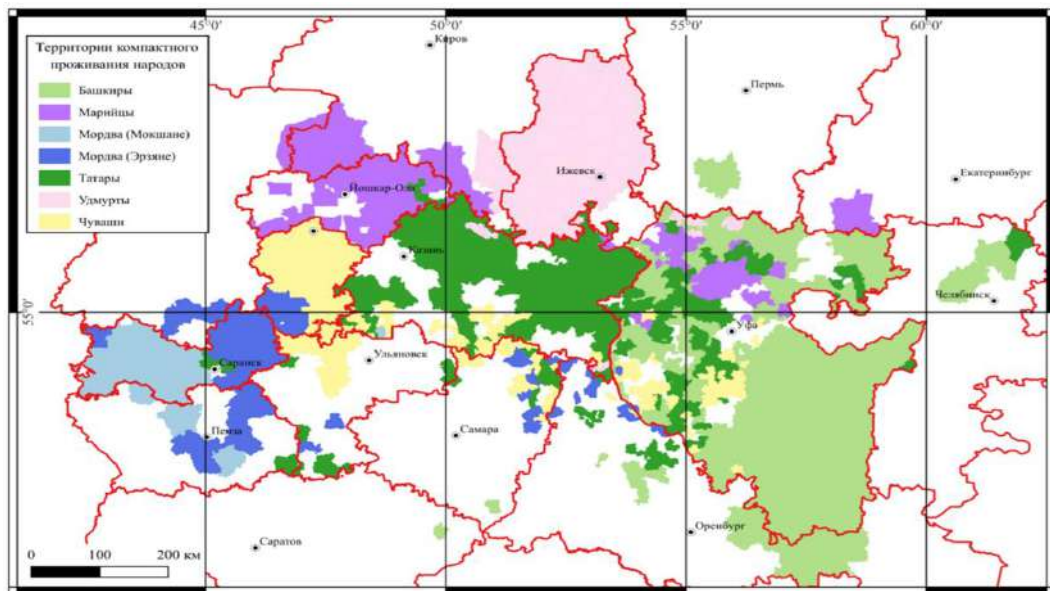
### 1. Введение

В настоящее время в Российской Федерации наблюдается процесс возрождения культурных традиций разных народов. В связи с этим увеличился интерес к таким этномаркерам, которые играют значимую роль в идентификации тех или иных национальностей в условиях глобализации. Такой же процесс отмечается в Урало-Поволжье – в особом историко-этнографическом регионе, который территориально занимает центральное положение в составе России, а в этническом плане является многонациональным, где компактно проживают шесть крупных народов, имеющие свои национальные республики. В лингвистическом отношении языки Урало-Поволжья относятся к двум языковым семьям: башкирский, татарский, чувашский языки – к тюркской группе алтайской языковой семьи; удмуртский, марийский, мордовские (эрзянский и мокшанский) – к финской ветви финно-угорской группы уральской языковой семьи (см. карту 1).

Одним из ярких проявлений материальной культуры народов Урало-Поволжья являются украшения. Поэтому изучение названий тех или иных видов национальных украшений позволяет выявить общее и специфическое в их номинации у данных этносов, а также выявить ареалы распространения названий и датировать время их появления.

Основная проблема заключается в том, что результаты археологии не всегда дают нам возможность датировать появление украшений у тех или иных народов, которые являются довольно сходными. При этом археологии говорят, что в гунно-сарматских раскопках (II в. до н.э. – V в. н.э.) уже присутствуют украшения [1], а датировать появление украшений у финно-угров является достаточно сложным [2]. Мы предполагаем, что наши данные помогут ответить на этот вопрос.

Что касается истории изучения вопроса, естественно, украшения рассматривались в различных исследованиях археологического, этнографического, лингвистического плана [3-13]. В нашей работе мы, опираясь на эти работы, попробуем найти общее и специфическое в украшениях тюрков и финно-угров Урало-Поволжья и выявить ареалы распространения тех или иных названий.



Карта 1. Карта расселения народов Урало-Поволжья.  
Cart. 1. Map of the settlement of the peoples of the Ural-Volga region.

## 2. Названия украшений

В настоящей работе мы рассмотрим украшения, которые обнаруживаются обычно в погребениях. Это – металлические кольца, серьги, бусы. Внимание также будет уделено такому виду украшений, как налобные повязки, которые, главным образом, изготавливаются на тканевой основе.

### 2.1 Кольцо

Кольца встречаются практически во всех женских погребениях на территории проживания тюркских и финно-угорских племен (см. фото 1 и 2).



Фото 1. Кольцо с прикрепленными на колечках монетами [14].

Photo 1. Ring with coins attached with rings.

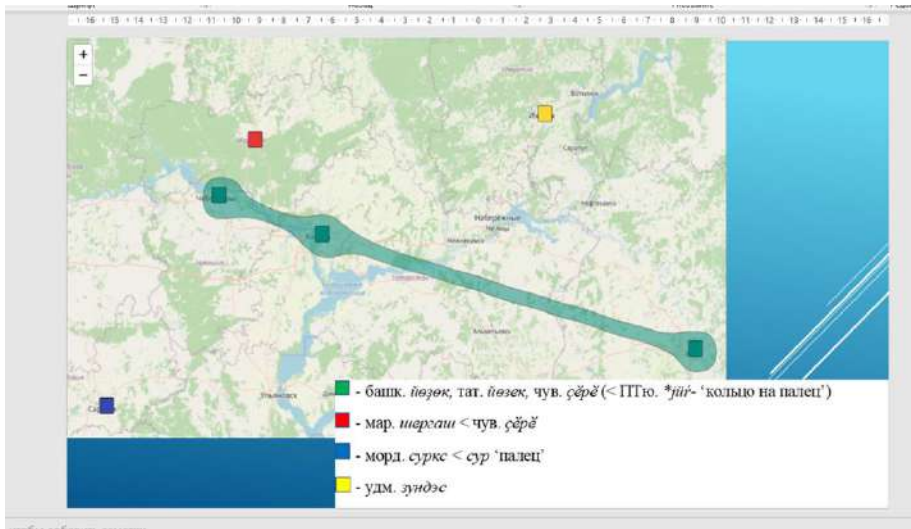


Фото 2. Серебряные кольца со вставками из сердолика [14].

Photo 2. Silver rings with carnelian inserts.

На лингвистической платформе Лингводок [15] мы построили карту названий колец в исследуемых языках. В итоге получилась такая картина: во всех тюркских языках Урало-Поволжья

имеется общее название, которое восходит к пратюркской основе; в марийском языке слово является чувашским заимствованием; в других финно-угорских языках названия имеют разные основы: в мордовских оно представляет производное от слова 'палец', в удмуртском обозначено словом, этимология которой считается неясной (см. карту 2).

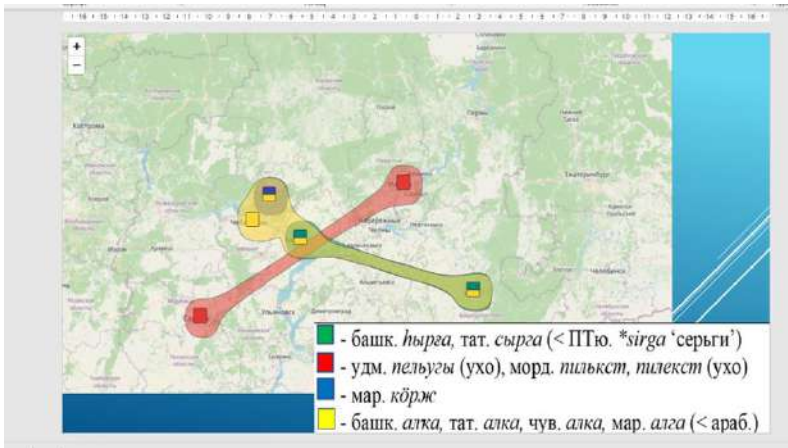


Карта 2. Обозначение кольца в тюркских и финно-угорских языках Урало-Поволжья.  
Cart. 2. Designation of rings in the Turkic and Finno-Ugric languages of the Ural-Volga region.

Эта карта наглядно показывает, что название кольца в тюркских языках представляет праязыковое явление; а в финно-угорских оно является либо заимствованием, либо производным словом.

2.2 Серьги

Серьги также присутствовали в тюркских и финно-угорских погребениях. На карте представлены названия для обозначения серег в исследуемых языках (см. карту 3).



Карта 3. Обозначение серег в тюркских и финно-угорских языках Урало-Поволжья.  
Cart. 3. Designation of earrings in the Turkic and Finno-Ugric languages of the Ural-Volga region.

В кыпчакских тюркских языках встречается название, восходящее к пратюркской основе со значением ‘кольцо’. В марийском языке серьги обозначены словом, встречающимся только в марийском, этимология которого на сегодняшний день является неясной. В удмуртском и мордовских языках имеются два разных названия, которые являются производными от слова ‘ухо’.

Также во всех тюркских и марийском языках встречается арабизм, причем в марийском оно является заимствованием через чувашский язык.

Таким образом, по этой карте можно сделать вывод о том, что древнее название встречается в тюркских языках (хотя не во всех), а заимствования и производные присутствуют в чувашском и финно-угорских языках.

## 2.3 Бусы

Бусы встречались различных видов:

- 1) в виде одинарных или многорядовых низок из различных декоративных материалов, в первую очередь металлических (*фото 3*),
- 2) в виде таких же низок, нашитых на основу из ткани, то есть в виде воротника, который в некотором роде являлся продолжением одежды (*фото 4*),
- 3) простые шейные ожерелья, например, из кораллов или бисера (*фото 5*).

Первые две категории выделены Н.И. Гаген-Торном как бусы, достаточно широко представленные у всех рассматриваемых этносов [5].



*Фото 3. Бусы в виде одинарных низок.*  
*Photo 3. Beads in the form of single strings.*



*Фото 4. Бусы в виде воротника.*  
*Photo 4. Beads in the form of a collar*



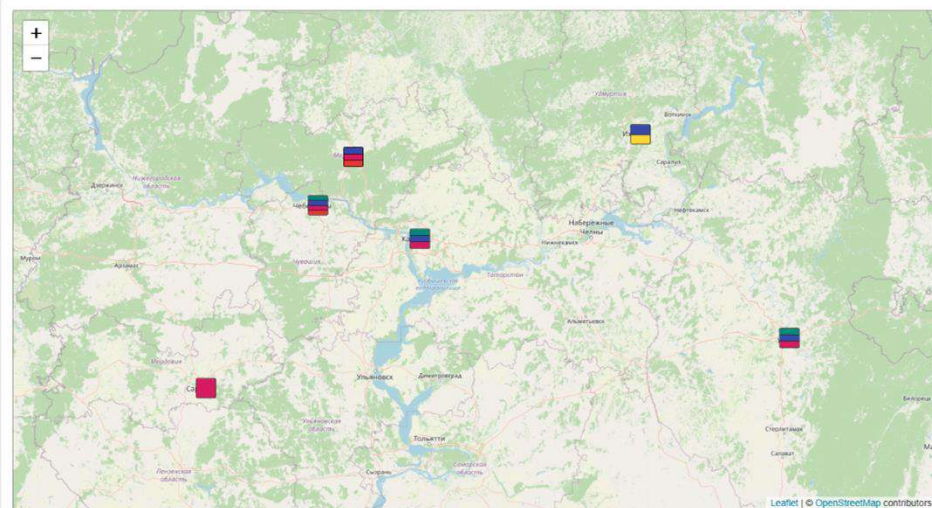
*Фото 5. Ожерелье из бисера.*  
*Photo 5. Beaded necklace.*

В тюркских и финно-угорских языках Урало-Поволжья бусы представлены пятью типами названий:

- 1) в тюркских языках названия восходят к двум пратюркским формам (башк. *мунсак*, тат. *мунчак* < ПТю. \**bōnčok* ‘бусы, маленькие шарики в качестве украшений’, чув. *шăрça* < ПТю. \**siričga* ‘стекло, горный хрусталь’),
- 2) в марийском языке название для бус является чувашским заимствованием ( мар. *шер* < чув. *шăрça*),
- 3) во всех языках, кроме мордовских, присутствует арабское заимствование (башк. *мәрийән*, тат. *мәрәҗән*, чув. *мерчен*, мар. *märzän*, удм. *марзән*),

- 4) в удмуртском встречается слово *весь* со вторичным значением праформы (сем. переход: ППерм. \*wÖš K / \*weš U ‘вид металла’),
- 5) в тюркских и мордовских языках употребляется слово, производное от соматизмов (башк. *муйынак*, тат. *муенчак*, чув. *ум ɟакки* (‘шея’, ‘грудь’), морд. *кирьгаша*, *кърганят* (*кирьга*, *крга* ‘шея, горло’).

При нанесении названий на карту, появляются следующие ареалы их распространения (см. карту 4):



<span style="color: green;">■</span>	башк. <i>мунсак</i> , тат. <i>мунчак</i> (< ПТю. *bönçök ‘бусы, маленькие шарики в качестве украшений’) чув. <i>шърса</i> (< ПТю. *siričga ‘стекло, горный хрусталь’)
<span style="color: red;">■</span>	мар. <i>шер</i> < чув. <i>шърса</i>
<span style="color: blue;">■</span>	башк. <i>мәрйен</i> , тат. <i>мәрҗен</i> , чув. <i>мерчен</i> , мар. <i>мәрзән</i> , удм. <i>марзән</i> (< араб.)
<span style="color: yellow;">■</span>	удм. <i>весь</i> (сем. переход: ППерм. *wÖš K / *weš U ‘вид металла’)
<span style="color: pink;">■</span>	башк. <i>муйынак</i> , тат. <i>муенчак</i> , чув. <i>ум ɟакки</i> (‘шея’, ‘грудь’) морд. <i>кирьгаша</i> , <i>кърганят</i> ( <i>кирьга</i> , <i>крга</i> ‘шея, горло’)

Карта 4. Обозначение бус в тюркских и финно-угорских языках Урало-Поволжья.  
Cart. 4. Designation of beads in the Turkic and Finno-Ugric languages of the Ural-Volga region.

Карта позволяет рассуждать, что в тюркских языках названия для обозначения бус являются древними – обе встречающиеся формы восходят к пратюркскому языку; в финно-угорских нет общей лексемы – названия являются либо заимствованиями, либо производными. Древний характер украшений у тюрков подтверждается данными археологии. Во всех языках, кроме мордовских, присутствует арабское заимствование для обозначения ожерелья из кораллов и бус, что свидетельствует о достоверности этнографических сведений о том, что у мордвы такой тип бус не встречался.

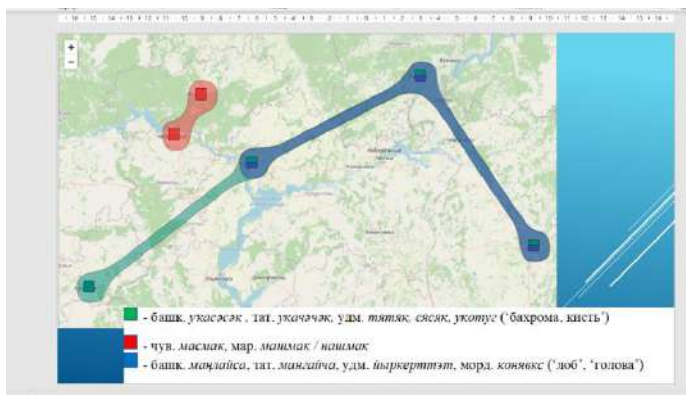
## 2.4 Налобная повязка

Налобная повязка представляет собой полоску ткани, которая украшалась вышивкой, позументом или подвесками из бисера, кораллов и монет. Некоторые этнографы относят налобную повязку к головным уборам, в то же время есть работы, в которых она рассматривается как элемент женских украшений.

Налобная повязка у тюрков и финно-угров в основном является украшением девушек и молодых женщин. Назначение повязки – во-первых, украсить переднюю часть головного

убора, во-вторых, удержат головной убор (например, платок, полотенце, калфак), а также скрыть волосы женщины на висках и на лбу. Например, у чувашей *нашмак* прикреплялся к шарпану, у удмуртов к айшону (конусообразному головному убору) и платку (кышет).

Следует отметить, что налобные повязки могут быть различных видов, в то же время они могут иметь разные названия у разных этнографических групп. Например, в южноудмуртской традиции девушки носили повязки (*укоуг*, *тятяк*), которые состояли из полосы позумента и нашитой бахромы. Налобная повязка женщин (*йыркерттэт*), в отличие от девичьей, украшалась по нижнему краю бусами и монетами. У башкир, татар и марийцев налобники представляют собой в основном ленту, повязку, украшенную монетами, подвесками. Также они украшались бахромой и кистями (соответственно названия имеют компонент 'бахрома, кисть'). У чувашей и удмуртов ткань налобника украшалась вышивкой. Мы можем выделить с точки зрения строения три названия налобников. Оказалось, что они коррелируют с происхождением. Были выявлены ареалы распространения таких налобников (см. карту 5).



Карта 5. Обозначение налобных повязок в тюркских и финно-угорских языках Урало-Поволжья.  
Cart. 5. Designation of beads in the Turkic and Finno-Ugric languages of the Ural-Volga region.

Итак, с точки зрения строения можно выделить три вида налобников. И они, оказалось, коррелируют с названием (названия с компонентом 'бахрома, кисть', название с компонентом 'лоб, голова', названия масмак / машмак / нашмак у марийцев и чувашей, применяемые относительно налобников с вышивкой).

### 3. Заключение

Таким образом, нами были выявлены следующие особенности в названиях украшений в тюркских и финно-угорских языках Урало-Поволжья.

- Во-первых, оказалось, названия для обозначения кольца, серег и бус в тюркских языках являются более древними и восходят к праформам. В финно-угорских они являются либо заимствованиями, либо производными от других слов. Данный вывод подтверждает исследования археологов, которые относят украшения тюрков к гунно-сарматской эпохе.
- Во-вторых, названия подтверждают этнографические данные, например, арабское заимствование (*маржен*) для обозначения бус из кораллов встречается в тех языках, у носителей которых этот тип бус встречается.
- В-третьих, названия налобных повязок соответствуют их типам и функциям, в которых они встречаются.

То есть, на основе лингвистических данных нам удалось подтвердить данные археологических и этнографических исследований, в некотором смысле даже датировать происхождение названий.

## Список литературы / References

- [1]. Трифанова С.В. Украшения населения Саяно-Алтая гунно-сарматской эпохи. Дисс. ... канд. ист. наук. 2006. 288 с.
- [2]. Хайруллина О.Ф. Женские шейно-нагрудные украшения финно-угорских и тюркских народов Урало-Поволжья как источник реконструкции археологического костюма. Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук, 1, 2022, стр. 18-28. DOI: 10.19110/1994-5655-2022-1-18-28.
- [3]. Белицер В.Н. Народная одежда удмуртов (материалы к этногенезу). М., 1951.
- [4]. Белицер В.Н. Народная одежда мордвы. М., 1973.
- [5]. Гаген-Торн Н. Женская одежда народов Поволжья (материалы к этногенезу). Чебоксары, 1960.
- [6]. Дыбо А.В., Норманская Ю.В. Тюркские заимствования в финно-угорских названиях одежды. Российская тюркология, 2, 2013, стр. 42-60.
- [7]. Ключева М.А. Марийская одежда как семейная реликвия (этнографические и лингвистические полевые материалы 2013 г.). Урало-алтайские исследования, 3, 2013, стр. 24-57.
- [8]. Молотова Т.Л. Марийский народный костюм. Йошкар-Ола, 1992.
- [9]. Никитина Т.Б. Украшения из марийских могильников IX–XI вв. как источник для изучения этнокультурных процессов (к методике изучения). Научный Татарстан, 4, 2010, стр. 85-91.
- [10]. Николаев В.В., Иванов-Орков Г.Н., Иванов В.П. Чувашский костюм от древности до современности. Оренбург, 2002.
- [11]. Суслова С.В. Татарский костюм. Историко-этнологическое исследование. Казань, 2018.
- [12]. Шитова С.Н. Башкирская народная одежда. Уфа, 1995.
- [13]. Рахматуллина З.Я., Хусаинова Г.Р. Традиционные украшения башкирских женщин: этнокультурный взгляд из XXI века. Уфимский археологический вестник, 2, 2023, стр. 320-330. DOI: <https://doi.org/10.31833/uav/2023.23.2.010>.
- [14]. Искусство башкир. Традиционные художественные ремесла / Под ред. С.Н. Шитовой. Уфа, 2007.
- [15]. Платформа Лингводок, <https://lingvodoc.ispras.ru> (дата обращения 28.01.2025).

## Информация об авторах / Information about authors

Римма Талгатовна МУРАТОВА – кандидат филологических наук, старший научный сотрудник отдела языкознания Ордена Знак Почета Института истории, языка и литературы Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук. Сфера научных интересов: башкирский язык, тюркские языки, языки Урало-Поволжья, лексикология, этнолингвистика, компьютерная лингвистика, лингвогеография.

Rimma Talgatovna MURATOVA – Cand. Sci. (Philology), Senior Researcher, Department of Linguistics, Order of the Badge of Honor, Institute of History, Language and Literature, Ufa Federal Research Center, Russian Academy of Sciences. Area of scientific interests: Bashkir language, Turkic languages, languages of the Ural-Volga region, lexicology, ethnolinguistics, computer linguistics, linguistic geography.

DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(2)-19



# The Position of the Komi-Yaz'va Idiom in the Komi Languages Based on Phonetic, Lexical, and Morphological Features: Evidence from the LingvoDoc Platform

*O.N. Bazhenova, ORCID: 0000-0002-5666-2260 <bazhenova-olga2011@mail.ru>*

*"Linguistic platforms" laboratory,  
Ivannikov Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences,  
25, Alexander Solzhenitsyn st., Moscow, 109004, Russia.*

**Abstract.** The present article is devoted to determining the place of the Komi-Yaz'va idiom in the Komi dialect continuum. To this end, 8 dictionaries were analyzed using the programs of the linguistic platform LingvoDoc (search for cognates of languages / dialects, analysis of cognates of languages / dialects, glottochronology of languages / dialects, degree of morphological closeness between dialects / languages, and composite distance between languages). The dictionaries analyzed were Komi-Yaz'va, Upper Kama, Upper Sysola, Mysovsky and Kudymkarsky dialects. The comparative analysis of these dictionaries revealed that, in terms of phonetic, lexical, and morphological features, the Komi-Yaz'va idiom is significantly divergent from other Komi dialects. The degree of similarity with these dialects ranges from 86 to 88%, indicating that the Komi-Yaz'va is now considered a distinct language that has retained Proto-Komi language's features.

**Keywords:** Komi-Yaz'va; Komi-Zyrian; Komi-Permyak; audio dictionaries; morphological dictionaries; glottochronology; classification of languages and dialects; LingvoDoc.

**For citation:** Bazhenova O.N. The Position of the Komi-Yaz'va Idiom in the Komi Languages Based on Phonetic, Lexical, and Morphological Features: Evidence from the LingvoDoc Platform. Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS, vol. 37, issue 2, 2025, pp. 255-262. DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(2)-19.

**Acknowledgements.** The research was funded by RSF № 25-78-20002 'Capabilities of Artificial Intelligence for Comparative-Historical Study of Low-Resource Languages of the Peoples of the Russian Federation'. The author would like to express their gratitude to Ju. V. Normanskaya for her support at all stages of the study.

## Место коми-язьвинского в классификации языков коми на основании фонетических, лексических и морфологических особенностей с помощью программ платформы ЛингвоДок

О.Н. Баженова, ORCID: 0000-0002-5666-2260 <bazhenova-olga2011@mail.ru>

Институт системного программирования им. В.П. Иванникова РАН,  
Лаборатория 16.2 "Лингвистические платформы",  
Россия, 109004, г. Москва, ул. А. Солженицына, д. 25.

**Аннотация.** Статья посвящена определению места коми-язьвинского идиома в коми диалектном континууме. Для этой цели на лингвистической платформе LingvoDoc было обработано 8 коми словарей (аудиословари коми-язьвинского, верхнекамского, верхнесысольского, мысовского и кудымкарского диалектов, а также морфологические словари коми-язьвинского, коми-зырянского и коми-пермяцкого идиомов). Благодаря применению инструментов «поиск когнатов языков/диалектов», «анализ когнатов языков/диалектов», «глотохронология языков/диалектов», «степень морфологической близости между диалектами/языками», «суммарный коэффициент различий между языками» было выявлено, что по фонетическим, лексическим и морфологическим признакам коми-язьвинский говор значительно отличается от других коми диалектов. Степень сходства с этими диалектами составляет от 86 до 88%, что свидетельствует о том, что коми-язьвинский в настоящее время можно рассматривать как отдельный язык, сохранивший черты пракоми языка.

**Ключевые слова:** коми-язьвинский; коми-зырянский; коми-пермяцкий; аудиословари; морфологические словари; глотохронология; классификация языков и диалектов; LingvoDoc.

**Для цитирования:** Баженова О. Н. Место коми-язьвинского в классификации языков коми на основании фонетических, лексических и морфологических особенностей с помощью программ платформы ЛингвоДок. Труды ИСП РАН, том 37, вып. 2, 2025 г., стр. 255–262 (на английском языке). DOI: 10.15514/ISPRAS–2025–37(2)–19.

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке гранта № 25-78-20002 («Возможности искусственного интеллекта для сравнительно-исторического изучения малоресурсных языков народов РФ»). Автор выражает благодарность Юлии Викторовне Норманской за помощь на всех этапах исследования.

### 1. Introduction

The Komi-Yaz'va idiom is spoken by an ethnolocal group residing in the villages of Upper Yaz'va, Bychina, Parshakova, Arefina, Antipina, Van'kova, Talavol, and other settlements of the Krasnovishersky District in the north-eastern part of Perm' Krai (Russian Federation). A significant population of Russians living along the Vishera and Kama rivers creates a geographical and linguistic separation between the Komi-Yaz'va and the rest of the Komi dialect continuum. From the All-Union census of 1926 to the All-Russian census of 2010, the population of Komi-Yaz'vinians decreased by more than sevenfold (from 3,163 to 436) [1]. According to the observations of R. Bartens, at the turn of the millennium, only a few dozen people of the older generation spoke Komi-Yaz'va [2]. This information is confirmed by the expedition data of R. V. Gaidamashko and Ju. A. Shkuratok, who classified the Komi-Yaz'va idiom as a language on the verge of extinction in terms of viability on the UNESCO scale [1].

### 2. Background of the problem

The question of the status of the Komi-Yaz'va idiom has been ambiguously resolved throughout its nearly 140-year history of study. Researchers consider it as a dialect [3-6] or as a distinct language [7-10]. Finnish linguist R. Bartens uses the term "Jažvan Komi päämurre" 'the Jažva's Komi main dialect', along with Komi-Zyrian and Komi-Permyak [2].

The isolation from other Komi dialects played a pivotal role in the formation and consolidation of distinctive linguistic characteristics within the Komi-Yaz'va idiom, particularly within the domain of phonetics. V. I. Lytkin identifies four primary distinctions in the vocalism system of the Komi-Yaz'va dialect:

- 1) the unique vowel phonemes not found in other Komi dialects (ə, ʏ);
- 2) distinctive features in the pronunciation of certain phonemes, such as the labial pronunciation of non-rear vowels;
- 3) numerous specific regularities in the domain of vowels, including the absence of labialized vowels in suffixal syllables;
- 4) a distinctive system of stress (the dependence of the quality of vowels on the place they occupy in relation to stress) [5].

The aforementioned peculiarities of the vocalism of the Komi-Yaz'va idiom led V. I. Lytkin to conclude that this dialect stands further from the Komi-Permyak and Komi-Zyrian literary languages than the latter from each other [5].

Nowadays, the linguistic platform LingvoDoc has possibilities for the calculation of the proximity between languages and dialects based on their phonetic, lexical, and morphological characteristics. A study conducted by Yu. V. Normanskaya in 2020 examined the phonetic proximity of the Komi-Yaz'va idiom to the Komi-Permyak and Komi-Zyrian dialects. The research revealed that the Komi-Yaz'va idiom is significantly different from the modern dialects of the Komi-Zyrian and Komi-Permyak languages: "Consequently, Komi-Yaz'va is currently classified as a distinct language, exhibiting a closer resemblance to the old Komi-Permyak dictionaries recorded by P. S. Pallas and N. Ovchinnikov in the 18th century" [11].

With regard to the lexicon and morphology of the Komi-Yaz'va idiom, V. I. Lytkin asserts that it exhibits significant morphological and lexical affinities with Komi-Permyak dialects, and to a lesser extent with the Komi-Zyrian dialects [5].

### 3. Materials and methods

The objective of the present study is to use the tools of the LingvoDoc platform to ascertain the position of the Komi-Yaz'va idiom in the classification of Komi languages based on phonetic, lexical, and morphological features.

In the initial phase of the study, we created morphological dictionaries for the Komi-Yaz'va, the literary Komi-Permyak, and the literary Komi-Zyrian languages. These dictionaries were based on V. I. Lytkin's monograph [5], and the manual compiled by A. S. Lobanova [8]; for the Komi-Permyak language we used the textbooks [12], [13], and G. A. Nekrasova's monograph [14]. The morphological dictionary of the Komi-Zyrian language was compiled on the basis of the monograph [15].

Subsequently, the morphological dictionaries were uploaded to the LingvoDoc platform and connected via the Cognates field by etymological links (Fig. 1).

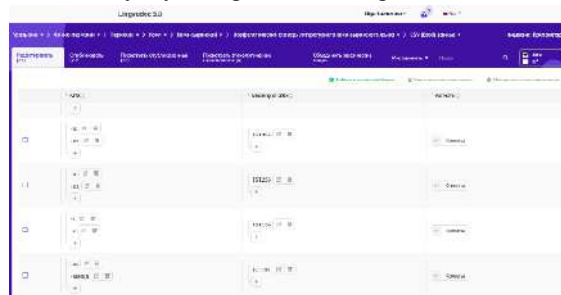


Fig. 1. A fragment of the morphological dictionary of the literary Komi-Zyrian language on [lingvodoc.ispras.ru](http://lingvodoc.ispras.ru).

Then, the “Degree of Morphological Closeness of Languages” option was used to compare all etymologically related affixes. The percentage of matches between the lists of idioms was subsequently calculated. This process yielded a summary table that contained all related and unique affixes (Fig. 2).

4. Results

The results of the automatic calculation of the degree of morphological closeness of the Komi-Yaz’va idiom to the Komi-Zyrian and Komi-Permyak literary languages revealed, that in cases where several languages have an affix with the same meaning in the system of word and form formation, the percentage of coincidence between the above idioms is 100% (Fig. 2).

LingvoDoc presents all related morphological indicators in a table, in which affixes are arranged in alphabetical order (Fig. 3).

	1. Морфологический словарь коми-язьвинского идиома	2. Морфологический словарь литературного коми-зырянского языка	3. Морфологический словарь литературного коми-пермяцкого языка
1	n/a	-0.00 (100%)	-0.00 (100%)
2	-0.00 (100%)	n/a	-0.00 (100%)
3	-0.00 (100%)	-0.00 (100%)	n/a

Fig. 2. Percentage of matches among etymologically related affixes in the morphological dictionaries analyzed.

1. Морфологический словарь коми-язьвинского идиома	2. Морфологический словарь литературного коми-пермяцкого языка	3. Морфологический словарь литературного коми-зырянского языка
-зик; -зиг ( COMP )	-жык ( COMP )	-джык ( COMP )
-ө ( ACC )	-ӧ ( ACC )	-ӧ ( ACC )
-ө ( ILL )	-ӧ ( ILL )	-ӧ ( ILL )
-ө ( IMP.2PL )	-ӧ ( IMP.2PL )	-ӧй ( IMP.2PL )
-ө ( POSS.1SG )	-ӧ ( POSS.1SG )	-ӧй ( POSS.1SG )
-ө ( PRS.3SG )	-ӧ ( PRS.3SG )	-ӧ ( PRS.3SG )
-өз' ( TERM )	-ӧдз ( TERM )	-ӧдз ( TERM )
-өд ( ORD )	-ӧт ( ORD )	-ӧд ( ORD )
-өм ( PTCP.PST )	-ӧм ( PTCP.PST )	-ӧма ( PTCP.PST )
-өмен ( CVB.SIM )	-ӧмӧн ( CVB.SIM )	-ӧмӧн ( CVB.SIM )
-өма ( PST2 )	-ӧм ( PST2 )	-ӧма ( PST2 )
-өн ( INE )	-ын ( INE )	-ын ( INE )
-өнөс ( PRS.3PL )	-ӧны ( PRS.3PL )	-ӧны ( PRS.3PL )
-өс ( ACC )	-ӧс ( ACC )	-ӧс ( ACC )
-өсь ( PL (прил, числ) )	-ӧсь ( PL (прил, числ) )	-ӧсь ( PL (прил, числ) )
-өт ( PROL )	-ӧт ( PROL )	-ӧд; -ті ( PROL )
-өшт ( ATTEN )	-ышт ( ATTEN )	-ышт ( ATTEN )
-а ( FUT.1SG )	-а ( FUT.1SG )	-а ( FUT.1SG )
-а ( ILL )	-а ( ILL )	-а ( ILL )
-а ( INE )	-а ( INE )	-а ( INE )
-а ( PRS.1SG )	-а ( PRS.1SG )	-а ( PRS.1SG )

Fig.3. Fragment of a comparative morphological table of Komi idioms, automatically generated on the LingvoDoc platform.

4.1 Phonetics

As the comparative table on lingvodoc.ispras.ru shows, Komi-Yaz’va is more similar to Komi-Permyak (13 positions) than to Komi-Zyrian (1 position) in the phonetic arrangement of affixes.

In contrast to the phonetic forms observed in Komi-Zyrian, Komi-Yaz'va and Komi-Permyak exhibit distinctive characteristics, particularly the presence of phonetic forms with a deaf consonant:

KY. *-amə*, KP. *-amö*, KZ. *-ađ* 'PRS / FUT.2PL',  
KY. *-umə*, KP. *-umö*, KZ. *-uđ* 'PST.2PL',  
KY. *-kətm*, KP. *-kötm*, KZ. *-köđ* 'COM',  
KY. *-num*, KP. *-nytm*, KZ. *-nyđ* 'POSS.2PL',  
KY. *-um*, KP. *-bim*, KZ. *-biđ* 'POSS.2SG',  
KY. *-k*, KP. *-uk*, KZ. *-už* 'CVB.SIM',  
KY. *-ətm*, KP. *-ötm*, KZ. *-öđ* 'ORD',  
KY. *-ətm*, KP. *-ötm*, KZ. *-öđ* 'PROL'.

## 4.2 Morphology

While the Komi-Zyrian and Komi-Permyak dialects have witnessed the emergence of a substantial group of approximate local cases, resulting from the combination of the suffix of the approximative (*-лань*) with suffixes of other local cases, the Komi-Yaz'va dialect exhibits an such cases are absent in its texts. A similar trend of reduced usage of the approximative and substitution by afterwords has been observed in the Vym' and Izhma dialects of the Komi-Zyrian language. According to G. A. Nekrasova's study, the approximative is considered to be a highly infrequent component of the modern Udmurt literary language, with its semantics typically conveyed through adverbs and afterwords [14].

Contrary to the Komi-Permyak dialects, Komi-Yaz'va and Komi-Zyrian languages do not exhibit morphologized postpositions with *-выв-* and *-дін-* bases. The increase in the number of cases resulting from the agglutination of afterwords with the base *-дін-* 'at, near' is also present in certain northern dialects of the Udmurt language [16, 17]. As demonstrated in G. A. Nekrasova's research, the surface-local and approximate-local cases of Komi-Permyak are the result of an innovation that occurred between the late 19th and mid-20th century [18].

The Komi-Permyak language is distinguished by the presence of the comparative (*-ся*), which is also recorded in the southern dialects of the Komi-Zyrian language. In Finno-Ugric studies, the comparative is considered to be a southern Komi innovation [14]. In the Komi-Yaz'va idiom, there is no separate case indicator for expressing comparison; most likely, this meaning is conveyed by means of the elative (as in Komi-Zyrian) and with afterword *кин'а*: *сотн'а кин'а унажик мөнти* '(I) paid more than a hundred' [5].

In the Komi-Permyak language there is a typologically uncommon altiterminative case (*-ви*) employed to denote the vertical boundary. G. A. Nekrasova posits that the suffix *-ви* emerged as a consequence of the apocopy of two subsequent words: *выын* 'at' and *виö* 'to' [14].

## 4.3 Glottochronology

In order to facilitate the analysis of differences in the basic vocabulary of languages and dialects, the LingvoDoc platform provides a tool "Glottochronological analysis of dialects / languages". It can be used for any set of languages with dictionaries containing more than 50 words from M. Swadesh's word list [19]. This tool is based on a formula developed by S. A. Starostin [20], which has been incorporated into the LingvoDoc program for calculating the proximity of languages and dialects. The algorithm first removes borrowings from a 100-word list of basic vocabulary, then connects related words by etymological links and calculates the percentage of matches between lists of idioms [11].

The glottochronological analysis was conducted using materials from five Komi audio dictionaries: the Komi-Yaz'va idiom, the Upper Kama dialect, the Upper Sysola dialect of the Komi-Zyrian language, the Mysovsky and the Kudymkar dialects of the Komi-Permyak language. Finally, a summary table was generated, which displays the percentage of common lexicon in the idioms under consideration (Table 1).

Table 1. Percentage of shared basic vocabulary among Komi idioms..

	KY.	Mys.	Kud.	UK.	US.
KY.	---	95%	96%	90%	91%
Mys.	95%	---	98%	92%	95%
Kud.	96%	98%	---	96%	95%
UK.	90%	92%	96%	---	92%
US.	91%	95%	95%	92%	---

The Komi-Yaz'va idiom exhibits the highest degree of lexical similarity with the dialects of **the Komi-Permyak language**, reaching 95–96% (in bold in Table I). Conversely, it exhibits the lowest degree of similarity with the Upper Kama dialect, at 90%, which is due to the fact that the latter contains some words recorded also in the Komi-Zyrian dialects, e.g.: ‘white’: UK., US., LL. *jeđzud* < ComP. \**jež-* ‘unripe, white, green’ [21]; KY. *teótekam*, Mys. *teótekam*, Kud. *teótekom* < ComK. \**čqčkem* [21]; ‘mountain’: UK., LL. *teoj* < ComK. \**čqj* [21]; KY. *keras*, Mys., Kud., US. *keras* < *kep-* ‘cut down (wood)’ [21].

Despite the fact that the majority of lexemes from the 100-word list in the Komi-Yaz'va idiom have correspondences in Komi-Permyak dialects (95–96%), it also contains word forms that are not recorded in any other dictionaries on Komi dialects, but have parallels in the Udmurtian language: KY. *dol* ‘all’, Udm. *долак* ‘all’ [22]; KY. *dalst* ‘rolled road’, Udm. *дол вольит сюрес* ‘rolled road’ [22]. The verb *věpna* ‘to say’ used in the Komi-Yaz'va idiom is also recorded in the old Permian monuments (*vepnə*) and in the Izhma dialect of the Komi-Zyrian language (*вöйпны*) [21]. In other Komi dialects, this word has been supplanted by the verb *шуны* ‘to say’.

4.4 Composite distance between languages

The calculation of phonetic, morphological, and lexical proximity between the Komi idioms was performed by “Get composite distance between languages” tool at LingvoDoc. The final matrix (Table 2) illustrates the extent of Komi-Yaz'va deviation from other Komi dialects, with a range of **86% to 88%** similarity. Notably, the Upper Kama dialect, which is also isolated, exhibits the highest degree of similarity with the Upper Sysola dialect of the Komi-Zyrian language, reaching 95% similarity.

Table 2. Matrix of inter-dialectal similarity among Komi dialects in terms of phonetic, lexical, and morphological features.

	KY.	UK.	Mys.	Kud.	US.
KY.	---	87%	88%	86%	88%
UK.	87%	hh---	93%	94%	95%
Mys.	88%	93%	---	97%	95%
Kud.	86%	94%	97%	---	95%
US.	88%	95%	95%	95%	---

5. Conclusions

After processing 8 dictionaries of the Komi language on LingvoDoc, it was determined that the Komi-Yaz'va idiom exhibits significant differences from other Komi dialects in terms of phonetic, lexical, and morphological peculiarities (86–88% percent of the similarity). Concurrently, the percentage of

similarity between the other Komi dialects under consideration ranges from 93% to 97%. These figures permit the conclusion that Komi-Yaz'va can be classified as a distinct language that has preserved archaic features of the Proto-Komi language.

## Abbreviations

- ComK. – Common Komi
- ComP. – Common Permian
- Kud. – Kudymkar dialect of the Komi-Permyak language
- KY – the Komi-Yaz'va idiom
- LL – Luza-Letka dialect of the Komi-Zyrian language
- Mys. – Mysovsky dialect of the Komi-Permyak language
- PK – Komi-Permyak dialects
- Udm. – Udmurtian
- UK – the Upper Kama dialect
- US – the Upper Sysola dialect of the Komi-Zyrian language

## References

- [1]. R. V. Gaydamashko, Yu. A. Shkuratok, "Modern state of the Komi-Yaz'va language", *Yearbook of Finno-Ugric Studies*, no. 4, pp. 576–590, 2019.
- [2]. R. Bartens, "Permiläisten kielten rakenne ja kehitys", Helsinki, 2000.
- [3]. A. Genetz, "Ost-permische Sprachstudien". Helsingfors, 1897.
- [4]. M. Kövesi, "A permi nyelvek ősi képzői", Budapest, 1965.
- [5]. V. I. Lytkin, "The Komi-Yaz'va dialect", Moscow, 1961.
- [6]. *Fundamentals of Finno-Ugric linguistics: Mari, Perm and Ugrian languages*, Moscow, 1976.
- [7]. V. Kel'makov, "Experience of creating a written language for the Komi-Yazvinians (A. L. Parshakova, Komi-Yazvin Primer. Educational edition, Perm Book publ. house, 2003. 135 p.)", *Linguistica Uralica*, vol. XL, no. 2, pp. 135–147, 2004.
- [8]. *Materials on the study of the case system of the Komi-Yaz'va language*. Compiled by A.S. Lobanova, Perm', 2005.
- [9]. V. V. Napol'skikh, "Introduction to historical Uralistics", Izhevsk, 1997.
- [10]. G. N. Chagin, "Komi-Yazvin Permyaks are ancient people of the Northern Urals", Krasnovishersk; Solikamsk, 2002.
- [11]. Yu. V. Normanskaya, "Is the Komi-Yaz'va a dialect of Komi-Permyak or a separate language?", *Yearbook of Finno-Ugric Studies*, vol. 14, no. 4, pp. 628–641, 2020.
- [12]. *Komi-Permyak language. Introduction, phonetics, lexicon and morphology: textbook for universities*, Kudymkar, 1962.
- [13]. E. A. Tsypanov, "Komi-Permyak literary language", Syktyvkar, 1999.
- [14]. G. A. Nekrasova, "The category of noun case in Permian languages", Syktyvkar, 2023.
- [15]. *Modern Komi language. Morphology*, edited by G.V. Fedyunova. Syktyvkar, 2000.
- [16]. S. A. Maksimov, "About secondary spatial cases in the Udmurt language", *Problems of Udmurt and Finno-Ugric philology: Interuniversity collection of scientific works*, Izhevsk, pp. 193–208, 1999.
- [17]. N. M. Lyukina, "Phonetic and morphological peculiarities of the language of Lekminsky and Yundinsky Besermyans", Izhevsk, 2016.
- [18]. G. A. Nekrasova, "Changes in the case system of the Komi-Permyak language of the XIX-XX centuries (based on written sources)", *Yearbook of Finno-Ugric Studies*, vol. 10, no. 3, pp. 7–16, 2016.
- [19]. A. Kassian, G. Starostin, A. Dybo and V. Chernov, "The Swadesh wordlist. An attempt at semantic specification", *Journal of Language Relationship*, no. 4, pp. 46–89, 2010.
- [20]. S. A. Starostin, "Comparative-historical linguistics and lexicostatistics", *Linguistic reconstruction and ancient history of the East*, P. 1, pp. 3–39, 1989.
- [21]. V. I. Lytkin and E. S. Gulyaev, "Brief etymological dictionary of the Komi language", Syktyvkar, 1999.
- [22]. *Udmurt-Russian dictionary*, edited by L.E. Kirillova. Izhevsk, 2008.

## **Информация об авторах / Information about authors**

Ольга Николаевна БАЖЕНОВА – кандидат филологических наук, младший научный сотрудник Лаборатории 16.2 «Лингвистические платформы» Института системного программирования РАН, научный сотрудник сектора языка Института языка, литературы и истории ФИЦ Коми научного центра УрО РАН. Сфера научных интересов: коми диалекты, компаративистика, история коми-зырянского литературного языка, стилистика коми языка.

Olga Nikolajevna BAZHENOVA – Cand. Sci. (Philology), junior researcher of Laboratory 16.2 “Linguistic Platforms” of the Institute of System Programming of the Russian Academy of Sciences, researcher of the Language Department of the Institute of Language, Literature and History of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Research interests: Komi dialects, comparative linguistics, history of the Komi-Zyrian literary language, stylistics of the Komi language.



## Архитектура системы сбора и извлечения информации для интеллектуальной поисково-аналитической системы

<sup>1,2</sup> Д.С. Серенко, ORCID: 0009-0003-6676-7255 <serenko.d.s@yandex.ru>

<sup>1,2</sup> Е.Д. Терентьев, ORCID: 0009-0003-6797-9292 <eterentevd@yandex.ru>

<sup>2</sup> Д.В. Зубарев, ORCID: 0000-0002-9687-6650 <zubarev@isa.ru>

<sup>2,3,4</sup> И.В. Соченков, ORCID: 0000-0003-3113-3765 <sochenkov@isa.ru>

<sup>1</sup> Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы,  
Россия, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6.

<sup>2</sup> Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН,  
Россия, 119333, г. Москва, ул. Вавилова, д. 44/2.

<sup>3</sup> Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН,  
Россия, 127051, г. Москва, Большой Каретный пер., д. 19 стр. 1.

<sup>4</sup> Институт системного программирования им. В.П. Иванникова РАН,  
Россия, 109004, г. Москва, ул. Александра Солженицына, д. 25.

**Аннотация.** Данные из интернета служат основой для решения широкого круга задач, от информационного поиска до аналитической обработки. Рост объемов данных повышает важность эффективного извлечения описательных сведений о документах (метаданные – заголовки, имена авторов, даты публикации и так далее) с научных и образовательных сайтов (веб-ресурсов). Традиционные методы сбора и извлечения информации на основе статических шаблонов малоэффективны при обработке веб-страниц с динамически формируемым содержанием. В работе предложена архитектура адаптивной системы сбора и извлечения информации, сочетающая стандартные методы извлечения данных с технологиями машинного обучения. Система имеет модульную структуру, включающую подсистемы управления заданиями, мониторинга и журналирования, краулинга (робота сбора информации), управления ссылками, извлечения метаданных. Подсистема краулинга обрабатывает как статически, так и динамически формируемое содержание через имитацию работы прикладного программного обеспечения для просмотра веб-страниц. Для извлечения метаданных применяется комбинированный подход, совмещающий структурированные правила и машинное обучение. Эксперименты показали успешное извлечение метаданных из различных веб-ресурсов, включая страницы с динамически формируемым содержанием и сложными структурами. Система обладает высокой точностью и устойчивостью к изменениям форматов данных, при этом строго соблюдаются этические нормы сбора данных, включая обязательное выполнение инструкций и применение разумных интервалов между запросами.

**Ключевые слова:** интеллектуальные поисково-аналитические системы; система сбора и извлечения информации; извлечение метаданных; веб-краулинг; динамический контент; машинное обучение; автоматизация сбора данных; браузерная эмуляция; MarkupLM.

**Для цитирования:** Серенко Д.С., Терентьев Е.Д., Зубарев Д.В., Соченков И.В. Архитектура системы сбора и извлечения информации для интеллектуальной поисково-аналитической системы. Труды ИСП РАН, том 37, вып. 2, 2025 г., стр. 263–280. DOI: 10.15514/ISPRAS–2025–37(2)–20.

## Architecture of an Information Collection and Extraction System for an Intelligent Search and Analytical Platform

<sup>1,2</sup> D.S. Serenko, ORCID: 0009-0003-6676-7255 <serenko.d.s@yandex.ru>

<sup>1,2</sup> E.D. Terentev, ORCID: 0009-0003-6797-9292 <eterentevd@yandex.ru>

<sup>2</sup> D.V. Zubarev, ORCID: 0000-0002-9687-6650 <zubarev@isa.ru>

<sup>2,3,4</sup> I.V. Sochenkov, ORCID: 0000-0003-3113-3765 <sochenkov@isa.ru>

<sup>1</sup> RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russia.

<sup>2</sup> Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences, 44, build. 2, Vavilova St, Moscow, 119333, Russia.

<sup>3</sup> A. A. Kharkevich Institute of Information Transmission Problems of the RAS, 19, build.1, Bolshoi Karetny per., Moscow, 127051, Russia.

<sup>4</sup> V.P. Ivannikov Institute for System Programming of the Russian Academy of Science, 25, Alexander Solzhenitsyn St., Moscow, 109004, Russia.

**Abstract.** Internet data serves as the foundation for a wide range of tasks, from information retrieval to analytical processing. With the rapid growth of data volumes, efficient metadata extraction from dynamic web resources has become critically important. Traditional information collection and extraction methods based on static templates are largely ineffective when processing interactive content. This paper presents the architecture of an adaptive information collection and extraction system that integrates standard data extraction techniques with machine learning technologies. The system has a modular structure comprising the following subsystems: task management, monitoring and logging, crawling, link management, and metadata extraction. The crawling subsystem processes both static and dynamic content through browser emulation. A hybrid approach combining structured rules and machine learning is used for metadata extraction. Experimental results demonstrated successful metadata extraction from various web resources, including pages with dynamic content and complex structures. The system exhibited high accuracy and resilience to changes in data formats while strictly adhering to ethical data collection standards, such as compliance with robots.txt directives and applying reasonable request intervals. Thus, the proposed solution represents a significant step toward the development of universal data collection and extraction systems for modern information environments. The developed software tools have been utilized in populating the index databases of the Neopoisk system.

**Keywords:** intelligent search and analytical systems; information collection and extraction system; metadata extraction; web crawling; dynamic content; machine learning; automated data collection; browser emulation; MarkupLM.

**For citation:** Serenko D.S., Terentev E.D., Zubarev D.V., Sochenkov I.V. Architecture of an information collection and extraction system for an intelligent search and analytical platform. *Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS*, vol. 37, issue 2, 2025, pp. 263-280 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(2)-20.

### 1. Введение

В современном информационном пространстве, характеризующемся стремительным ростом объёмов данных [1], интеллектуальные поисково-аналитические системы играют ключевую роль в предоставлении пользователям структурированной и релевантной информации. Эти системы не только обеспечивают доступ к данным, но и способствуют их глубокой аналитической обработке, что становится особенно важным при работе с динамическими и интерактивными веб-ресурсами [2].

Одной из ключевых задач при разработке таких систем является эффективное извлечение сведений о публикациях из различных источников, включая веб-страницы со сложной структурой, динамически обновляемыми разделами и подгрузкой данных без перезагрузки страницы. Традиционные методы сбора и извлечения информации, базирующиеся на статических шаблонах (элементы навигации по структуре документа: CSS-selectors, язык запросов XPath для навигации по XML-документам), часто сталкиваются с ограничениями

при обработке динамических веб-ресурсов, что требует ручной адаптации под каждый конкретный ресурс [3]. Это приводит к значительным временным и трудозатратным издержкам.

Для решения данной проблемы могут применяться методы машинного обучения [4]. Их использование требует разработки архитектуры, обеспечивающей универсальность и гибкость при сборе и извлечении метаданных. В данной работе предложена такая архитектура, объединяющая стандартные методы обработки данных с технологиями машинного обучения. Основной акцент сделан на адаптивность системы, её способность автоматически подстраиваться под особенности взаимодействия с различными веб-ресурсами для эффективного обхода ограничений и извлечения данных.

Ключевым элементом предложенной архитектуры является модульная структура, где каждая функциональная часть системы отвечает за отдельные этапы сбора, извлечения и сохранения метаданных. Такой подход обеспечивает масштабируемость и расширяемость системы, позволяя легко внедрять новые технологии и алгоритмы. В рамках настраиваемого задания, формируемого пользователем, предусмотрена возможность указания сценариев интерактивного взаимодействия подсистемы по сбору данных с динамическими элементами веб-страниц. Для обработки и извлечения метаданных предусмотрена возможность использования методов машинного обучения, которые позволяют автоматизировать извлечение данных и минимизировать необходимость ручной настройки.

Интеграция моделей машинного обучения с традиционными методами извлечения данных предоставляет пользователю возможность гибкого выбора оптимальных инструментов для решения конкретных задач. Это может быть как использование обученной модели для автоматического извлечения метаданных, так и ручное задание правил для обработки специфичных структур [5].

Таким образом, разработка и реализация предложенной архитектуры позволяют обеспечить не только высокую точность и эффективность сбора и извлечения метаданных, но и адаптивность системы к изменениям информационной среды. Это делает её актуальным и востребованным решением в условиях стремительного роста объемов данных и усложнения их структуры.

Основные результаты данной работы заключаются в следующем:

- разработана современная архитектура системы сбора и извлечения информации для интеллектуальной поисково-аналитической системы;
- предложена интеграция моделей машинного обучения в подсистему извлечения метаданных;
- представлены результаты работы системы сбора и извлечения информации из веб-ресурсов, созданной на основе представленной архитектуры.

## **2. Связанные работы**

### **2.1 Виды систем сбора и извлечения информации**

Системы сбора и извлечения информации (web-crawler, система краулинга, или "краулер") можно классифицировать по различным признакам, включая стратегию обхода веб-страниц и архитектуру. Универсальные системы осуществляют полный обход сайтов без учета специфики содержимого, что позволяет охватывать максимально широкий спектр информации, однако зачастую страдают от избыточности получаемых данных. В отличие от них, тематические (фокусированные) системы выбирают только страницы, соответствующие заданной тематике, что приводит к экономии сетевых и вычислительных ресурсов, но может

снижать полноту охвата. Инкрементальные системы сбора и извлечения информации обновляют уже собранные данные, извлекая лишь изменившуюся информацию, что позволяет снизить нагрузку на серверы, в то время как распределенные и параллельные системы ускоряют процесс сбора за счет координации работы нескольких серверов или процессов [6]. В последнее время появляются также специализированные системы сбора и извлечения информации, ориентированные на сбор данных с устройств Интернета вещей (IoT), анализирующие сервисные метаданные подключенных устройств. Таким образом, выбор конкретного типа системы определяется компромиссами между полнотой охвата, актуальностью информации и скоростью обработки.

## 2.2 Обзор существующих решений

Различные исследования демонстрируют разнообразие архитектурных подходов к реализации систем сбора и извлечения информации. Так, система полнотекстовых электронных библиотек (ПС ПЭБ), предложенная в работе [7], содержит модуль автоматического обхода и сбора данных с веб-сайтов (краулер) для автоматического наполнения коллекций документов, использующий регулярные выражения и шаблоны языка запросов для XML-документов XPath для фильтрации целевых документов. Это позволяет добиться высокой точности извлечения данных, однако требует ручной настройки конфигурационных файлов для каждой коллекции, что снижает гибкость при изменении структуры источников.

Работа [8] посвящена распределенной архитектуре системы автоматического обхода и индексирования веб-страниц, предназначенной для обхода огромного числа страниц. В предложенном решении основное внимание уделяется эффективному управлению очередью URL, оптимизации хранения данных и соблюдению сетевого этикета посредством распределения задач между множеством серверов. Разделение URL по хостам позволяет минимизировать межсерверные коммуникации, однако такие системы всё равно ограничены сетевыми задержками и нагрузкой на центральные сервера.

Обзор, проведенный в работе [9], охватывает широкий спектр методов обхода веб-страниц, включая универсальные, тематические и распределенные системы сбора и извлечения информации. Авторы акцентируют внимание на механизмах параллельного выполнения запросов и эффективном управлении очередью URL, описывая при этом методы приоритизации ссылок с использованием очередей с различными уровнями приоритета и алгоритмов обнаружения дубликатов с применением хеш-функций. Несмотря на богатство предлагаемых решений, в обзоре подчеркивается, что выбор стратегии сбора и извлечения информации напрямую зависит от конкретных задач, что затрудняет создание универсального решения.

Еще одним направлением развития являются системы на основе сервисно-ориентированной архитектуры и облачных вычислений. Сервисно-ориентированные архитектуры (SOA) позволяют разделять функциональные компоненты на независимые сервисы, взаимодействующие через стандартные программные интерфейсы (API), что обеспечивает гибкость, отказоустойчивость и масштабируемость. Облачные вычисления, в свою очередь, предоставляют возможность динамического выделения ресурсов для обработки больших объемов данных в распределенных системах. Примером такого подхода является архитектура веб-краулера как облачного сервиса (Crawler as a Service, CaaS), представленная в работе [10]. В данном решении процесс сбора и извлечения информации разделен на независимые микросервисы, что позволяет запускать несколько экземпляров системы параллельно в различных регионах облака и настраивать параметры через интерфейс программирования приложений на основе передачи репрезентативного состояния (REST API). Хотя такой подход позволяет значительно снизить время обхода за счет

масштабирования, он также может сталкиваться с дополнительными задержками, обусловленными передачей данных по сети между серверами распределенной среды.

Также следует отметить подход, основанный на распределенных вычислениях в сети (грид-вычислениях), описанный в работе [11]. Здесь для повышения производительности используется платформа Alchemi, позволяющая распределять процессы между несколькими вычислительными серверами в рамках среды .NET. Применение многопоточного выполнения и централизованного управления очередями URL позволяет добиться линейного уменьшения времени обхода при увеличении числа серверов, хотя эффективность этого подхода может снижаться из-за сетевых ограничений и неоднородности размеров обрабатываемых страниц.

Дополнительно, специализированные системы сбора и извлечения информации, описанные в работе [12], демонстрируют более точные методы извлечения информации за счет семантического анализа содержания. Однако такие системы зачастую требуют значительных вычислительных ресурсов и испытывают трудности при масштабировании в условиях быстро изменяющейся веб-среды.

В свою очередь, аналитический обзор систем для сбора данных с представительских сайтов [13] показывает разнообразие архитектурных подходов – от последовательных до параллельных и распределённых систем. Несмотря на то, что распределённые решения позволяют существенно ускорить процесс обхода, они не решают проблему повторной обработки одних и тех же страниц, что негативно сказывается на общей производительности.

Таким образом, несмотря на существенные достижения в области разработки систем сбора и извлечения информации, в каждом подходе наблюдаются определенные недостатки, что указывает на необходимость дальнейших исследований для создания универсальных архитектур, способных адаптироваться к динамичным изменениям веб-ресурсов и эффективно интегрироваться с внешними аналитическими модулями.

### **3. Архитектура предложенной системы**

В разработанной архитектуре система сбора и извлечения информации реализована как набор независимых подсистем, каждая из которых выполняет свою специализированную задачу и предоставляет функциональность через API. Такой модульный подход позволяет обеспечить гибкость, масштабируемость и отказоустойчивость решения, а также упрощает интеграцию с внешними системами.

#### **3.1 Общая структура системы**

В основе системы лежит распределенная микросервисная архитектура (рис. 1), где каждая подсистема реализует специализированную задачу и предоставляет функциональность через API.

Система содержит следующие подсистемы:

- подсистема управления заданиями (Task Management Module);
- подсистема мониторинга и журналирования (Monitoring and Logging Module);
- подсистема краулинга (Crawler Module);
- подсистема управления ссылками (Frontier Module);
- подсистема извлечения метаданных (Parser Module).

Все сервисы взаимодействуют посредством стандартных REST-запросов, что обеспечивает высокую гибкость, масштабируемость и простоту интеграции (рис. 2). Процесс работы системы включает несколько последовательных этапов.

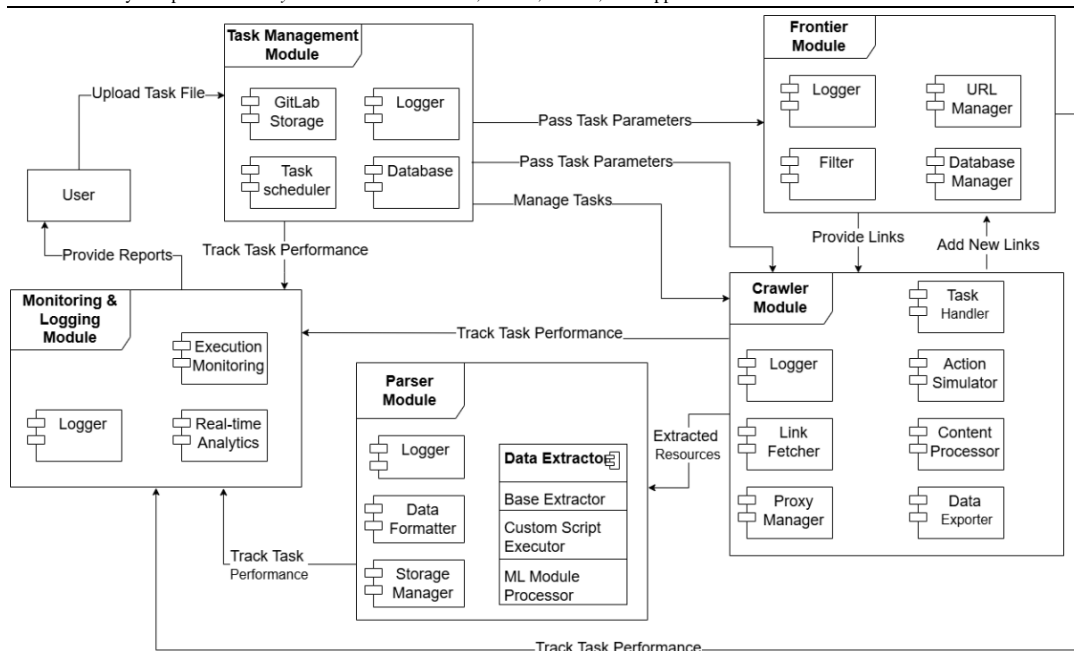


Рис. 1. Разработанная архитектура системы сбора и извлечения информации.  
Fig. 1. Developed Architecture of the Information Collection and Extraction System.

Для обеспечения высокой производительности и масштабируемости подсистемы извлечения метаданных и автоматического обхода веб-страниц (краулинга) поддерживают множественные экземпляры, которые могут динамически масштабироваться в зависимости от нагрузки и объема обрабатываемых данных. В то же время другие подсистемы являются единственными экземплярами в системе, так как они выполняют централизованные функции управления заданиями, ведения журнала событий (логгирование) и координации ссылок, обеспечивая консистентность данных и контроль над процессами.

На первом этапе подсистема управления заданиями осуществляет загрузку файлов формата YAML, определяющих параметры обхода и извлечения данных. Далее происходит сбор данных, при котором подсистема краулинга обрабатывает веб-страницы, включая динамически формируемое содержание, используя при необходимости механизмы имитации работы браузера. Подсистема управления ссылками координирует процесс обхода сайтов. При обработке новых ссылок данная подсистема проверяет их наличие в базе данных, исключая дублирование, и управляет их статусами. Необработанные ссылки передаются подсистеме краулинга, а после их загрузки обновляются их статусы в базе данных, сохраняя родительно-дочерние связи между страницами.

Подсистема извлечения метаданных применяет комбинированные методы, сочетающие традиционное извлечение по шаблонам XPath или CSS-selectors и модели машинного обучения, для обработки данных. Завершающим этапом является сохранение и валидация данных в унифицированных форматах с проверкой на соответствие заданным шаблонам.

Для контроля работы системы и диагностики ошибок используется подсистема мониторинга и логирования. Она собирает и анализирует метрики выполнения заданий, фиксирует временные характеристики этапов обработки данных и регистрирует ошибки. Логирование охватывает как общие события работы системы, так и детализированные записи о событиях по каждой подсистеме, что позволяет оперативно выявлять и устранять возможные неисправности.

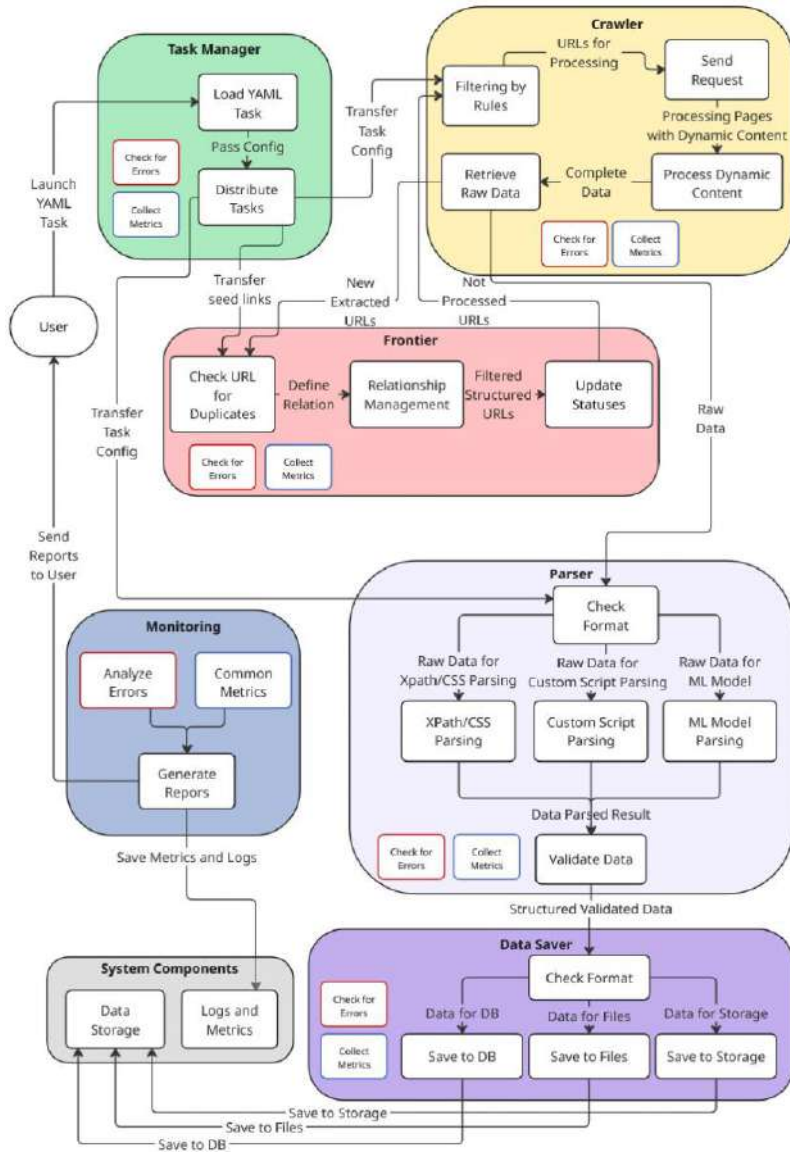


Рис. 2. Диаграмма потоков данных.  
Fig. 2. Data Flow diagram.

### 3.2 Подсистема управления заданиями (Task Management Module)

Подсистема обработки заданий управляет созданием, хранением, планированием и распределением задач в системе сбора и извлечения информации. Она отвечает за обработку файлов формата YAML с параметрами заданий, их хранение и передачу в соответствующие подсистемы для выполнения.

Компоненты подсистемы:

- Task Manager – принимает задания через API или файловую систему, обрабатывает и сохраняет их в базе данных, распределяет параметры между соответствующими подсистемами;

- Task Scheduler – управляет выполнением заданий, обеспечивая их запуск и повторное выполнение согласно расписанию;
- GitLab Storage – отвечает за хранение файлов заданий в системе управления версиями GitLab [14], предоставляя централизованный доступ к ним;
- Database – хранит время добавления/ изменения заданий, их служебные параметры и состояние выполнения;
- Logger – регистрирует события выполнения заданий, включая их запуск, завершение и возможные ошибки.

### 3.3 Подсистема мониторинга и журналирования (Monitoring and Logging Module)

Для контроля работы системы сбора и извлечения информации реализована подсистема мониторинга и логирования.

Данная подсистема включает следующие компоненты:

- Logger: ведёт регистрацию всех событий и ошибок, возникающих в процессе работы системы, что позволяет проводить детальный анализ работы и выявлять неисправности;
- Execution Monitoring: отслеживает время выполнения задач, количество обработанных страниц и другие ключевые показатели эффективности, позволяя оперативно реагировать на сбои или отклонения от нормальной работы;
- Real-time Analytics: предоставляет возможность анализа в реальном времени, что способствует своевременному принятию управленческих решений.

### 3.4 Подсистема краулинга (Crawler Module)

Подсистема краулинга реализует двухуровневый подход к обработке веб-страниц. Для статически формируемого содержания применяются стандартные HTTP-запросы, в то время как для содержимого, формируемого с помощью языка программирования JavaScript, задействуется имитация работы браузера на базе библиотеки для автоматизации браузера Playwright [15], включающая имитацию действий пользователя.

Одной из ключевых особенностей подсистемы является динамическое переключения режимов работы. При обнаружении ограничений, направленных на предотвращение автоматического сбора данных (например, система проверки "человек или робот" (капча) или блокировка), подсистема переходит на альтернативный режим работы, строго соблюдая указания, заданные в файлах robots.txt, и устанавливая увеличенные интервалы между запросами для снижения нагрузки на сервер. Компоненты подсистемы:

- LinkFetcher – получает и загружает страницы через HTTP или браузерный эмулятор;
- ContentProcessor – анализирует загруженную информацию, извлекает ссылки, фильтрует их и определяет релевантность страницы;
- ProxyManager – управляет прокси-серверами и настройками подключения;
- ActionSimulator – выполняет пользовательские действия (прокрутка страницы, нажатие кнопок и т. д.) в программе имитации браузера для обработки динамически формируемого содержимого;
- TaskHandler – управляет параметрами заданий, переданными в подсистему;
- DataExporter – сохраняет целевые страницы и передаёт их в подсистему извлечения метаданных;

- **Logger** – регистрирует ключевые события процесса краулинга, фиксируя успешные и ошибочные запросы, время загрузки страниц и возможные сбои.

Эта подсистема обеспечивает адаптивный сбор веб-данных, поддерживая обработку как статически, так и динамически формируемого содержимого с соблюдением этического подхода к краулингу.

### 3.5 Подсистема управления ссылками (Frontier Module)

Подсистема управления ссылками отвечает за координацию процесса краулинга, хранение информации о посещённых и непосещённых URL, а также за оптимизацию повторного обхода веб-ресурсов. Она обеспечивает хранение структуры связей между страницами, контроль статусов обработки и исключение дублирующихся ссылок.

В основе подсистемы лежит реляционная база данных PostgreSQL [16], где центральной структурой является таблица `UrlsTable`. Она содержит уникальный идентификатор URL, полный адрес страницы, ссылку на родительский URL и текущий статус обработки. Такой подход позволяет эффективно управлять процессом сбора данных, анализировать взаимосвязи между страницами и оптимизировать стратегию обхода.

Для поддержки периодического обновления система использует метки времени, что позволяет запускать повторный обход страниц через заданные интервалы, обеспечивая актуальность данных без избыточного дублирования.

Компоненты подсистемы:

- **UrlManager** – отвечает за добавление, обновление и удаление URL, а также за их распределение между подсистемами краулинга;
- **DatabaseManager** – управляет хранением информации о ссылках в PostgreSQL, поддерживает связи между страницами и выполняет аналитические запросы;
- **Filter** – исключает хранение дублирующихся ссылок в базе данных;
- **Logger** – фиксирует изменения статусов ссылок, операции обновления и удаления URL, а также регистрирует ошибки и метрики работы подсистемы.

Подсистема играет важную роль в управлении процессом обхода сайтов, обеспечивая его эффективность, целенаправленность и структурированность.

### 3.6 Подсистема извлечения метаданных (Parser Module)

Подсистема извлечения метаданных отвечает за обработку загруженных веб-страниц и выделение из них структурированной информации. В её основе лежит комбинированный подход, сочетающий традиционные методы извлечения данных (XPath, CSS-selectors, регулярные выражения) с современными алгоритмами машинного обучения. Это позволяет эффективно обрабатывать как статические, так и сложные динамические структуры веб-документов.

Для повышения качества извлеченных данных реализована автоматическая валидация ряда метаполей (ISSN, EISSN, ISBN, EISBN, DOI [17]) на основе заранее определённых шаблонов. Такой подход гарантирует соответствие данных установленным требованиям и снижает количество ошибок в процессе обработки.

Компоненты подсистемы:

- **DataExtractors** – набор методов для извлечения данных из веб-страниц:
  - **BaseExpExtractor** – использует регулярные выражения, XPath и CSS-selectors для извлечения информации;
  - **CustomScriptExecutor** – загружает и выполняет пользовательские Python-скрипты для специфических задач извлечения;

- **MLModelProcessor** – применяет предобученные модели машинного обучения для определения и извлечения сущностей в тексте.
- **DataFormatter** – унифицирует извлечённые данные в единый формат;
- **StorageManager** – отвечает за сохранение обработанных и исходных данных во внешние системы хранения;
- **Logger** – регистрирует события процесса извлечения, фиксируя успешные операции и возможные ошибки. Подсистема играет важную роль в управлении процессом обхода сайтов, обеспечивая его эффективность, целенаправленность и структурированность.

Эта подсистема обеспечивает высокую точность и универсальность процесса извлечения метаданных, позволяя адаптировать методы обработки под различные структуры веб-страниц.

### **3.7 Интеграция с внешними системами хранения данных**

Система поддерживает интеграцию с различными внешними хранилищами данных, что обеспечивает гибкость в организации хранения как исходных веб-страниц, так и структурированной информации, извлечённой в процессе обработки. В зависимости от типа данных могут использоваться различные системы хранения.

Например, для хранения исходных веб-страниц может использоваться облачное объектное хранилище, совместимое со стандартом Simple Storage Service (S3-совместимое хранилище), позволяющее загружать и управлять неструктурированными данными в распределённой среде.

Структурированные данные, извлечённые подсистемой извлечения метаданных, могут сохраняться, например, в графовые и реляционные базы данных, такие как ArangoDB [18] или PostgreSQL, позволяя эффективно управлять взаимосвязями между сущностями, выполнять сложные аналитические запросы и обеспечивать целостность данных. Дополнительно может осуществляться экспорт данных в форматах JSON или CSV, упрощая интеграцию с внешними аналитическими и поисковыми системами.

## **4. Интеграция моделей машинного обучения в подсистему извлечения данных**

Современные интеллектуальные поисково-аналитические системы требуют эффективных механизмов сбора и обработки данных из различных источников, включая веб-документы с динамической структурой. Традиционные методы извлечения информации, основанные на статических правилах, таких как XPath и CSS-selectors, обладают ограниченной гибкостью и требуют значительных затрат на настройку. В связи с этим возникает необходимость в интеграции методов машинного обучения, позволяющих адаптивно анализировать и извлекать данные без предварительной настройки под конкретную структуру страницы.

Одним из перспективных решений в данной области является применение моделей, предобученных на структурированных данных, таких как HTML-документы. В качестве одного из таких решений рассматривается модель MarkupLM [19], предложенная для обработки документов с разметкой. В отличие от классических моделей обработки естественного языка (NLP-моделей), MarkupLM использует информацию о структуре документа через встроенные векторные представления путей XPath (XPath-эмбединги), что делает её особенно эффективной для задач извлечения информации из HTML-страниц.

Преимущества интеграции машинного обучения в процесс извлечения данных:

- обработка сложных зависимостей в данных. Многие веб-документы содержат сложные взаимосвязи между элементами (например, вложенные таблицы, списки,

интерактивные элементы). Глубокие модели, такие как MarkupLM, способны учитывать иерархическую структуру документа, улучшая точность извлечения информации;

- снижение затрат на поддержку. В отличие от традиционных методов, требующих постоянного обновления правил обхода и извлечения данных, машинное обучение позволяет автоматизировать процесс адаптации к новым источникам данных, снижая временные и трудозатраты на настройку системы.

#### **4.1 MarkupLM как основа для специализированного извлечения данных**

MarkupLM — это предобученная модель, ориентированная на обработку документов с разметкой, таких как HTML и XML [20].

Её архитектура включает несколько ключевых компонентов:

- текстовые векторные представления (эмбединги) — числовое представление текста, аналогичное традиционным языковым моделям;
- XPath-эмбединги — кодирование структуры документа в виде пути к элементу в дереве документа, что позволяет модели учитывать вложенность элементов.

Хотя MarkupLM уже показывает хорошие результаты в анализе веб-страниц, её эффективность можно значительно повысить с помощью дообучения (тонкой настройки, *fine-tuning*) на специализированных наборах данных. Например, дообучение модели на данных о статьях и книгах (метаданные, такие как ISSN, DOI, авторы, названия) позволит адаптировать её к задачам извлечения структурированной информации в конкретных предметных областях. Такой подход обеспечит более точные и надёжные результаты, что делает MarkupLM отличной основой для создания специализированных решений в области автоматического анализа веб-документов.

#### **5. Апробация и результаты**

Был отобран набор из 21 веб-сайта, представляющих как иностранные, так и российские веб-ресурсы. Данные веб-ресурсы условно разделены на две группы в зависимости от особенностей обработки — статические и динамические. Ресурсы динамического типа требуют применения расширенных методов, таких как имитация работы браузера, управление файлами, сохраняющими информацию о пользователе (cookies), и автоматизация нажатий, что обеспечивает полноценный обход страниц с динамически формируемым содержанием. Статические ресурсы обрабатываются с использованием стандартных HTTP-запросов, что обеспечивает высокую скорость и эффективность сбора данных.

Динамические ресурсы:

- Institute of Electrical and Electronics Engineers - <https://ieeexplore.ieee.org/>
- Association for Computing Machinery - <https://dl.acm.org/>
- World Scientific - <https://www.worldscientific.com/>
- Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers - <https://www.spiedigitallibrary.org/>
- SAE International - <https://www.sae.org/>
- Sage Publishing - <https://www.sagepub.com/>
- Duke University Press - <https://www.dukeupress.edu/>
- EDP Sciences - <https://www.edpsciences.org/>
- Emerald Publishing - <https://www.emerald.com/insight/>
- Institute of Physics - <https://iopscience.iop.org/>
- European Mathematical Society - <https://ems.press/>

## Статические ресурсы:

- Репозиторий Белорусского государственного педагогического университета им. М. Танка - <https://elib.bspu.by/>
- Репозиторий Гомельского государственного университета имени Франциска Скорины - <https://elib.gsu.by/>
- Репозиторий Белорусского государственного технологического университета - <https://elib.belstu.by/>
- Euromonitor - <https://www.euromonitor.com/>
- CyberLeninka - <https://cyberleninka.ru/>
- ProQuest (BlackFreedom) - <https://blackfreedom.proquest.com/>
- KSF Lebedev - <https://ksf.lebedev.ru/>
- Cambridge - <https://www.cambridge.org/core/>
- Успехи химии - <https://www.uspkhim.ru/>
- АНО Редакция журнала «УФН» - <https://ufn.ru/>

В исследовании учитывались как иностранные, так и российские ресурсы, демонстрирующие различную степень сложности при обработке. Экспериментальная оценка показала, что 10 из 21 (примерно 48%) сайтов успешно обрабатываются с помощью стандартных HTTP-запросов без необходимости применения дополнительных механизмов. Однако для 11 из 21 (около 52%) ресурсов требовались расширенные подходы, включающие имитацию работы браузера, управление cookies и автоматизацию взаимодействия с элементами страницы, такими как кнопки нумерации страниц, динамическая подгрузка содержания и обработка множественных выпадающих окон.

Полученные результаты подтверждают, что стандартные методы краулинга применимы лишь к части веб-ресурсов, тогда как остальные требуют интеграции современных технологий для полноценного обхода и высокоточного извлечения данных. Таким образом, экспериментальные данные подчеркивают важность комбинированного подхода в разработке систем сбора и извлечения информации, адаптирующихся к специфике различных типов веб-ресурсов.

Для извлечения метаданных использовались два подхода: BaseExpExtractor, который применяет регулярные выражения и язык XPath для выделения информации, и CustomScriptExecutor, позволяющий загружать и выполнять пользовательские Python-скрипты для специфических задач извлечения. Это обеспечивало адаптивность системы к различным структурам веб-ресурсов и повышало полноту сбора данных.

Разработанная система сбора и извлечения информации использовалась для наполнения индексных баз системы Неописк [21]. На основе полученных данных была проведена детальная оценка полноты извлечения метаданных (рис. 3). В общей сложности было собрано 8830424 документа, для которых проведён анализ полноты заполнения ключевых метаполей.

Результаты показали высокую полноту извлечения ключевых метаданных, таких как заголовки, авторы, даты публикации и названия журналов. Поля, связанные с идентификацией издательства и периодических изданий, также демонстрируют высокую степень заполненности. Вместе с тем, извлечение цифровых идентификаторов и ключевых слов оказалось менее полным, что подчёркивает необходимость дальнейшей оптимизации методов обработки данных. В некоторых случаях неполнота данных была обусловлена их отсутствием на исходных веб-ресурсах, что накладывает естественные ограничения на полноту извлечения.

Эти результаты подтверждают практическую применимость предложенного решения для обеспечения детальной информационной поддержки. В то же время они указывают на необходимость дальнейшей оптимизации методов обработки динамических элементов веб-страниц, а также разработки более эффективных подходов к извлечению слабоструктурированных метаполей.

Для более глубокого анализа работы системы были сформированы четыре таблицы, демонстрирующие результаты извлечения метаданных из журналов. Табл. 1 и табл. 2 содержат показатели, характеризующие долю и абсолютное количество извлечённых метаданных в пяти журналах, где система показала наилучшие результаты, тогда как табл. 3 и табл. 4 отражают соответствующие показатели для пяти журналов с наименьшей полнотой извлечения. Сопоставление этих данных позволяет сделать вывод о различиях в эффективности обработки различных ресурсов и подчёркивает необходимость применения специализированных методов для обеспечения высокого качества извлечения метаданных в зависимости от специфики веб-ресурсов.

В таблицах представлены данные по следующим научным изданиям:

- IEEE MGWL — IEEE Microwave and Guided Wave Letters;
- IEEE PTL — IEEE Photonics Technology Letters;
- Demography — Demography Journal;
- IEEE TBE — IEEE Transactions on Biomedical Engineering;
- Int. J. STD & AIDS — International Journal of STD & AIDS;
- J. Trop. Ped. — Journal of Tropical Pediatrics;
- Ind. J. Pub. Adm. — Indian Journal of Public Administration;
- Theater — Theater;
- Mod. Lang. Q. — Modern Language Quarterly;
- S. Atl. Q. — South Atlantic Quarterly.

Для удобства анализа в таблицах использованы следующие сокращенные обозначения полей метаданных:

- Title — заголовок публикации;
- Authors — авторы;
- Date — дата публикации;
- Doi — цифровой идентификатор публикации (Digital Object Identifier);
- Publ — издательство;
- Abstr — аннотация;
- Issn — международный стандартный серийный номер (International Standard Serial Number);
- Kwds — ключевые слова;
- Issue — номер выпуска журнала;
- Vol — том журнала;
- Pages — страницы публикации.

## 6. Заключение

В данной работе показано, что представленная архитектура демонстрирует практическую применимость при извлечении метаданных с широкого спектра веб-ресурсов, включая динамические и структурно сложные страницы. Отдельное внимание было уделено анализу эффективности при работе с ресурсами, где применяются механизмы защиты от автоматического сбора информации, а также внедрению модели машинного обучения для извлечения метаданных. Таким образом, разработанное решение представляет собой шаг в развитии универсальных систем сбора и анализа данных для современных информационных сред. Представленные программные средства были использованы при наполнении

индексных баз системы Неопииск.

Несмотря на достигнутые успехи, существует потенциал для дальнейшего совершенствования отдельных компонентов системы. В частности, оптимизация моделей машинного обучения позволит добиться ещё более точного извлечения информации, что обеспечит высокую адаптивность решения в условиях постоянно меняющихся веб-ресурсов.

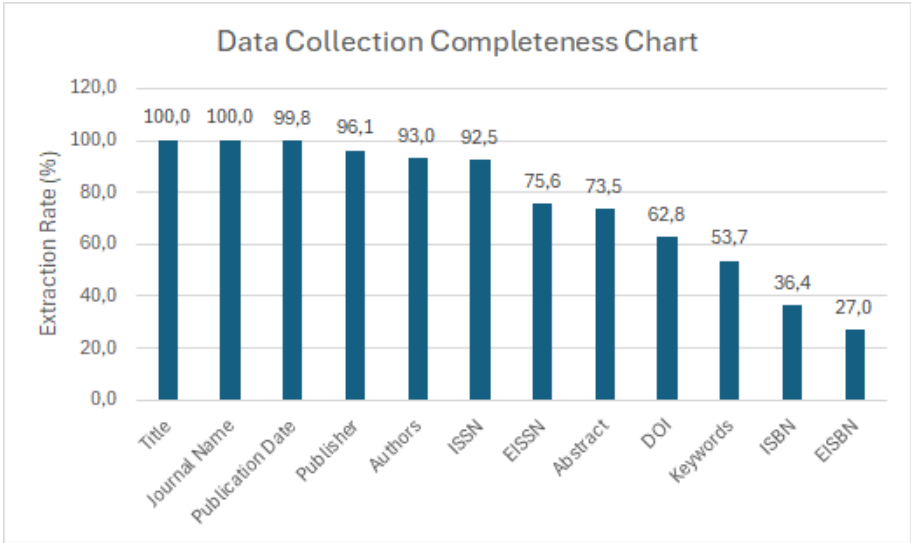


Рис. 3. Статистика полноты сбора метаданных.

Fig. 3. Metadata Collection Completeness Statistics.

Табл. 1. Доля извлечённых метаданных в лучших журналах (%).

Table 1. Share of Extracted Metadata in Top Journals (%).

Journals	Metadata Fields										
	Title	Authors	Date	Doi	Publ	Abstr	Issn	Kwds	Issue	Vol	Pages
J. Trop. Ped.	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Ind. J. Pub. Adm.	100	99	100	100	100	100	100	99	100	100	100
Theater	100	99	100	100	100	94	100	96	100	100	100
Mod. Lang. Q.	100	95	100	100	100	96	100	96	100	100	100
S. Atl. Q.	100	99	100	100	100	90	100	94	100	100	100

Табл. 2. Количество извлечённых метаданных в лучших журналах.

Table 2. Number of Extracted Metadata in Top Journals.

Journals	Metadata Fields										
	Title	Authors	Date	Doi	Publ	Abstr	Issn	Kwds	Issue	Vol	Pages
J. Trop. Ped.	1218	1218	1218	1218	1218	1218	1218	1218	1218	1218	1218
Ind. J. Pub. Adm.	19697	19485	19697	19697	19697	19643	19697	19470	19697	19697	19697
Theater	4088	4036	4088	4088	4088	3835	4088	3938	4088	4088	4088
Mod. Lang. Q.	12176	11529	12176	12176	12176	11678	12176	11704	12176	12176	12175
S. Atl. Q.	3516	3470	3516	3516	3516	3156	3516	3300	3516	3516	3516

Табл. 3. Доля извлечённых метаданных в худших журналах (%).

Table 3. Share of Extracted Metadata in Worst Journals (%).

Journals	Metadata Fields										
	Title	Authors	Date	Doi	Publ	Abstr	Issn	Kwds	Issue	Vol	Pages
J. Trop. Ped.	100	94	100	100	100	57	1	25	100	100	93
Ind. J. Pub. Adm.	100	78	100	100	100	1	100	1	100	100	99
Theater	100	86	100	100	100	6	100	2	100	100	100
Mod. Lang. Q.	100	96	100	100	100	10	100	3	100	100	100
S. Atl. Q.	100	95	100	100	100	10	100	6	100	100	100

Табл. 4. Количество извлечённых метаданных в худших журналах.

Table 4. Number of Extracted Metadata in Worst Journals.

Journals	Metadata Fields										
	Title	Authors	Date	Doi	Publ	Abstr	Issn	Kwds	Issue	Vol	Pages
J. Trop. Ped.	5496	5141	5496	5496	5496	3127	35	1366	5496	5496	5098
Ind. J. Pub. Adm.	1832	1432	1832	1832	1832	13	1832	10	1832	1832	1807
Theater	2203	1886	2203	2198	2203	130	2203	53	2203	2203	2203
Mod. Lang. Q.	4853	4642	4853	4853	4853	495	4853	157	4853	4853	4853
S. Atl. Q.	8295	7857	8295	8295	8295	807	8295	470	8295	8295	8295

## Список литературы / References

- [1]. Jin, X., Wah, B. W., Cheng, X., & Wang, Y. (2015). Significance and Challenges of Big Data Research. *Big Data Research*, 2(2), 59–64. doi:10.1016/j.bdr.2015.01.006.
- [2]. Китаев, Е. Л., & Скорнякова, Р. Ю. (2019). StructScraper--инструмент для динамического включения в контент веб-страницы семантических данных внешних веб-ресурсов. *Научный Сервис в Сети Интернет*, 21, 424–431.
- [3]. Weichselbraun, A., Brasoveanu, A. M. P., Waldvogel, R., & Odoni, F. (2020). Harvest - An Open Source Toolkit for Extracting Posts and Post Metadata from Web Forums. 2020 IEEE/WIC/ACM International Joint Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology (WI-IAT), 438–444. doi:10.1109/WIAT50758.2020.00065.
- [4]. Choi, W., Yoon, H.-M., Hyun, M.-H., Lee, H.-J., Seol, J.-W., Lee, K. D., Yoon, Y. J., Kong, H. (2023). Building an annotated corpus for automatic metadata extraction from multilingual journal article references. *PloS One*, 18(1), e0280637.
- [5]. Patnaik, S., Babu, C., & Bhawe, M. (08 2021). Intelligent and Adaptive Web Data Extraction System Using Convolutional and Long Short-Term Memory Deep Learning Networks. *Big Data Mining and Analytics*, 4, 279–297. doi:10.26599/BDMA.2021.9020012.
- [6]. Yu, L., Li, Y., Zeng, Q., Sun, Y., Bian, Y., & He, W. (2020). Summary of web crawler technology research. *Journal of Physics: Conference Series*, 1449(1), 012036. doi:10.1088/1742-6596/1449/1/012036.
- [7]. Назаренко Г. И., Плотникова В. А., Смирнов И. В., Соченков И. В., Тихомиров И. А. (2010). Программные средства создания и наполнения полнотекстовых электронных библиотек. *Электронные Библиотеки: Перспективные Методы и Технологии, Электронные Коллекции: XII Всероссийская Научная Конференция RCDL*.
- [8]. Najork, M. (2009). *Web Crawler Architecture*.
- [9]. Kausar, M. A., Dhaka, V. S., & Singh, S. K. (2013). Web crawler: a review. *International Journal of Computer Applications*, 63(2), 31–36.

- [10]. ElAraby, M. E., Moftah, H. M., Abuelenin, S. M., & Rashad, M. Z. (2018). Elastic web crawler service-oriented architecture over cloud computing. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 43(12), 8111–8126.
- [11]. ElAraby, M. E., Sakre, M. M., Rashad, M. Z., & Nomir, O. (2012). Crawler architecture using grid computing. *International Journal of Computer Science & Information Technology*, 4(3), 113.
- [12]. Якубчик В. С., Попов О. Р., Крамаров С. О. (2023). Специализированные web-краулеры: на пути к семантическим моделям организации информационного поиска. *Universum: Технические Науки: Электрон. Научн. Журн.*, 4(109). Available at: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/15315>.
- [13]. Печников А. А., Сотенко Е. М. (2017). Программы-краулеры для сбора данных о представительских сайтах заданной предметной области – аналитический обзор. *Современные Наукоёмкие Технологии*, (2), 58–62. Available at: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=36585>.
- [14]. The most-comprehensive AI-powered DevSecOps platform. GitLab. Available at: <https://about.gitlab.com/>, accessed 31.03.2025.
- [15]. Fast and reliable end-to-end testing for modern web apps. Playwright Python. Available at: <https://playwright.dev/>, accessed 31.03.2025.
- [16]. PostgreSQL: The World's most advanced open source database. Available at: <https://www.postgresql.org/>, accessed 31.03.2025.
- [17]. Digital Object Identifier. Available at: <https://www.doi.org/>, accessed 31.03.2025.
- [18]. ArangoDB: Multi-Model Database for Your Modern Apps. Available at: <https://arangodb.com/>, accessed 31.03.2025.
- [19]. MarkupLM. Available at: [https://huggingface.co/docs/transformers/model\\_doc/markuplm](https://huggingface.co/docs/transformers/model_doc/markuplm), accessed 31.03.2025.
- [20]. Li, J., Xu, Y., Cui, L., & Wei, F. (2022). MarkupLM: Pre-training of Text and Markup Language for Visually-rich Document Understanding. *arXiv [Cs.CL]*. Available at: <http://arxiv.org/abs/2110.08518>.
- [21]. Неописк. Available at: <https://promo.neopoisk.ru/about>, accessed 31.03.2025.

## **Информация об авторах / Information about authors**

Данил Сергеевич СЕРЕНКО является студентом кафедры математического моделирования и искусственного интеллекта РУДН имени Патриса Лумумбы, научным сотрудником Федерального исследовательского центра "Информатика и управление" Российской академии наук (ФИЦ ИУ РАН). Область научных интересов – искусственный интеллект, информационный поиск.

Danil Sergeevich SERENKO is a student at the Department of Mathematical Modeling and Artificial Intelligence of the Patrice Lumumba RUDN University, a researcher at Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences. His research interests include AI, information retrieval.

Егор Дмитриевич ТЕРЕНТЬЕВ является студентом кафедры математического моделирования и искусственного интеллекта РУДН имени Патриса Лумумбы, научным сотрудником Федерального исследовательского центра "Информатика и управление" Российской академии наук (ФИЦ ИУ РАН). Область научных интересов – искусственный интеллект, информационный поиск.

Egor Dmitrievich TERENCEV is a student at the Department of Mathematical Modeling and Artificial Intelligence of the Patrice Lumumba RUDN University, a researcher at Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences. His research interests include AI, information retrieval.

Денис Владимирович ЗУБАРЕВ является научным сотрудником Федерального исследовательского центра "Информатика и управление" Российской академии наук (ФИЦ ИУ РАН). Область научных интересов – искусственный интеллект, информационный поиск, поиск текстовых заимствований.

Denis Vladimirovich ZUBAREV is a researcher at Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences. His research interests include AI, information retrieval, text plagiarism detection.

Илья Владимирович СОЧЕНКОВ – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ФИЦ ИУ РАН, ведущий научный сотрудник ИСП РАН, ведущий научный сотрудник ИППИ РАН. Сфера научных интересов: обработка естественного языка, методы информационного поиска, обработка больших массивов текстовой информации.

Ilya Vladimirovich SOCHENKOV – Cand. Sci. (Phys.-Math.), lead researcher at FRC CSC RAS, lead researcher at ISP RAS, lead researcher at ITP RAS. Research interests: Natural Language Processing, Information Retrieval, Big Data & Text Mining.



DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(2)-21



## A Model for Atrial Fibrillation Detection Based on Differentiation and Compression of Interbeat Interval Sequences

*N.S. Markov, ORCID: 0000-0001-8913-9962 <ns.markov@iip.uran.ru>*

*Institute of Immunology and Physiology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
106, Pervomayskaya st., Yekaterinburg, 620078, Russia.*

*Ural Federal University, 19, Mira st., Yekaterinburg, 620062, Russia.*

**Abstract.** Atrial fibrillation is the most common arrhythmia with a major impact on public health. This paper presents a model for automatic detection of atrial fibrillation episodes in ECG, using information compression and numerical differentiation for classification of beat-to-beat interval sequences. The core of the model is normalized compression distance based on the theory of universal similarity metrics. To enable class discrimination by compression we consider finite-difference representation of interval sequences with subsequent quantization procedure. In particular, we introduce a simple  $\Delta 5RR$ -interval representation which improves the sensitivity of the model to heart rhythm fluctuations. Our model achieves 96.37% sensitivity, 97.74% specificity and 0.935 MCC in 8x5-fold cross-validation on the MIT-BIH AFDB dataset using a segment window of 128 R-peaks. The particular advantage of the model is the classification quality in a few-shot learning setting, i.e., a training set with a small number of sequence observations can be used for classification of sufficiently large test sets.

**Keywords:** normalized compression distance; few-shot learning; atrial fibrillation detection; heart rate; RR-interval sequences.

**For citation:** Markov N.S. A Model for Atrial Fibrillation Detection Based on Differentiation and Compression of Interbeat Interval Sequences. Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS, vol. 37, issue 2, 2025, pp. 281-300. DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(2)-21.

**Acknowledgements.** The author would like to thank Olga Eduardovna Solovyova for scientific supervision. The work was supported by the state task to IIP UrB RAS № 122022200089-4.

## Модель детекции фибрилляции предсердий, основанная на дифференцировании и сжатии интервалограмм

*Н.С. Марков, ORCID: 0000-0001-8913-9962 <ns.markov@iip.uran.ru>*

*Институт иммунологии и физиологии УрО РАН,  
Россия, 620078, г. Екатеринбург, ул. Первомайская, 106.  
Уральский Федеральный Университет имени Б.Н. Ельцина,  
Россия, 620062, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19.*

**Аннотация.** Фибрилляция предсердий – это наиболее распространенная в популяции аритмия, оказывающая существенное влияние на систему здравоохранения. В данной работе представлена модель автоматической детекции эпизодов фибрилляции предсердий на ЭКГ, использующая сжатие информации и численное дифференцирование для классификации последовательностей интервалов между сердечбиениями. В основе модели лежит нормализованное расстояние сжатия, основанное на теории универсальных метрик информационной близости. Чтобы обеспечить дискриминацию классов путем сжатия, в работе рассматривается конечно-разностное представление интервальных последовательностей с последующей процедурой квантования. В частности, вводится простое  $\Delta 5RR$ -интервальное представление последовательности, которое улучшает чувствительность модели к флуктуациям сердечного ритма. Предлагаемая модель достигает 96.37% чувствительности, 97.74% специфичности и 0.935 коэффициента корреляции Мэтьюса при 8х5-кратной кросс-валидации на базе данных MIT-BIH AFDB с использованием окна из 128 R-пиков. Особым преимуществом модели является качество классификации при обучении с малым количеством проб, то есть обучающая выборка с небольшим числом наблюдений последовательностей может использоваться для классификации достаточно больших тестовых выборок.

**Ключевые слова:** нормализованное расстояние сжатия; обучение с малым количеством проб; детекция фибрилляции предсердий; ритм сердца; RR-интервалограммы.

**Для цитирования:** Марков Н.С. Модель детекции фибрилляции предсердий, основанная на дифференцировании и сжатии интервалограмм. Труды ИСП РАН, том 37, вып. 2, 2025 г., стр. 281–300 (на английском языке). DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(2)-21.

**Благодарности:** Автор выражает благодарность Соловьёвой Ольге Эдуардовне за научное руководство. Работа была выполнена при поддержке гос. темы ИИФ УрО РАН №122022200089-4.

### 1. Introduction

In a healthy heart, the cardiac rhythm is entirely governed by a special functional structure, the sinus node. Atrial fibrillation (AF) is a heart condition in which the atria beat spontaneously as the sinus node loses control over the heartbeat cycle. The rhythm of AF is characterized by an increased average frequency and quasi-chaotic fluctuations of heartbeats. The incidence of AF in the population of developed countries reaches 1-2%, making it the most common cardiac arrhythmia [1]. For this reason, AF is considered one of the most pressing public health problems.

Automatic detection of atrial fibrillation episodes is an important diagnostic task critical to patient monitoring. A lot of classification models designed for automatic detection of AF were published in the 21st century [2], as more ECG data had been made available through repositories such as PhysioNet [3]. The reliable approach to discriminate between a normal rhythm and an AF episode is to analyze irregularities in a sequence of beat-to-beat RR-intervals on ECG. RR-sequences are robust to noise [4] and can be recorded by inexpensive consumer devices [5].

Neural network-based models undoubtedly achieve the best results in the task of heart rhythm classification [2]. However, neural networks are computationally expensive to run, and the models themselves tend to overfit to certain data sets, leading to poor generalization across population [6]. This aspect makes it difficult to implement neural network models in remote health systems used for routine ECG monitoring and detection of AF episodes in patients with suspected disease.

Therefore, there is still a need for "lightweight" and efficient AF detection models that do not require large amount of data for training and can be implemented on low-cost low-energy devices. One such promising alternative is classification by compression, which uses heuristic information compression to highlight irregularities and patterns in the data.

This paper proposes a classification model that uses the proximity between interbeat interval sequences captured by a compression algorithm for automatic detection of AF episodes. The core of the model is normalized compression distance [7], which serves as an approximation of the incomputable universal similarity metric. However, to enable discriminative properties of compression we consider differentiation of RR-sequences, and a quantization procedure which turns scalar sequences into symbolic strings. For the former we introduce a  $\Delta 5RR$ -interval representation which uses a finite-difference scheme to emphasize rhythm fluctuations, leading to a better sensitivity of the model.

Statistical validation of the model is performed on the open MIT-BIH Atrial Fibrillation Database under repeating fivefold cross-validation. This approach allows us to evaluate the classification quality, select the best model configuration and compare it with arrhythmia detectors presented in other works.

The resulting classification model requires the selection of only two hyperparameters. Therefore, we further evaluate the quality of the model in a few-shot learning setting with a limited training sample. This allows us to assess the degree of generalization achieved by the model and its effectiveness for tasks with limited amounts of data.

## 2. Methods

### 2.1 Finite-difference representation of interbeat interval sequences

Let  $(R_i)$  be the sequence of time coordinates of R-peaks corresponding to heartbeats on the ECG recording. RR-interval sequence  $(RR_i)$  is a dynamic series of time intervals between adjacent R-peaks:  $RR_i = R_i - R_{i-1}$

RR-sequences display a natural trend: a person's heart rate varies in response to a variety of external factors such as stress, exercise, stimulation, sleep, etc. A  $\Delta RR$ -representation is introduced to eliminate the linear trend for classification [8]:

$$\Delta RR_i = RR_{i+1} - RR_i = R_{i+1} - 2R_i + R_{i-1}. \quad (1)$$

As can be seen from the formula, the  $\Delta RR_i$  represents the difference between adjacent RR-intervals. This can be thought of as taking the second numerical derivative using a three-point scheme along the original sequence of R-peaks. We propose and investigate an analogous finite-difference  $\Delta 5RR$ -representation using a five-point scheme [9]:

$$\Delta 5RR_i = \frac{-R_{i+2} + 16R_{i+1} - 30R_i + 16R_{i-1} - R_{i-2}}{12}. \quad (2)$$

In this paper three representations of interbeat sequence – RR,  $\Delta RR$  and  $\Delta 5RR$  – were considered. The study was carried out with respect to a segment window  $M$ . This value indicates the number of R-peaks used for classification. In practice, a classifier using a smaller  $M$  is preferred because it allows the use of shorter ECG recordings for the detection of arrhythmia episodes. In this paper, the quality of classification was investigated for windows  $M = 32, 64$  and  $128$ .

### 2.2 Quantization

It is known that compression algorithms are designed primarily for binary and text data. Therefore, we propose a quantization procedure to transform interbeat interval sequences into symbolic strings.

Let  $X$  be a sequence of real values. A mapping function  $q(x)$  is called a quantizer if it is defined for any  $x \in X$  and takes a finite number  $Q$  of values  $a_1, \dots, a_Q$ , which we call an alphabet  $\mathcal{A}$ . We consider scalar quantization, i.e.,  $X \subseteq \mathbb{R}$ . Quantizer can be viewed as a surjective function  $q(x): \mathbb{R} \rightarrow \mathcal{A}$ .

From the surjectivity of the function  $q(x)$  it follows that the quantizer assigns discrete states to the elements  $x \in X$  depending on whether they belong to some non-overlapping subsets  $\mathcal{B}_1, \dots, \mathcal{B}_Q$ :

$$q(x) = a_i \longleftrightarrow x \in \mathcal{B}_i \quad (3)$$

For scalar quantizer these subsets can be given as semi-intervals:  $\mathcal{B}_1 \subseteq (-\infty, b_1]$ ,  $\mathcal{B}_2 \subseteq (b_1, b_2]$ ,  $\dots$ ,  $\mathcal{B}_Q \subseteq (b_{Q-1}, \infty)$ . Thus, the quantizer  $q(x)$  can be defined by selecting the boundaries of the semi-intervals  $b_1, \dots, b_{Q-1}$  and images  $a_1, \dots, a_Q$ .

Compression algorithms are robust to alphabet permutations, so the images  $\{a_i\}_{i=1..Q}$  can be chosen arbitrarily – in this paper they are Unicode symbols in UTF-8 encoding with positions from 1 to  $Q$ . On the other hand, the semi-interval boundaries  $\{b_i\}_{i=1..Q-1}$  should be selected depending on the distribution of elements in  $X$ , the frequency of occurrence of particular values.

Let  $c_1, \dots, c_Q$  be the centroids of  $\mathcal{B}_1, \dots, \mathcal{B}_Q$ . We can determine whether an element  $x$  belongs to a certain semi-interval by its nearest centroid:

$$x \in \mathcal{B}_i \longleftrightarrow i = \underset{i}{\operatorname{argmin}} |x - c_i| \quad (4)$$

Given the ordering of centroids ( $\forall i, j \ 1 \leq i < j \leq Q: c_i < c_j$ ) it is obvious that for the chosen  $\{c_i\}_{i=1..Q}$  the quantization boundaries are the midpoints on the numerical line between successive centroids:

$$b_i = \frac{c_{i+1} - c_i}{2}, \ 1 \leq i \leq Q - 1. \quad (5)$$

Thus, the problem of semi-interval boundary selection can be reduced to the problem of centroid optimization.

For a finite scalar sequence  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  we select the semi-interval centroids by minimizing the quadratic error:

$$\underset{c_1, \dots, c_Q}{\operatorname{argmin}} \sum_{j=1}^Q \sum_{x_i \in \mathcal{B}_j} (x_i - c_j)^2. \quad (6)$$

The k-means++ clustering algorithm [10] deterministically finds near-optimal values of  $\{c_i\}_{i=1..Q}$  for a given  $X$  and alphabet size  $Q$  (assigning  $Q$  as the number of centroids  $k$  in the algorithm). Found scalar function  $q(x)$  is used for the whole set quantization with  $X$  being the "flattened" training sample. Therefore,  $Q$  is the only parameter of the whole quantization procedure.

## 2.3 Classification model

The complete proposed model combines the finite-difference representation of the interbeat interval sequences and subsequent quantization with classification using normalized compression distance and k-nearest neighbour method. Below is a formalization of the entire model.

Let  $\mathbb{R}^M$  be the event space. Finite monotone sequences of R-peak time coordinates are observations of events:  $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_M) \in \mathbb{R}^M$ . Let  $\mathcal{L}$  be the space of classes of events. We consider a binary classification, hence  $\mathcal{L} = \{1, 0\}$ , where positive and negative classes 1 and 0 are episodes of AF and normal rhythm respectively.

Let  $(\mathbf{x}_{\square}, y_{\square})_{\square=1..N}$  be a training sample of  $N$  observation of events  $\mathbf{x}_{1..N} \in X_{train}$  with known classes  $y_{1..N} \in Y_{train}$ . The complete classification procedure consists of four steps.

**Step 1.** The sequences  $\mathbf{x}_i$  are transformed into either RR,  $\Delta$ RR or  $\Delta$ 5RR-interval representation (Section 2.1):

$$\tilde{\mathbf{x}} = \text{RR}(\mathbf{x}) = (x_2 - x_1, x_3 - x_2, \dots, x_M - x_{M-1}) \quad (7)$$

$$\tilde{\mathbf{x}} = \Delta\text{RR}(\mathbf{x}) = (x_3 - 2x_2 + x_1, \dots, x_M - 2x_{M-1} + x_{M-2}) \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{x}} = \Delta_5\text{RR}(\mathbf{x}) = & \left( \frac{-x_5 + 16x_4 - 30x_3 + 16x_2 - x_1}{12}, \right. \\ & \dots, \\ & \left. \frac{-x_M + 16x_{M-1} - 30x_{M-2} + 16x_{M-3} - x_{M-4}}{12} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

If we denote  $\tilde{x}_{ij}$  as the value of the  $j$ -th element in the  $i$ -th sequence after the chosen finite-difference transformation, the training sample is a matrix  $\tilde{X} = (\tilde{x}_{ij})_{1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq m}$  where  $m$  is the new length of the sequence. Depending on sequence representation  $m = M - 1$ ,  $m = M - 2$  or  $m = M - 4$ .

**Step 2** involves the scalar quantizer training. For this,  $\tilde{X}$  is represented as a “flattened” one-dimensional scalar sequence  $\tilde{X}_{flat} = (\tilde{x}_{(r \div m) + 1, (r \bmod m) + 1})$  with an abstract index  $1 \leq r \leq N \times m$ . The quantizer  $(\cdot)$  is found according to Section 2.2 by minimizing the expression (6). The size of the alphabet  $Q$  is a hyperparameter of the complete classification model.

**Step 3.** Let  $\hat{\mathbf{x}} = (\hat{x}_1, \dots, \hat{x}_m) \in \mathbb{R}^m$  be the sequence undergoing classification (transformed to the corresponding finite-difference representation beforehand) and  $\hat{y}$  be the sought unknown class. This step is the calculation of normalized compression distances between the classified observation and the sequences in the training sample.

We denote by  $\mathbf{q}$  the vectorized version of the quantizer, i.e.,  $\mathbf{q}(\mathbf{x}) = ((x_1), \dots, q(x_m))$ . Distances  $(d_i)_{i=1..N}$  are calculated by the normalized compression distance formula [7], given as:

$$d_i = \frac{C(\mathbf{q}(\hat{\mathbf{x}})\mathbf{q}(\tilde{\mathbf{x}}_i)) - \min(C(\mathbf{q}(\hat{\mathbf{x}})), C(\mathbf{q}(\tilde{\mathbf{x}}_i)))}{\max(C(\mathbf{q}(\hat{\mathbf{x}})), C(\mathbf{q}(\tilde{\mathbf{x}}_i)))}, \quad (10)$$

where  $\mathbf{q}(\hat{\mathbf{x}})\mathbf{q}(\tilde{\mathbf{x}}_i)$  is concatenation of the classified sequence with the  $i$ -th observation from the training sample,  $C(\cdot)$  – symbol length of the compressed sequence we compute using gzip [11] compressor. Normalized compression distance, when used with compressors based on Lempel-Ziv algorithm such as gzip, serves as a pseudo-metric approximation of universal normalized information distance [12]. The universal information distance itself is defined through Kolmogorov's complexity and acts as the lowest theoretical limit for computable information metrics [7,13].

**Step 4.** is classification using the  $k$ -nearest neighbour method. Let  $s(i)$  be a sorting index for  $(d_i)_{i=1..N}$  satisfying the following conditions:

$$\begin{aligned} \forall i, j \ 1 \leq i < j \leq N : d_{s(i)} &\leq d_{s(j)}, \\ d_{s(i)} = d_{s(j)} &\implies y_{s(i)} \geq y_{s(j)}. \end{aligned} \quad (11)$$

Here, in the case of equal distances, the second condition sets the sorting priority of known positive classes over negative ones in the training sample. Then, for binary classification,  $k$ -nearest neighbour method can be reduced to computing a single decision coefficient  $w_{knn}$ :

$$w_{knn} = \sum_{i=1}^k (-1)^{y_{s(i)}}, \quad (12)$$

and the sought class is determined according to the sign of the coefficient:

$$\hat{y} = h(\hat{\mathbf{x}}) = \begin{cases} 0, & w_{knn} > 0, \\ 1, & w_{knn} < 0. \end{cases} \quad (13)$$

Thus, the number of nearest neighbours  $k$  in (12) is the second hyperparameter of the complete model. Value of  $k$  must be an odd number to avoid choice uncertainty in (13).

Steps 3 and 4 extend element-wise to any set of classified sequences  $\{\hat{\mathbf{x}}_i\}_{i=1..l}$  in the testing sample  $X_{test}$  without the need for quantizer retraining in Step 2. Since the complete model does not have hidden parameters (intermediate parameters non-deterministically calculated according to the input), the information model can be viewed as a family of classifiers  $\mathcal{H}(Q, k)$ . The choice of the sequence representation in Step 1 is another part of the model configuration. This paper explores the influence of selected finite-difference representation (RR,  $\Delta RR$  or  $\Delta 5RR$ ), the number of nearest neighbours  $k$  and the alphabet size  $Q$  on the quality of performed classification.

2.4 Data

The efficacy of the model was investigated using the open MIT-BIH Atrial Fibrillation Database (AFDB), one of the most popular databases for the validation of AF classification methods [14-15]. AFDB consists of 25 Holter ECG monitoring recordings of 10 hours duration, sampled at 250 Hz. The database comes annotated with time coordinates of R-peaks and class labels for signals.

The R-peak coordinate sequences and their corresponding class labels were extracted from each recording and partitioned into sub-sequences of non-overlapping windows of length  $M = 32, 64, 128$ . A full sample was created for each considered  $M$ . Subsequences included normal or AF rhythm only. If, according to the annotations, a transition from one rhythm to another was observed in an ECG corresponding to the window, that subsequence was excluded from the sample. The number of subsequences in both classes extracted for each window size is shown in Table 1. There is a slight class imbalance in the samples with a bias towards normal rhythm sequences.

In addition to AFDB, a MIT-BIH Arrhythmia Database (MITDB) was used as an external test sample [3]. MITDB consists of 48 half-hour ECG recordings sampled at 360 Hz. Eight of the contained recordings included AF episodes. Interval sequences of normal rhythm from all 48 recordings and of AF episodes from 8 recordings were extracted for each window size. Other rhythm types were excluded. Not surprisingly, the extracted normal rhythm sequences were significantly more numerous than the AF sequences (Table 1).

Table 1. Number of interbeat interval sequences per class extracted from AFDB and MITDB recordings for each window size  $M$ .

AFDB					
Extracted for $M = 32$		Extracted for $M = 64$		Extracted for $M = 128$	
Normal	AF	Normal	AF	Normal	AF
20447	16032	10106	7896	4975	3851
Overall: 36479		Overall: 18002		Overall: 8826	
MITDB					
Extracted for $M = 32$		Extracted for $M = 64$		Extracted for $M = 128$	
Normal	AF	Normal	AF	Normal	AF
2212	289	1028	124	456	49
Overall: 2501		Overall: 1152		Overall: 505	

2.5 Validation procedures

Statistical validation of the classification model was performed with two data partitioning procedures: using the full available dataset and under few-shot learning setting. The procedures

differed in ways the splits into training and test samples were formed, and in the sizes of the training samples.

**The full dataset procedure** was a repeating fivefold cross-validation on the population. AFDB recordings were divided into 5 random groups of equal size, from which 5 possible population splits were created, with one group being the test population and the other 4 groups combined to form the training population. The procedure was repeated 8 times. This resulted in 40 splits into training and test populations of 20 and 5 recordings respectively. Extracted interval sequences from recordings were divided into training and test samples according to populations in order to prevent data leaks.

**The external dataset procedure** was used to supplement cross-validation on a single database. Experiments using MITDB as a test sample were performed with the whole AFDB database used as a training sample.

**The few-shot learning procedure** was used to assess the quality of classification in the context of a limited amount of training data. AFDB recordings were randomly divided into a training and a test population of 20 and 5 recordings respectively. All extracted interval sequences from the recordings of the test population formed the test sample. In turn,  $n$  random observations of sequences of both classes were randomly selected from the 20 recordings of the training population. This procedure was repeated 500 times for  $n = 5, 10, 20, 50, 100$ . I.e., 500 experiments were performed with a training sample consisting of  $n$  normal rhythm sequences and  $n$  AF sequences for each value of  $n$ .

The splits within procedures were made for a fixed window  $M$  and sequence representation. As three window sizes ( $M = 32, 64, 128$ ) and three interval sequence representations (RR,  $\Delta$ RR,  $\Delta$ 5RR) were investigated, classifications were repeated with the resulting training-test samples for all nine window/representation combinations. The same population splits were used for each configuration.

The Matthews correlation coefficient was used as the main measure to compare the quality of classification. Given the values of confusion matrix, MCC is determined by the formula:

$$MCC = \frac{TP \times TN - FP \times FN}{\sqrt{(TP + FP) \times (TP + FN) \times (TN + FP) \times (TN + FN)}} \quad (14)$$

where  $TP, TN, FP, FN$  are the numbers of true-positive, true-negative, false-positive, false-negative classifications. MCC is considered one of the most informative measures of binary classification quality [16], because it accounts for all four underlying basic rates of confusion matrix (sensitivity, specificity, predictive positive and negative values) and assigns equal importance to ratios of successful positive and negative predictions. The latter is particularly important given the class imbalance (Table 1).

In the present work, the average MCC between validation samples was the main quality measure for a fixed model configuration. In addition to MCC, sensitivity and specificity values indicating the proportions of true-positive and true-negative classifications are also provided.

### 3. Results

#### 3.1 Distance matrix and quantization analysis

To make a preliminary assessment about the ability of the proposed model to discriminate between classes we selected a random training-test sample of two non-overlapping groups of patients from AFDB, each consisting of 100 observations per normal rhythm and AF rhythm ( $M = 128$ ). Matrices of compression distances (10) calculated for  $\Delta$ 5RR,  $\Delta$ RR, RR representations with columns and rows sorted by class are presented in Fig. 1.

We can visually assess that the matrices for all three representations were clearly divided into 4 square clusters and show the necessary characteristics for classification – between-class distances (top-right and bottom-left parts of the matrices) are higher than intra-class distances (top-left and bottom-right parts of the matrices). This observation was confirmed by average distances  $\bar{d}$  inside clusters and their 95% confidence intervals (provided in Fig. [img:ch2distance\\_matrix\\_big](#)).

However, the RR representation led to the worst separability of the AF class, as the between-class distances ( $\bar{d} = 0.757, 0.767$ ) were not much higher than intra-class distances ( $\bar{d} = 0.726$ ). This can be said in contrast to  $\Delta 5RR$  representation which led to the highest between-class distances ( $\bar{d} = 0.788, 0.786$ ) and the lowest intra-class distances for the AF class ( $\bar{d} = 0.647$ ). In turn, the  $\Delta RR$  representation led to the lowest intra-class distances for normal rhythm ( $\bar{d} = 0.591$ ). Based on these results, we can assume that the use of  $\Delta 5RR$  in the model achieves fewer false-negatives (meaning higher sensitivity) and better quality overall. The use of  $\Delta RR$  results in fewer false-positive classifications and therefore higher specificity. Qualitatively, these results were observed for any random sample.

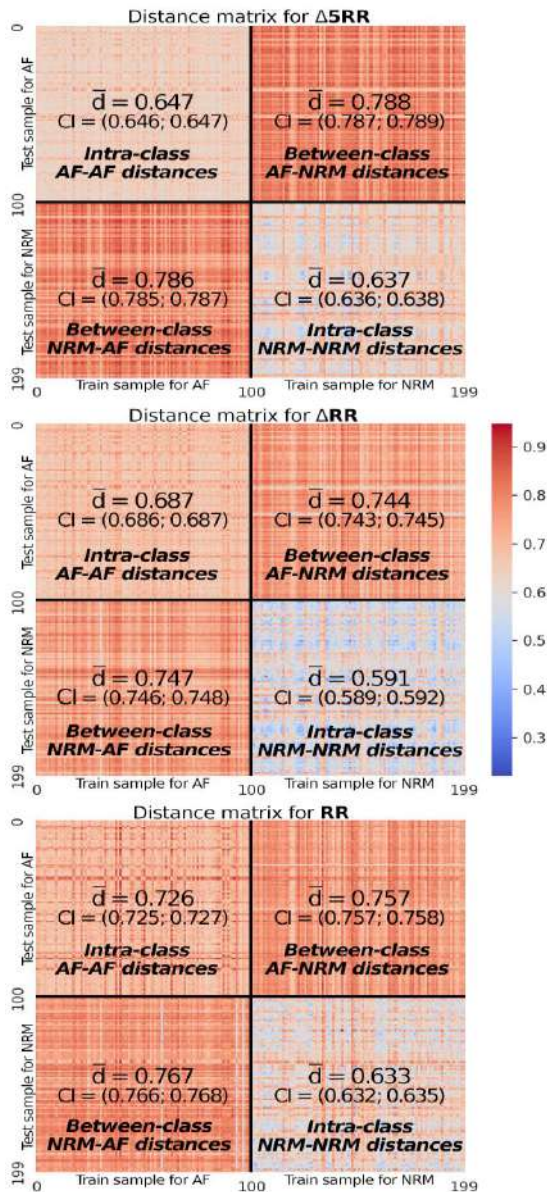


Fig. 1. Compression distance matrices for  $\Delta 5RR$ ,  $\Delta RR$ ,  $RR$  between two data samples. The columns and rows of the matrix are sorted by AF and normal rhythm (denoted as NRM in the Figure). The mean distances and 95% confidence intervals (calculated by bootstrapping [17]) are provided for rectangular clusters.

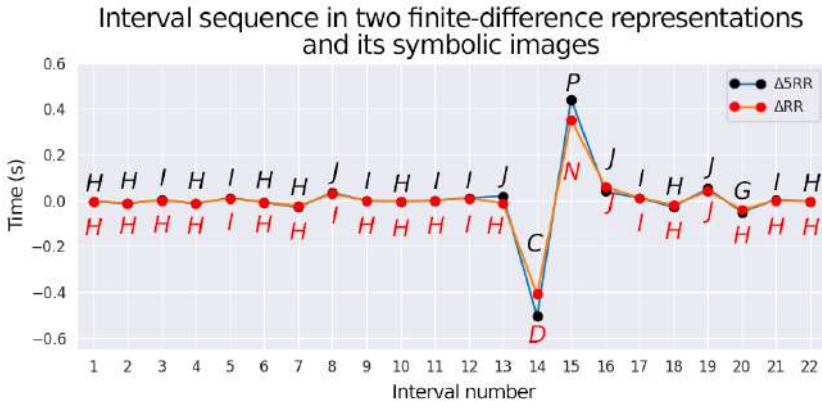


Fig. 2. Interval sequences of a normal rhythm episode with a single arrhythmic contraction, shown in  $\Delta 5RR$  and  $\Delta RR$  representations. Symbolic images for each interval after quantization (black letters denote images for  $\Delta 5RR$  representation, red letters for  $\Delta RR$ ) are given as well.

Analysis of interval sequences and their symbolic images after quantization allows us to suggest an explanation for the changes in the distances obtained for the two finite-difference representations. Fig. 2 shows an example of a short interval sequence of the same rhythm episode with superimposed  $\Delta 5RR$  and  $\Delta RR$  representations and their symbolic images after quantization ( $Q = 33$ ). This episode corresponded to normal rhythm with a single arrhythmic contraction of the heart. The values of the intervals between two representations were quite close to each other, but the magnitudes of peaks 14 and 15 corresponding to the arrhythmic contraction were higher for five-point scheme ( $\Delta 5RR_{14,15} = (-0.504, 0.440)$ ;  $\Delta RR_{14,15} = (-0.408, 0.352)$ ). Positions 13 and 16 also differed between representations ( $\Delta 5RR_{13,16} = (0.019, 0.040)$ ;  $\Delta RR_{13,16} = (-0.012, 0.060)$ ) because the five-point finite-difference scheme is informed by two adjacent rapid rhythm changes instead of one.

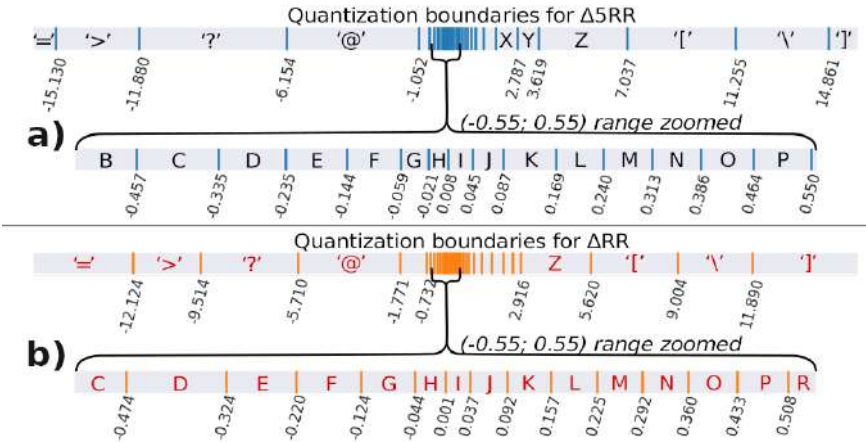


Fig. 3. Quantization boundaries learned for  $\Delta 5RR$  (a) and  $\Delta RR$  (b) representations with the same training sample ( $Q=33$ ). Top rows of sub-figures are full boundary spreads on the same scale, bottom rows are zoomed to  $(-0.55; 0.55)$  range.

Such changes in the interval distributions affect the resulting quantization boundaries. As can be seen in Fig. 3, the quantization boundaries for  $\Delta 5RR$  when compared to  $\Delta RR$  were more consolidated around zero, but spread further when removed from zero. This was reflected in symbolic images of interval sequences in Fig. 2. The prefix before the peaks, reflecting a regular rhythm before an unscheduled heart contraction, appeared in the  $\Delta RR$  representation as "H-H-H-H-I-H-H-I-H-H-H-I-H". This is evidently a more homogeneous string than "H-H-I-H-I-H-H-H-J-I-H-

I-I-J" in the  $\Delta 5RR$  representation. A similar effect was observed for the last three interval positions, appearing as "H-H-H" in  $\Delta RR$ -representation and "G-I-H" in  $\Delta 5RR$ -representation. In other words, we can assume that the  $\Delta 5RR$  scheme makes it possible to obtain a quantizer that is more sensitive to the instantaneous changes in heart rhythm that are characteristic of arrhythmias. Differences in compression distances (Fig. 1) are a consequence of this effect.

### 3.2 Hyperparameter grid test

Since the classification model has only two hyperparameters  $Q$  and  $k$ , we conducted a grid test of classification quality. For this purpose, a full dataset validation was performed for each pair of hyperparameters from the Cartesian product of subsets  $Q = \{30, 33, 36, \dots, 114, 117\}$  and  $k = \{1, 3, 5, \dots, 499, 501\}$ . Results in the form of average MCC heatmaps for windows  $M = 32, 64, 128$  using the  $\Delta RR$  representation are shown in Fig. 4.

According to the obtained heatmaps, alphabet size had a negligible effect on the classification quality for small window  $M = 32$ , but larger alphabet size improves the classification quality for larger windows  $M = 64$  and  $128$ . The heat maps are given for the  $\Delta RR$  scheme, but other representations showed a similar trend. For the remainder of the paper,  $Q$  was fixed (Table 2). For windows  $M = 64, 128$  the same alphabet size  $Q = 102$  was selected. For  $M = 32$  it was fixed to  $Q = 39$ . These values were selected as the highest classification quality was achieved for them. A more detailed statistical analysis of the model classification results with respect to the number of neighbours  $k$  with fixed  $Q$  is given in the following sections.

### 3.3 Classification on the full dataset

In this section, we present the full dataset classification results with quality comparison between RR,  $\Delta RR$  and  $\Delta 5RR$  sequence representations for the three investigated window sizes.

Fig. 5a shows the changes in average MCC scores and their 95% confidence intervals upon the number of nearest neighbors  $k$  for window  $M = 128$ . Confidence intervals for each representation here and below were constructed using the bootstrapping method [17], as the classification quality scores do not follow normal distribution laws. For a large window size, the  $\Delta 5RR$  representation significantly outperformed the  $\Delta RR$  representation in terms of classification quality. The confidence intervals of the baseline RR representation overlapped with  $\Delta RR$  for some optimal values of  $k$ , but generally showed a deterioration in classification quality with the increase of the number of nearest neighbors.

Analogous graphs for window  $M = 64$  are shown in Fig. 5b. As in the previous case, the classification quality for  $\Delta 5RR$  was significantly higher than for  $\Delta RR$ . The basic RR representation was behind both finite-difference representations.

Fig. 5c shows the MCC scores for small window  $M = 32$ . In this case we cannot confirm the advantage of one finite-difference representation over the other due to the intersection of the confidence intervals with the average curves. However, the classification quality of the baseline RR representation remained below that of the two finite-difference representations.

Presented graphs show that the MCC curves rose for small values of  $k$ , peaking for  $k \leq 89$  and then entering a slow decline. Peak  $k$  values varied between different  $M$  and sequence representations. Empirically, in order to achieve high classification quality, we suppose that  $k$  can be chosen as follows:

$$k_{\text{empiric}} = \text{odd}(\sqrt[3]{N}), \quad (15)$$

where  $N$  is the number of observations in the training sample,  $\text{odd}(\cdot)$  is rounding to the nearest odd number.

Aggregated quality scores for classifiers with empirically derived  $k$  comparing all sequence representations in terms of MCC, sensitivity and specificity are presented in Table 3. Using  $\Delta 5RR$

scheme instead of  $\Delta RR$  resulted in significantly better classification quality for medium and large window lengths ( $M = 64, 128$ ), as confirmed by the averages and confidence intervals of MCC. The classification model performed best for window  $M = 128$ , where  $\Delta SRR$  achieved 96.37% sensitivity and 97.74% specificity, and  $\Delta RR$  achieved 87.78% sensitivity and 99.00% specificity. The use of  $\Delta RR$  representation led to higher classification specificity at the expense of sensitivity. This result confirms the assumptions about the sensitivity and specificity of the classification model made in Section 3.1 based on the analysis of the distance matrices (Fig 1). This means that the use of a five-point finite difference scheme can reduce the number of false-negative predictions, and therefore provide a more pathology-sensitive model.

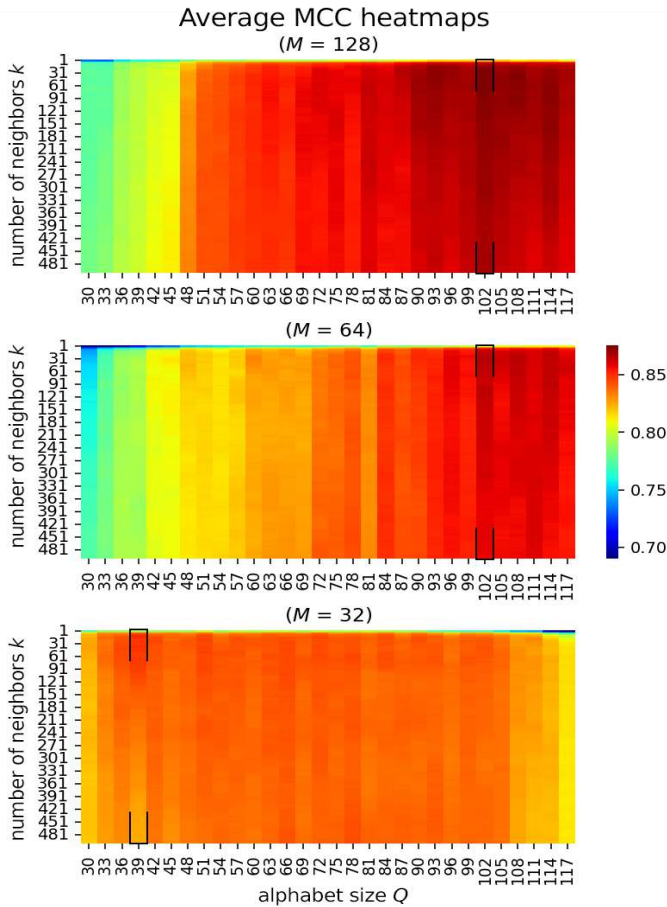


Fig. 4. Heatmaps of average MCC scores using full dataset validation on a  $k \times Q$  hyperparameter grid. The maps are presented for three investigated windows  $M$  with the fixed  $\Delta RR$  scheme.

Table 2. Fixed values of parameter  $Q$  relative to window size  $M$ .

Window $M$	Fixed $Q$
32	39
64	102
128	102

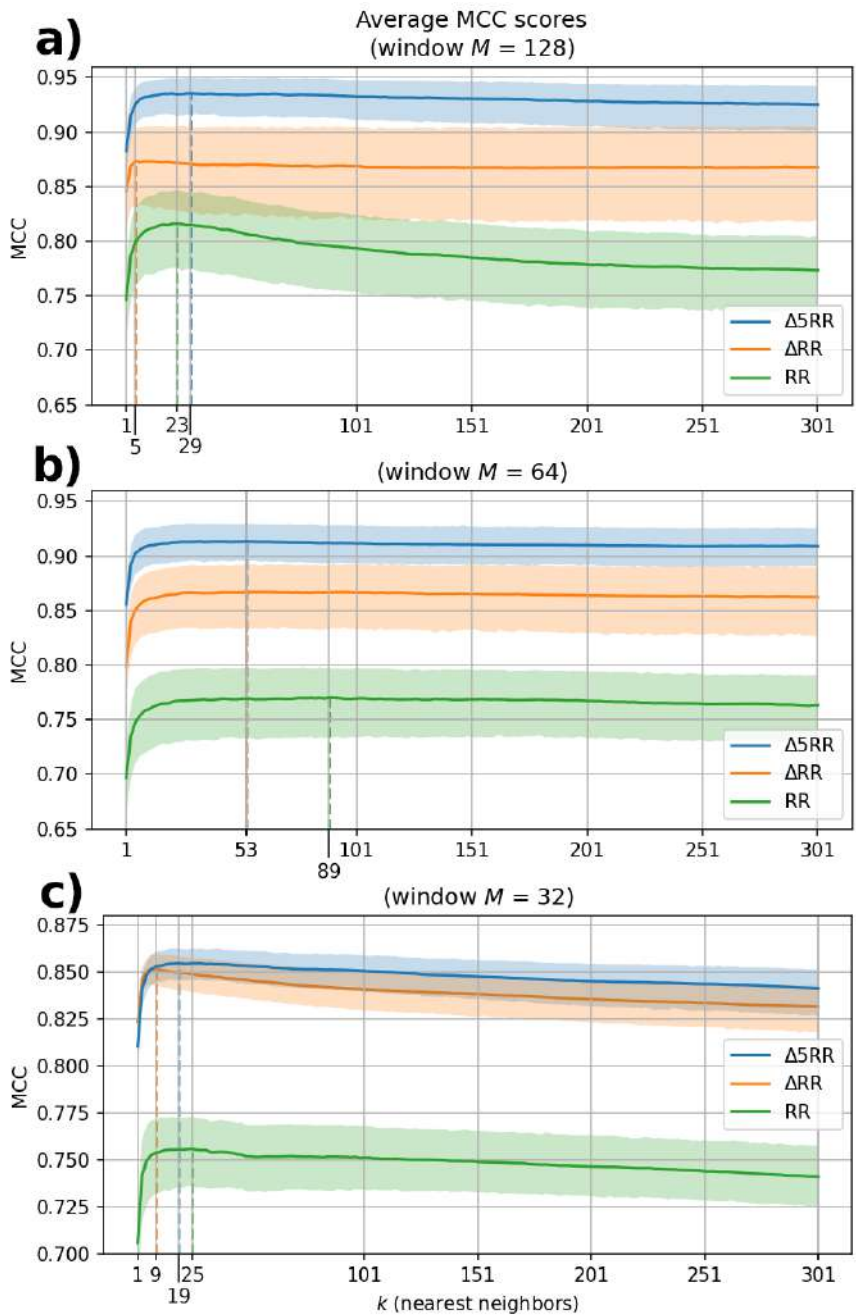


Fig. 5. Graphs showing dependence of average MCC scores on the number of neighbours  $k$  per sequence representation. 95% confidence intervals were calculated using the bootstrapping method [17]. Dashed lines indicate the highest scores achieved for each of the three representations. Subfigures **a**, **b** and **c** correspond to windows  $M = 128$ , 64 and 32 respectively.

The above results allow us to conclude that both finite-difference representations significantly outperform the baseline  $RR$  representation in terms of classification quality for all considered  $M$ .

Therefore, in the next section on the few-shot learning validation procedure, the results of only  $\Delta RR$  and  $\Delta 5RR$  representations are reported as clearly preferred approaches.

Table 3. Classifiers in terms of average MCC, sensitivity and specificity with empirically derived values of  $k$  in the full dataset  $8 \times 5$ -fold cross-validation setting.

$\Delta 5RR$						
$M$	$k_{empiric}$	CI-	Average MCC	CI+	Average sensitivity	Average specificity
32	$k=31$	0.845	0.854	0.862	93.89%	91.87%
64	$k=25$	0.895	0.913	0.929	95.05%	96.84%
128	$k=19$	0.916	0.935	0.949	96.37%	97.74%
$\Delta RR$						
$M$	$k_{empiric}$	CI-	Average MCC	CI+	Average sensitivity	Average specificity
32	$k=31$	0.838	0.848	0.857	94.90%	90.36%
64	$k=25$	0.833	0.866	0.890	88.55%	97.94%
128	$k=19$	0.829	0.874	0.906	87.78%	99.00%
RR						
$M$	$k_{empiric}$	CI-	Average MCC	CI+	Average sensitivity	Average specificity
32	$k=31$	0.736	0.755	0.772	80.68%	93.52%
64	$k=25$	0.729	0.767	0.796	79.28%	96.53%
128	$k=19$	0.773	0.815	0.845	82.29%	97.87%

### 3.4 Classification on the external dataset

This section presents results of external dataset classification. MITDB was the classified test sample, AFDB was the training sample. Hyperparameters  $Q$  and  $k$  were selected according to Table 2 and expression (15) in preceding sections. We conducted the experiments with both finite-difference representations and three window sizes. Results are provided in Table 4.

A satisfactory result was observed for the medium window  $M = 64$  with  $\Delta 5RR$  scheme leading to 96.77% sensitivity, 96.00% specificity and 0.829 MCC. The best classification quality was achieved for the large window  $M = 128$ , with similar specificity (98.46% and 96.71%) and sensitivity (both 97.96%) between  $\Delta 5RR$  and  $\Delta RR$ . However, even a small increase in the number of false-positive predictions with  $\Delta RR$  (reflected in specificity) caused a considerable reduction of the MCC score (0.916 against 0.840 for  $M = 128$ ). This was due to a significantly uneven class distribution in MITDB (see Table 1).

The impact of imbalanced classes was especially evident in the case of  $M = 32$ . Classification of smaller interval sequences led to a significant increase in false positives with a marked effect on MCC. Sensitivity was quite high, but 87.45% and 83.45% specificity for  $\Delta 5RR$  and  $\Delta RR$  representations resulted in 0.646 and 0.591 MCC scores.

Table 4. Classifiers in terms of average MCC, sensitivity for external dataset classification.

$\Delta 5RR$			
$M$	MCC	Sensitivity	Specificity
32	0.646	96.54%	87.45%
64	0.829	96.77%	96.00%
128	0.916	97.96%	98.46%
$\Delta RR$			
$M$	MCC	Sensitivity	Specificity
32	0.591	97.58%	83.45%
64	0.757	98.39%	93.00%
128	0.840	97.96%	96.71%

Outlined test results provide further evidence of the proposed model's high classification quality, especially for medium and large sequence windows. For short windows  $M = 32$  the quality may be further improved with additional hyperparameter tuning. Curiously, in contrast to the previous section, the use of the  $\Delta 5RR$  scheme improved the specificity of the classification rather than the sensitivity. This may be due to differences in the datasets, as subjects in MITDB were affected by a broader range of heart rhythm conditions, while in AFDB the majority were AF only.

### 3.5 Few-shot learning

This subsection presents classification results under the limited dataset condition where training samples consisted of  $n$  observations per two rhythm classes. The few-shot learning validation was performed for  $n = 5, 10, 20, 50, 100$ . The number of nearest neighbors for each  $n$  was fixed at  $k = \text{odd}(\sqrt{(2 \times n)})$  (square root instead of cubic root in (15)).  $\Delta RR$  and  $\Delta 5RR$  representations were compared between three investigated window sizes. As all training samples corresponded to the same rhythm episodes in different interval representations, the Wilcoxon test with Benjamini-Hochberg correction [18] was used to assess the significance of differences between  $\Delta RR$  and  $\Delta 5RR$  ( $\alpha = 0.05$ ).

For the window  $M = 128$ , the classification results are shown as box plots in Fig. 6a. One can see that the median MCC values were quite high, but for  $n = 5$  there were significant outliers down to  $MCC = 0$ . The latter indicates the occurrence of small samples leading to completely incorrect classifications. For each value of  $n$ , there was a significant advantage of the  $\Delta 5RR$  representation over  $\Delta RR$ , confirmed by the Wilcoxon criterion with multiple test correction (all  $p$ -values  $< 0.001$ ).

In turn, for window  $M = 64$ , classification results are presented in Fig. 6b. The use of shorter sequences for classification led to an increase in the spread of MCC scores and a higher number of outliers for  $n = 5, 10$ , which reduced the classification quality. The advantage of the  $\Delta 5RR$  representation for classification was still observed (highest  $p = 0.027$  for  $n = 5$ ).

For window  $M = 32$ , results are shown in Fig. 6c. Similar to the classification on the full dataset, there was no clear advantage of the  $\Delta 5RR$  scheme over  $\Delta RR$  when using short sequences. In this

case, for  $n = 5$  the Wilcoxon test did not show a statistically significant difference ( $p = 0.138$ ). For  $n = 5, 10$ , there was also a wide spread of MCC scores and a large number of outliers.

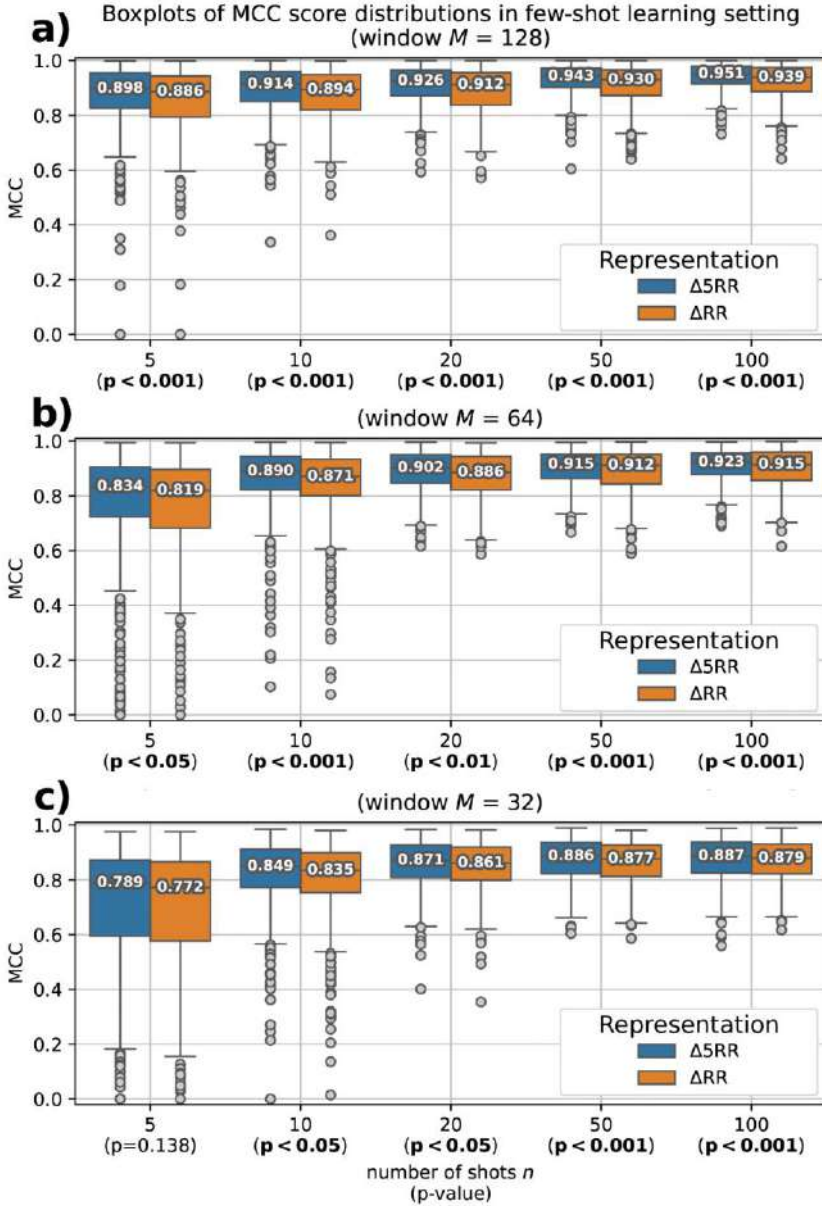


Fig. 6. Boxplots showing distributions of MCC scores in the few-shot learning setting for varying shots  $n$ . Numbers on boxes are MCC medians, boxes represent the interquartile range, whiskers show the edges of significant values within the radius of  $IQR \times 1.5$ , grey dots show outliers. Also presented are multiple test adjusted p-values of the Wilcoxon criterion for each  $n$ . Subfigures a, b and c correspond to windows  $M = 128, 64$  and  $32$  respectively.

Based on the results presented, we can say that the proposed classification model has a high generalization capability. For medium and large windows ( $M = 64, 128$ ), the  $\Delta 5RR$  scheme allows a significant increase of the classification quality. Requirement to the number of samples  $n$  for stable classification depends on the window size. For  $M = 32$ , a minimum of 20 observations of the two

rhythm classes is preferred, which was  $\approx 0.0011\%$  of the full sample (Table 1), achieving a median MCC of 0.871. For  $M = 128$ , at least 10 observations of each rhythm are preferred for stable classification, which was  $\approx 0.0023$  of the full sample (Table 1), achieving a median MCC of 0.914. In general, the model demonstrates high classification quality in the few-shot learning setting, but increasing the window  $M$  and expanding the training sample leads to better results. It is worth noting that the small training samples were randomly selected from interbeat interval sequences of 20 patients, while the test samples consisted of the full set of sequences from 5 patients. This means that a good practice for classification with a limited data set is to use observations from different patients.

#### 4. Discussion and Conclusions

In this paper we proposed the classification model using information compression and numerical differentiation of interbeat interval sequences to detect AF on ECG. A finite-difference scheme which improves classification by compression when applied to interval sequences was proposed. We explored the choice of hyperparameters  $k$  and  $Q$ , three representations of interbeat interval sequences, the size  $M$  of the R-peak segment window.

As a method for arrhythmia detection, the model achieves strong results. With a segment window size of  $M = 64$  (corresponding to 45-60 seconds of ECG), the model achieved a mean sensitivity of 95.05% and a mean specificity of 96.84% with  $8 \times 5$ -fold cross-validation on the full AFDB set. With a wider window size of  $M = 128$  (90-120 seconds ECG), the model achieved a mean sensitivity of 96.37% and a mean specificity of 97.74%. For a short window of  $M = 32$  (22-30 seconds ECG), the model achieved a mean sensitivity of 93.89% and a mean specificity of 91.87%. Using MITDB as the external test set and AFDB as the training set the model achieved 97.96% sensitivity and 98.46% specificity for the window  $M = 128$ . However, the main advantage of the method lies in the quality of classification in the few-shot learning setting, where 10-20 observations of two rhythm types are sufficient to classify entire test samples.

The results obtained on the open MIT-BIH AFDB database let us compare the proposed model with published works. The compression-based classification has the following advantages over other AF detection methods:

- Tateno's model [8] was proposed in one of the key studies in the field. This paper proposed the use of  $\Delta RR$ -interval sequences for classification. The methodology involved histogram-template matching. In this study, 94.4% sensitivity and 97.2% specificity were achieved for a window size of  $M = 100$  with AFDB and MITDB being used as respective training and test samples. However, the classification performance is significantly reduced for shorter sequences. In our work, we proposed a  $\Delta 5RR$ -interval representation, which improved the classification quality compared to  $\Delta RR$ .
- Andersen's work [19] explores the possibility of AF classification using a support vector machine model. The authors claimed 96.8% sensitivity and 96% specificity for window  $M = 100$  with fivefold cross-validation on AFDB (but without multiple validation repeats, unlike our work). Fivefold cross-validation purports 80-20 train-test split and the authors did not investigate classification using a more conservative data division. Presumably this is due to kernel models such as support vector machine requiring a significant amount of data for training and generalization.
- Neural network classifiers such as Xia's [20] show some of the best results in terms of quality (98.7% sensitivity, 98.9% specificity). However, neural network models require significant computational resources, and are prone to overfitting [6].

The few-shot learning paradigm originated in the field of neural networks, where classification models have achieved widespread success with large amounts of data, but struggled in applications with small available datasets. A significant amount of published work in this area has focused on

improving pre-trained models with available prior knowledge [21]. From rhythm detection applications, a transfer learning of a large pre-trained neural network model was conducted in work [22] using a small number of ECG recordings of 30-180 seconds duration for personalized AF classification. The great advantage of the model proposed in this paper is that it requires no prior information: the hypothesis space is completely determined by the used training sample. Therefore, it may be promising to use our approach to build truly personalized classifiers.

During the model validation and testing of different sequence representations, it was shown that the numerical  $\Delta 5RR$  scheme introduced in our work outperforms  $\Delta RR$  in most cases (in particular for windows  $M = 64, 128$ ). The result of the  $\Delta 5RR$  representation can be explained by the higher order of accuracy of the five-point scheme compared to the three-point scheme. This gives more emphasis to sudden rhythm fluctuations and leads to a more sensitive sequence quantizer (Fig. 2, 3).

The disadvantage of the proposed classification model is the computational demand when dealing with large amounts of data. To classify a sample of size  $l$  using a training sample of size  $n$ , it is necessary to compute a distance matrix of  $l \times n$  dimensions, which involves compression of all individual sequences and all pairwise concatenations. This leads to a time complexity of at least  $O(l \times n + n + l)$ . That is why, from a practical point of view, it is of utmost importance that the presented model demonstrates high classification performance on small training samples.

It should be noted that gzip compression is often optimized at the hardware level [23]. This, together with the model's low data and memory requirements, makes classification with compression particularly promising for low-energy medical devices: ECG Holter monitors, portable electronics, telemedicine and remote patient monitoring. Due to proposed model's generalization capability, its practical healthcare use could be preferable to "compressed" neural network classifiers of heart rhythms. Such models use a reduced number of hidden parameters and layers to lower complexity and increase the inference performance, making them more suitable for wearable devices [24]. However, it is currently postulated that neural networks with higher number of hidden parameters lead to better generalization [25]. Introducing shallow networks into medical practice may require their costly retraining to each local population. In contrast, our model may be more easily adapted to population shift with a few rhythm observations.

It is of further interest to extend the model to multi-class classification. Atrial fibrillation is one of the most common heart diseases and it is important to investigate detection of rarer arrhythmias. Since normalized compression distance was initially proposed for clustering tasks [12], there is another prospect of non-supervised learning without labeling cardiac interval sequences into rhythms.

Normalized compression distance was originally invented for time series of discrete states, such as texts and discrete sequences [7]. In turn, the classification model proposed in this paper is suitable for monotonic stochastic sequences. The methodology considered, involving differentiation of sequences, quantization and compression distances, was also used by the author to classify subjects with dyslexia using eye-tracking data [26]. Thus, we can expect further results of the present model in other applications.

## References

- [1]. Staerk L., Sherer J. A., Ko D., Benjamin E. J., Helm R. H. Atrial fibrillation: epidemiology, pathophysiology, and clinical outcomes. *Circulation research*, vol. 120, issue 9, 2017, pp. 1501-1517. DOI:10.1161/CIRCRESAHA.117.309732.
- [2]. Faust O., Ciaccio E. J., Acharya U. R. A review of atrial fibrillation detection methods as a service. *International journal of environmental research and public health*, vol. 17, issue 9, 2020, p. 3093. DOI:10.3390/ijerph17093093.
- [3]. Moody G. B., Mark R. G. The impact of the MIT-BIH arrhythmia database. *IEEE engineering in medicine and biology magazine*, vol. 20, issue 3, 2001, pp. 45-50. DOI:10.1109/51.932724.

- [4]. D'Aloia M., Longo A., Rizzi M. Noisy ECG signal analysis for automatic peak detection. *Information*, vol. 10, issue 2, 2019, p. 35.
- [5]. Georgiou K., Larentzakis A. V., Khamis N. N., Alsuhaibani G. I., Alaska Y. A., Giallafos E. J. Can wearable devices accurately measure heart rate variability? A systematic review. *Folia medica*, vol. 60, issue 1, 2018, pp. 7-20. DOI:10.2478/folmed-2018-0012.
- [6]. Zhou K., Liu Z., Qiao Y., Xiang T., Loy C. C. Domain generalization: A survey. *IEEE transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 45, issue 4, 2004, pp. 4396-4415. DOI:10.1109/TPAMI.2022.3195549.
- [7]. Li M., Chen X., Li X., Ma B., Vitányi P. M. B. The similarity metric. *IEEE transactions on Information Theory*, vol. 50, issue 12, 2004, pp. 3250-3264. DOI:10.1109/TIT.2004.838101.
- [8]. Tateno K., Glass L. Automatic detection of atrial fibrillation using the coefficient of variation and density histograms of RR and  $\Delta$ RR intervals. *Medical and Biological Engineering and Computing*, vol. 39, 2001, pp. 664-671. DOI:10.1007/BF02345439.
- [9]. Fornberg B. Generation of finite difference formulas on arbitrarily spaced grids. *Mathematics of computation*, vol. 51, issue 184, 2017, pp. 699-706. DOI:10.1090/S0025-5718-1988-0935077-0.
- [10]. David A., Sergei V. k-means++: The Advantages of Careful Seeding. In *Proceedings of the eighteenth annual ACM-SIAM symposium on Discrete algorithms*, 2007, pp. 1027-1035. Available at the URL: <http://ilpubs.stanford.edu:8090/778/>.
- [11]. Gailly J.L., Adler M. GNU gzip. GNU Operating System, 1992. Available at the URL: <https://www.gnu.org/software/gzip/manual/gzip.pdf>.
- [12]. Cilibrasi R., Vitányi P. M. B. Clustering by compression. *IEEE Transactions on Information theory*, vol. 51, issue 4, 2005, pp. 1523-1545. DOI:10.1109/TIT.2005.844059.
- [13]. Bennett C. H., Gács P., Li M., Vitányi P. M. B., Zurek W. H. Information distance. *IEEE Transactions on information theory*, vol. 44, issue 4, 1998, pp. 1407-1423. DOI:10.1109/18.681318.
- [14]. Goldberger A. L., Amaral L. A. N., Glass L., Hausdorff J. M., Ivanov P. C., Mark R. G., Mietus J. E., Moody G. B., Peng C. K., Stanley H. E. PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: components of a new research resource for complex physiologic signals. *Circulation*, vol. 101, issue 23, 2000, pp. e215-e220. DOI: 10.1161/01.CIR.101.23.e21.
- [15]. Moody G. A new method for detecting atrial fibrillation using RR intervals. *Proc. Comput. Cardiol.*, vol. 10, 1983, pp. 227-230.
- [16]. Chicco D., Jurman G. The Matthews correlation coefficient (MCC) should replace the ROC AUC as the standard metric for assessing binary classification. *BioData Mining*, vol. 16, issue 1, 2023, p. 1. DOI:10.1186/s13040-023-00322-4.
- [17]. Efron B. Bootstrap methods: another look at the jackknife. *Breakthroughs in statistics: Methodology and distribution*. In *Breakthroughs in Statistics*. Springer Series in Statistics. New York, Springer, 1992, pp. 569-593. DOI:10.1007/978-1-4612-4380-9\_41.
- [18]. Benjamini Y., Hochberg Y. Controlling the false discovery rate: a practical and powerful approach to multiple testing. *Journal of the Royal statistical society: series B (Methodological)*, vol. 57, issue 1, 1995, pp. 289-300. DOI: 10.1111/j.2517-6161.1995.tb02031.x.
- [19]. Andersen R. S., Poulsen E. S., Puthusserypady S. A novel approach for automatic detection of Atrial Fibrillation based on Inter Beat Intervals and Support Vector Machine. In *2017 39th annual international conference of the IEEE engineering in medicine and biology society (EMBC)*. New York, IEEE, 2017. pp. 2039-2042. DOI:10.1109/EMBC.2017.8037253.
- [20]. Xia Y., Wulan N., Wang K., Zhang H. Detecting atrial fibrillation by deep convolutional neural networks. *Computers in biology and medicine*, vol. 93, 2018, pp. 84-92. DOI: 10.1016/j.compbiomed.2017.12.007.
- [21]. Wang Y., Yao Q., Kwok J. T., Ni L. M. Generalizing from a few examples: A survey on few-shot learning. *ACM computing surveys*, vol. 53, issue 3, 2020, pp. 1-34. DOI:10.1145/3386252.
- [22]. Ng Y., Liao M. T., Chen T. L., Lee C. K., Chou C. Y., Wang W. Few-shot transfer learning for personalized atrial fibrillation detection using patient-based siamese network with single-lead ECG records. *Artificial Intelligence in Medicine*, vol. 144, 2023, p. 102644. DOI: 10.1016/j.artmed.2023.102644.
- [23]. Abdelfattah M. S., Hagiescu A., Singh D. Gzip on a chip: High performance lossless data compression on fpgas using opencl. In *Proceedings of the international workshop on openCL 2013 & 2014*. New York, ACM, 2014. pp. 1-9. DOI: 10.1145/2664666.2664670.

- [24]. Lee K.-S., Park H.-J., Kim J.E., Kim H.J., Chon S., Kim S., Jang J., Kim J.-K., Jang S., Gil Y., Ho S.S. Compressed deep learning to classify arrhythmia in an embedded wearable device. *Sensors*. vol. 22, issue 5, 2022, p. 1776. DOI: 10.3390/s22051776.
- [25]. Yang Z., Yu Y., You C., Steinhardt J., Ma Y. Rethinking bias-variance trade-off for generalization of neural networks. In *Proceedings of the 37th International Conference on Machine Learning*. Brookline, JMLR, 2020. pp. 10767-10777. URL: <https://proceedings.mlr.press/v119/yang20j.html>.
- [26]. Abrosimova M., Rebak A., Novikov R., Markov N. Classification with PPMd Compression in Few-Shot Learning: The Case of Eye-Tracking Dyslexia Detection. In *2024 IEEE Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT)*. New York, IEEE, 2024. pp. 204-207. DOI:10.1109/USBREIT61901.2024.10583975.

### ***Информация об авторах / Information about authors***

Никита Сергеевич МАРКОВ – младший научный сотрудник лаборатории трансляционной медицины и биоинформатики Института иммунологии и физиологии УрО РАН, ассистент кафедры вычислительной математики и компьютерных наук Уральского федерального университета. Сфера научных интересов: машинное обучение в физиологии и медицине, машинное обучение с малым количеством проб, обработка биомедицинских сигналов, высокопроизводительные вычисления, математическое моделирование в биофизике.

Nikita Sergeevich MARKOV – junior researcher at the Laboratory of Translational Medicine and Bioinformatics of the Institute of Immunology and Physiology UrB RAS, assistant at the Department of Computational Mathematics and Computer Science of the Ural Federal University. Research interests: machine learning in physiology and medicine, few-shot learning, biomedical signal processing, high-performance computations, mathematical modeling in biophysics.

