

DOI: 10.15514/ISPRAS-2026-38(3)-16



Математическое моделирование процесса обледенения изолятора ЛЭП

С.В. Стрижак, ORCID: 0000-0001-5525-5180 <s.strijhak@ispras.ru>

К.Б. Кошелев, ORCID: 0000-0002-7124-3945 <k.koshelev@ispras.ru>

А.В. Осипов, ORCID: 0000-0001-9223-4274 <a.osipov@ispras.ru>

*Институт системного программирования им. В.П. Иванникова РАН,
Россия, 109004, г. Москва, ул. А. Солженицына, д. 25.*

Аннотация. В статье рассматривается возможность решателя iceFoam, разработанного в ИСП РАН на базе открытой библиотеки OpenFOAM, для моделирования процесса обледенения изолятора линии электропередач (ЛЭП). Исследуются возможности применения открытых программных комплексов OpenFOAM, Paraview для моделирования процессов обледенения изолятора ЛЭП с использованием решения системы уравнений Навье-Стокса для многофазной среды на динамической подвижной сетке. Моделирование проведено для случая обтекания модели изолятора ЛЭП, расположенного в расчетной области, с заданным распределением начальных физических параметров для скорости, температуры, влажности, размера капель. В результате расчета получены поля скорости, давления, температуры, масса льда. Расчетная область представляла собой куб с размерами стороны в 5.6 метра. Расчетная неструктурированная сетка включала в себя 1.5 млн расчетных ячеек. Были выполнены расчеты для случая обтекания и обледенения изолятора с напряжением 110 кВ по времени на 200 секунд. Один типовой расчет запускался на 96 вычислительных ядрах и выполнялся по времени около 4 суток. Визуализация результатов расчета выполнена в пакете Paraview с использованием технологии фильтров и программных скриптов. Показано, что картина льда на внутренних фрагментах изолятора существенно отличалась от картины на краевых деталях. Значительные величины турбулентной вязкости наблюдались в подветренной области изолятора. Расчеты были проведены на вычислительном кластере ИСП РАН UniHUB.

Ключевые слова: горный район; снег; осадки; ЛЭП; изолятор, моделирование; область; сетка; капли; скорость; давление; температура; пленка; лед; расчет; вычислительный кластер; визуализация.

Для цитирования: Стрижак С.В., Кошелев К.Б., Осипов А.В., Математическое моделирование процесса обледенения изолятора ЛЭП. Труды ИСП РАН, том 38, вып. 3, часть 1, 2026 г., стр. 257–268. DOI: 10.15514/ISPRAS-2026-38(3)-16.

Mathematical Modeling of the Icing Process of a Power Line Insulator

S.V. Strijhak, ORCID: 0000-0001-5525-5180 <s.strijhak@ispras.ru>

K.B. Koshelev, ORCID: 0000-0002-7124-3945 <k.koshelev@ispras.ru>

A.V. Osipov, ORCID: 0000-0001-9223-4274 <a.osipov@ispras.ru>

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

Abstract. The article discusses the possibility of the iceFoam solver, developed at the ISP RAS on the basis of the OpenFOAM library, for modeling the icing process of various bodies. The possibilities of using OpenFOAM and Paraview open software systems for modeling the icing processes of an insulator of a power transmission line (power line) using the solution of a system of Navier-Stokes equations for a multiphase medium on a dynamic moving grid are being investigated. The simulation was carried out for the case of a flow around a model of a power line insulator located in the computational domain, with a given distribution of initial physical parameters for velocity, temperature, water content, and droplet size. As a result of the calculation, the fields of velocity, pressure, temperature, and mass of ice are obtained. The calculated area was a cube with a side dimension of 5.6 meters. The calculated unstructured grid included 1.5 million calculated cells. The calculations were performed for the case of flow and icing of an insulator with a voltage of 110 kV for 200 seconds. One typical calculation was run on 96 computer's cores and took about 4 days to complete. Visualization of the calculation results is performed in the Paraview package using filter technology and software scripts. It is shown that the ice pattern on the inner fragments of the insulator was significantly different from the pattern on the edge parts. Significant amounts of turbulent viscosity were observed in the leeward region of the insulator. The calculations were performed on the high-performance cluster UniHUB of the ISP RAS.

Keywords: mountainous region; snow; precipitation; power line; insulator; modeling; area; grid; drops; velocity; pressure; temperature; film; ice; calculation; high performance cluster; visualization.

For citation: Strijhak S.V., Koshelev K.B., Osipov A.V. Mathematical modeling of the icing process of a power line insulator. *Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS*, vol. 38, issue 3, part 1, 2026, pp. 257-268 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2026-38(3)-16.

1. Введение

Изучение процессов образования и нарастания льда на телах различной формы является актуальной задачей для территории России. Предотвращение аварийных ситуаций, связанных с обледенением крыла самолета и элементов линий электропередач (ЛЭП), лопастей ветроэлектрических установок (ВЭУ), является важной задачей для жизни людей. Как правило, образовавшийся лед бывает различной формы (шероховатый, рогообразный, барьерный) и различается по своему составу (прозрачный, рыхлый, смешанный) [1-3].

В связи с развитием малой региональной авиации, масштабным строительством ЛЭП и ветропарков все большему числу транспортных средств приходится пересекать районы с сильными осадками, такие как горы и долины.

В результате выпадения осадков в зимнее месяцу года проблемы с обледенением ЛЭП неизбежны в горных и северных районах РФ. На территории Краснодарского края в районе большого Сочи и в Адлерском районе в горной местности эксплуатируется большое количество зданий, ЛЭП и подстанций, которые рассчитаны на разное напряжение 10кВ-110кВ. Например, процессы обледенения ЛЭП могут возникать в районе горнолыжных курортов "Красная Поляна" и "Роза Хутор", и приводить к обрыву проводов и технологическим авариям.

Гололёдно-изморозевые отложения (ГИО) – подтверждённая причина аварийности на ЛЭП. Наросты льда увеличивают вес проводов до 5-10 раз.

С 2013 по 2024 годы на ВЛ АО «Россети Тюмень» произошло 415 отключений линии по

причине образования и сброса ГИО. Годовые потери от обледенений достигали 20–30 млн руб., без учёта штрафов и социальных издержек.

Известно, что существуют различные формы и типа льда, которые зависят от изменения метеопараметров (скорость, температура, влажность, размер капель, время). Лед и снег могут нарастать на высоковольтных проводах и изоляторах ЛЭП в зимнее время года.

Для предотвращения пробоя на ЛЭП используются изоляторы разной формы. Что касается работы изоляторов ЛЭП, то наледь серьезно снижает напряжение пробоя, что приводит к ряду аварий с электрической изоляцией, таких как пробой и заземление, ставя под угрозу безопасную работу электросети. В течение длительного времени исследователи по всему миру проводили большое количество испытаний изоляторов, покрытых льдом, на пробой при обледенении и получили характеристики пробоя при обледенении, которые стали важными рекомендациями для инженерных применений. Между тем, было установлено, что нарастающая ледяная масса и форма льда оказывают большое влияние на работоспособность изоляторов. Композитные изоляторы широко используются в электросетях благодаря своему небольшому весу и отличным характеристикам защиты от загрязнения, особенно в ЛЭП сверхвысокого и сверхвысокочастотного напряжения. Существующие исследования показывают, что характеристика пробоя льда в композитном изоляторе тесно связана с его геометрической формой и структурой материала.

В работах [4-6] было проведено исследование процесса льдообразования на фрагменте изолятора и провода ЛЭП. В данных работах было выполнено сравнение экспериментальных и расчетных результатов. Однако, для изучения авторами использовалась уменьшенная в размерах модель фрагмента изолятора. В тоже время известно, что любую математическую модель обледенения практически невозможно корректно записать в безразмерной форме, хотя бы потому, что размер переохлажденных капель воды в набегающем потоке не меняется при изменении размеров обтекаемого тела.

2. Математическая модель

Ранее был разработан решатель iceFoam для моделирования процесса нарастания льда для тел простой и сложной формы [7-9]. В основе математической модели решателя iceFoam используется Эйлер-Лагранжев подход для описания сжимаемой среды, метод контрольных объема для решения системы уравнений для многофазной среды, модель жидкой пленки по теории мелкой воды, модель перестроения геометрии твердого тела, модель подвижной динамической расчетной сетки [10].

Были разработаны три версии решателя, которые апробированы и протестированы. В результате исследования были получены формы льда для аэродинамических профилей NACA0012, GLC-305, Commercial Transport Airfoil, General Aviation Airfoil [8, 9]. Также были проведены трехмерные расчеты для двух модельных крыльев: крыла из эксперимента Prof. M. Papadakis и стреловидного крыла самолета-демонстратора [11-12].

Решатель iceFoam был протестирован для профилей лопасти ветроэлектрической установки, для модельного рыболовецкого судна с упрощенной геометрией рубки и палубы. Результаты расчетов сравнивались с данными экспериментов в аэроклиматических трубах для различных параметров окружающей среды.

В данной работе рассматривался пример с моделированием льда для изолятора линии ЛЭП с заданной формой, рассчитанным на напряжение в 110 кВ. Например, подобные изоляторы эксплуатируются на ЛЭП в районе большого Сочи и в Адлерском районе Краснодарского края РФ. Существуют также модели изоляторов, рассчитанные на напряжение в 10 кВ, 35 кВ. Для заданных параметров набегающего потока (скорость, температура, влажность, диаметр капель, угол атаки, время) было проведено исследование и расчет моделирования нарастания льда с использованием решателя iceFoam. Общая концепция решателя iceFoam представлена на рис.1. Решатель iceFoam включает в себя несколько программных модулей.

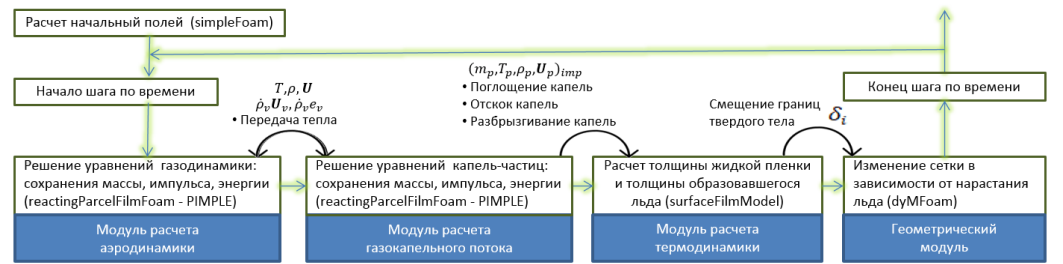


Рис. 1. Общая концепция решателя iceFoam.
Fig. 1. General concept of the iceFoam solver r.

Более подробная информация о решателе iceFoam, об используемой математической модели и методах решения системы уравнения для многофазной среды с учетом включения модели турбулентности, представлена в работах [7-9].

3. Постановка задачи

3.1 3D модель изолятора

Компания ПАО «Россети Кубань» эксплуатирует большое количество ЛЭП и подстанции на территории Краснодарского края РФ. В процессе эксплуатации оборудования сотрудниками фиксируется информация по аварийности электросетевых объектов, в том числе изоляторов, каждый год.

В работе была создана и исследована трехмерная упрощенная модель промышленного изолятора LK-70_110-IV GS UHL1, используемая на линиях электропередач с напряжением 110 кВ. Полная геометрия была восстановлена по двумерному чертежу в открытом пакете Salome в масштабе 1:1. Для построения качественной расчетной сетки модель изолятора была упрощена, некоторые мелкие элементы были удалены. В результате была подготовлена компьютерная модель изолятора и сохранена в файле с форматом STL. На рис.2 представлен общий вид данного изолятора.



Рис. 2. 3D модель изолятора.
Fig. 2. 3D model of insulator.

3.2 Построение расчетной сетки

Расчетная сетка была подготовлена в открытой библиотеке OpenFOAM v2019 с использованием утилиты cfMesh. Данная утилита умеет обрабатывать файл в формате STL и выстраивать качественную поверхностную сетку без искажения граней расчетных ячеек.

Расчетная сетка строилась для двух взаимно согласованных областей - обтекаемого газа (воздуха) и возможного образовавшегося тонкого слоя воды на поверхности изолятора. На первом этапе исследования количество ячеек в неструктурированной сетке для воздуха составило примерно 1,5 миллиона. На рис. 3 показана сетка на поверхности изолятора, а на рис. 4, 5 представлены общий вид сетки и более подробная структура сетки в плоскости симметрии изолятора.

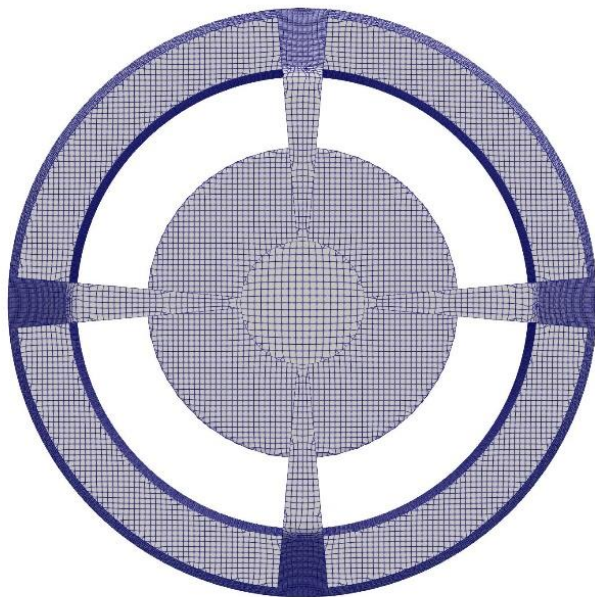


Рис. 3. Сетка по поверхности изолятора.
Fig. 3. Mesh on the surface of the insulator.

3.3 Расчетные параметры

Расчетная область для воздушного потока в случае полноразмерной модели изолятора была выбрана в форме куба с размером стороны 5,6 м. На входной границе задавалась скорость воздушного потока $V = 9$ м/с. Температура воздуха $T = 261,87$ К, на боковых границах задавались условия скольжения, на выходной границе задавались «мягкие» граничные условия. Переохлажденные капли воды в воздухе во входном сечении имели также скорость $V = 9$ м/с, водность (LWC) задавалась равной $LWC = 0,5$ г/м³, медианный диаметр капли (MVD) равнялся $d = 20$ мкм.

Для решения уравнений шаг по времени задавался $dt = 10^{-3}$ с. Финальное время расчета для физического процесса движения капель составило 200 секунд. За это время поток проходил всю расчетную область несколько раз.

Для формирования начальных данных с учетом анализа открытых данных об авариях на ЛЭП в ПАО «Россети Кубань» Сочинские ЭС Адлерский РЭС за 2021-2023 года была сформирована табл. 1 [13]. Таблица содержит диапазон изменения значений физических параметров для возможного формирования расчетных примеров в решателе iceFoam.

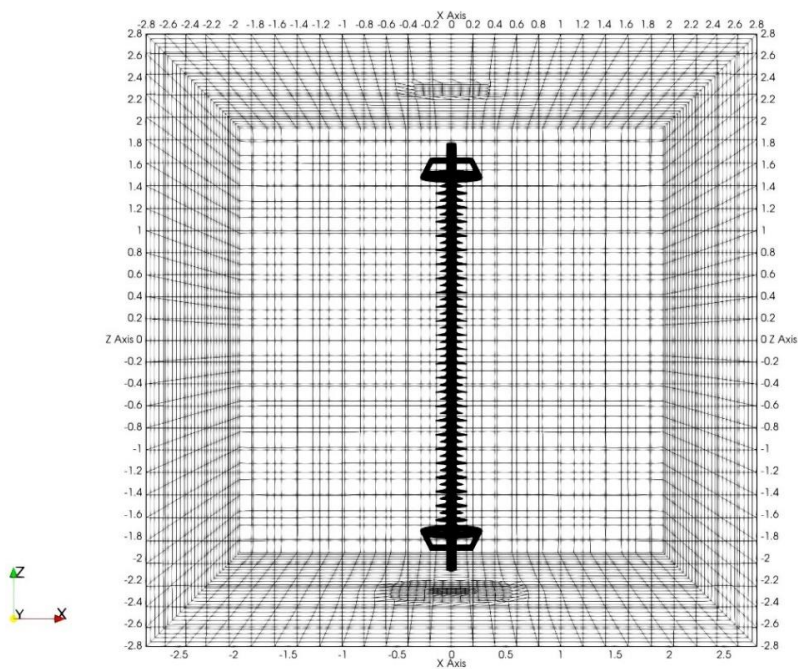


Рис.4. Общий вид сетки для воздуха.
Fig. 4. General view of the air mesh.

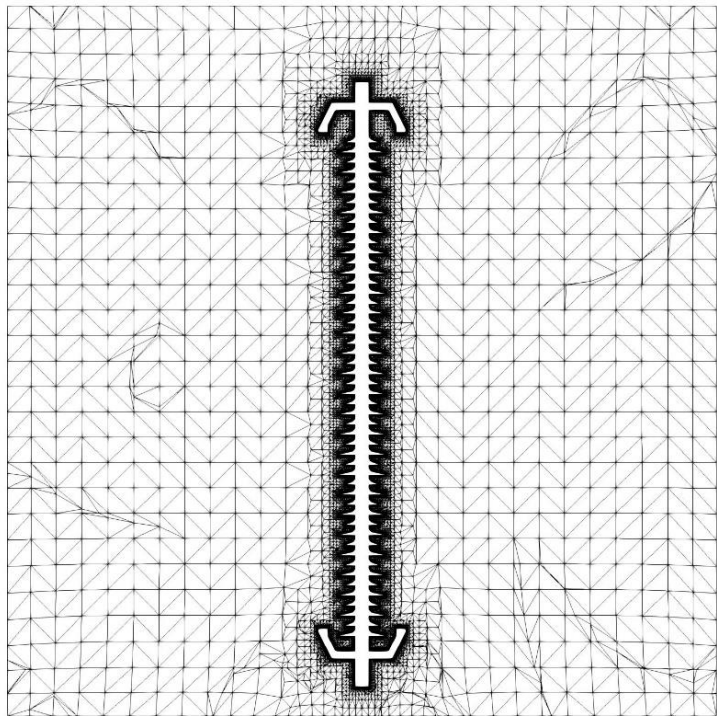


Рис.5. Вид сетки для воздуха вблизи изолятора.
Fig. 5. View of the air mesh near the insulator.

Табл. 1. Диапазоны основных параметров обледенения для проведения расчетов.

Table 1. Ranges of the main parameters for calculations.

Параметр	Диапазон значений
Скорость натекающего потока	6 - 20 м/с
Температура потока	260 – 272,15 К (от -20 до -1°C)
Время обледенения	1 – 6 часов
Угол наклона изолятора	От -45° до 45°
Диаметр переохлажденных капель воды	20-100 мкм
Водность	0.5 – 2 г/м ³

4. Результаты моделирования

Для моделирования обледенения изолятора с использованием решателя iceFoam использовался URANS подход с моделью турбулентности Спаларт-Аллармаса (SA).

В выполненной работе расчетные результаты являются предварительными и предназначенными показать принципиальную возможность успешного решения задачи, которая заключается в возможности моделировать процесс обледенения изолятора в течение нескольких часов. Практически важным также является условие выполнения таких расчетов в условиях ограниченности вычислительных ресурсов.

Особенностью процесса обледенения изоляторов по сравнению с оледенением крыла самолета является малые значения скорости до 20 м/с набегающего потока и достаточно большие интервалы по времени в несколько часов.

На рис.6 показано состояние начала обледенения наветренной области изолятора. Здесь черным цветом показана область без обледенения. Видно также, что картина льда на внутренних фрагментах изолятора существенно отличается от картины на краевых деталях. На рис. 7 показано состояние льда на задней части изолятора. Можно отметить, что большая часть наветренной стороны поверхности изолятора покрывается льдом, подветренная часть практически не покрывается льдом.

На рис. 8, 9 показаны температура и абсолютная скорость воздуха в плоскости симметрии (течение газа слева-направо). Видно, что концевые детали изолятора существенно влияют на параметры течения. На рис. 10 представлено распределение значения величины турбулентной вязкости. Значительные величины турбулентной вязкости наблюдались в подветренной области изолятора. Визуализация результатов расчета выполнена в открытом пакете Paraview с использованием применения технологии фильтров в момент расчетного времени $t=200$ секунд. Выбор момента расчетного времени в $t=200$ секунд был связан с доступностью вычислительных ресурсов.

Заключение

Проведенное исследование позволило сделать вывод о возможном использовании решателя iceFoam для моделирования и изучения процесса обледенения изоляторов. На основе исторических данных об авариях ЛЭП в Краснодарском крае РФ были определены исходные данные для проведения расчетов. Для получения достоверной картины течения и обтекания тела в форме изолятора газокпельным потоком необходимо, чтобы набегающий поток прошел хотя бы один раз всю расчетную область. Расчеты были выполнены на вычислительном кластере в параллельном режиме. Один типовой пример запускался на 96 вычислительных ядрах. Время расчета составило около 100 часов. Данная работа является первым этапом в большом исследовании изучения сложного вопроса обледенения элементов ЛЭП.

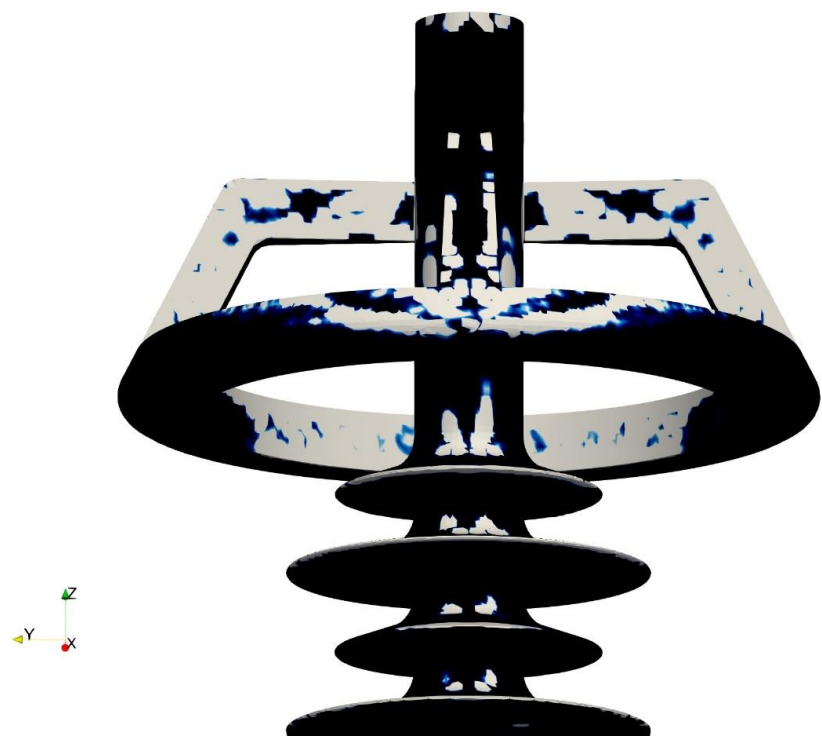


Рис.6. Положение льда на изоляторе в начале процесса.
Fig. 6. Position of ice on the insulator at the beginning of the process.

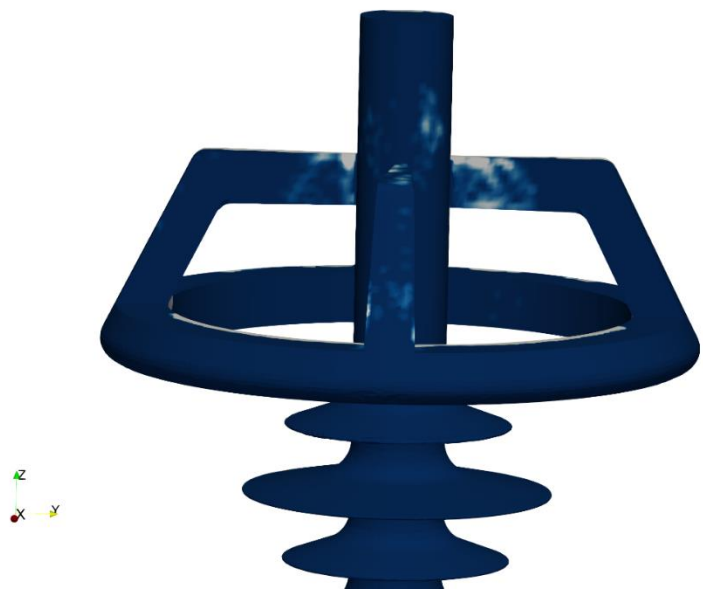


Рисунок 7 - Положение льда на изоляторе. Вид сзади. t=200 секунд.
Fig. 7 The position of the ice on the insulator. Rear view. t=200 seconds.

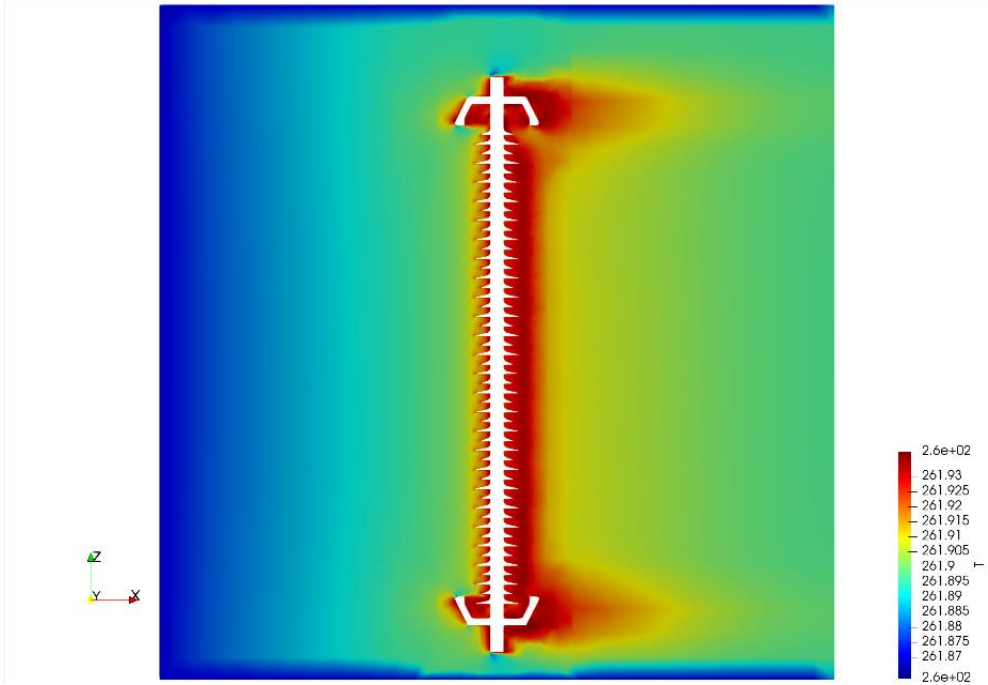


Рис.8. Температура воздуха в плоскости симметрии.
Fig. 8. Air temperature in the plane of symmetry.

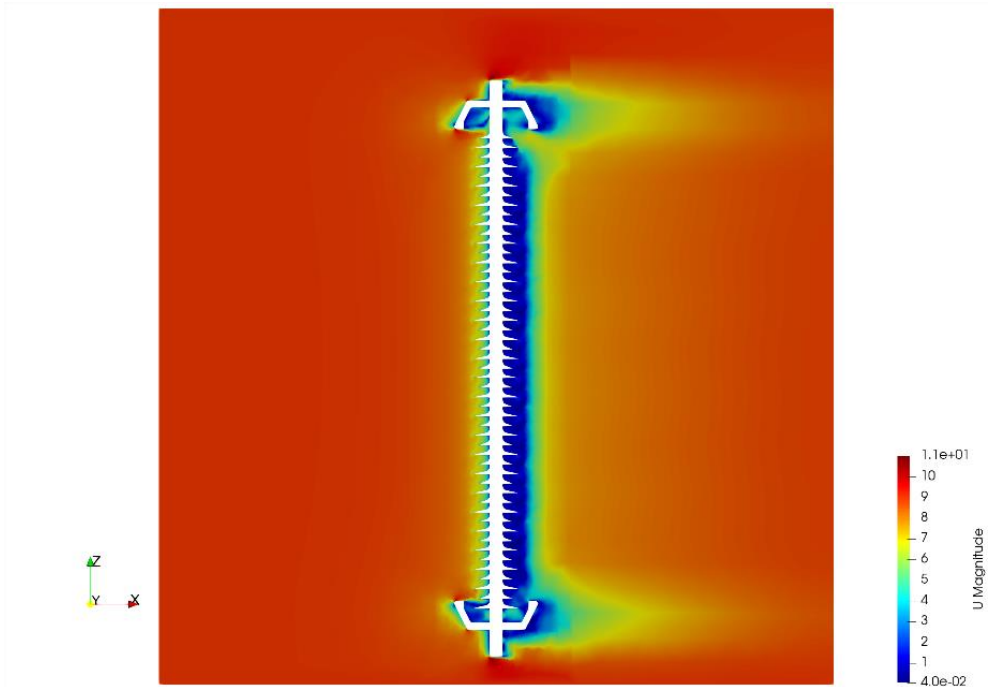


Рис.9. Абсолютная скорость воздуха в плоскости симметрии.
Fig. 9. Absolute air velocity in the plane of symmetry.

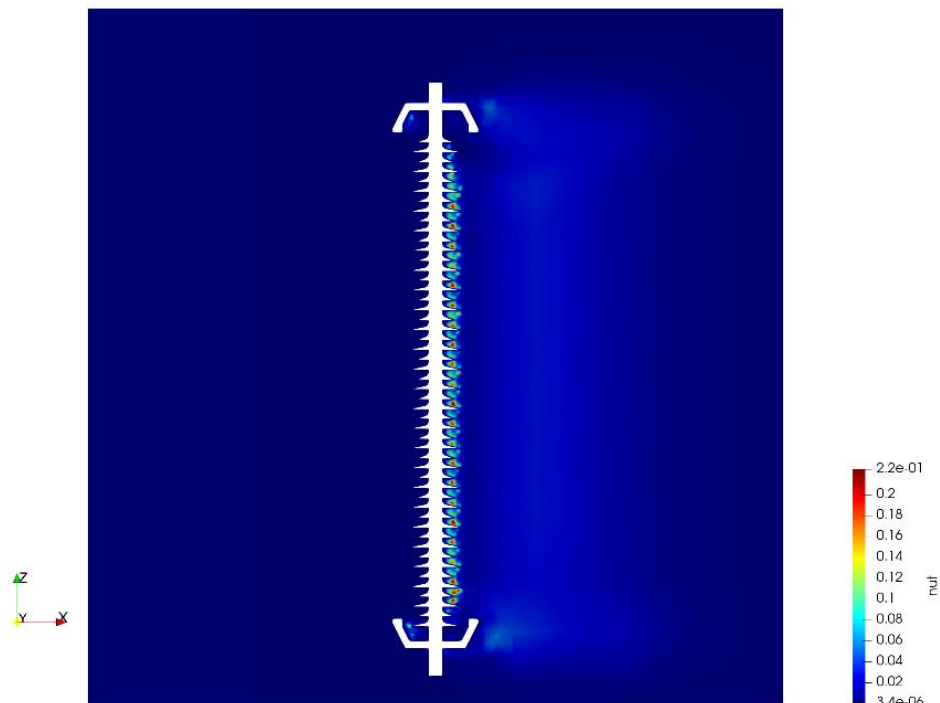


Рис.10. Турбулентная вязкость воздуха в плоскости симметрии.
Fig. 10. Turbulent viscosity of air in the plane of symmetry.

В перспективе планируется провести расчеты на более подробных сетках с целью оценки сеточной сходимости, провести сравнение с результатами эксперимента для провода и изолятора ЛЭП [5, 14]. Также планируется расширить диапазон исследуемых параметров (метеоусловия, размеры капель) для разных регионов РФ и провести сравнительный анализ процесса нарастания льда на изоляторах разной конфигураций с целью выявления наиболее устойчивых к обледенению моделей.

Список литературы / References

- [1]. Богатырев В.В. Исследование влияния обледенения на аэродинамические характеристики самолета на режиме посадки. Ученые записки ЦАГИ, 2014, № 4, с. 37-47.
- [2]. Жбанов В.А., Кашеваров А.В., Миллер А.Б., Потапов Ю.Ф., Стасенко А.Л., Токарев О.Д. Исследования обледенения в различных условиях. Труды МАИ. 2019. Выпуск № 105. с.1-17.
- [3]. Кашеваров А.В., Стасенко А.Л. Дискретно-капельный режим образования льда. Журнал технической физики, 2020, т. 90, вып. 1, с. 46-52.
- [4]. Huang Y., Virk M. S., Jiang X. Study of Wind Flow Angle and Velocity on Ice Accretion of Transmission Line Composite Insulators. IEEE Access, vol. 8, pp. 151898-151907, 2020, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3017507.
- [5]. Huang Y., Jiang X., Virk M.S. Ice accretion study of FXBW4-220 transmission line composite insulators and anti-icing geometry optimization. Electric Power Systems Research, 2021, vol. 194, 107089, ISSN 0378-7796.
- [6]. Dai D., Hu Y., Qian H., Qi G., Wang Y. A Novel Detection Algorithm for the Icing Status of Transmission Lines. Symmetry 2024, 16, 1264.
- [7]. Кошелев К.Б., Мельникова В.Г., Стрижак С.В. Разработка решателя iceFoam для моделирования процесса обледенения. Труды ИСП РАН, том 32, вып. 4, 2020, стр. 217-234. DOI: 10.15514/ISPRAS-2020-32(4)-16. / Koshelev K.B., Melnikova V.G. Strijhak S.V. Development of iceFom solver for

- modeling ice accretion. Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS, vol. 32, issue 4, 2020. pp. 217-234 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2020-32(4)-16.
- [8]. Кошелев К.Б., Осипов А.В., Стрижак С.В. Особенности реализации эффективного алгоритма параллельных вычислений для моделирования обледенения стреловидного крыла с профилем GLC-305. Труды ИСП РАН, том 33, вып. 5, 2021, стр. 249-258. DOI: 10.15514/ISPRAS-2021-33(5)-15. / Koshelev K.B., Osipov A.V. Strijhak S.V. Features of implementation an efficient parallel computation algorithm for modeling the ice accretion of a swept wing with a GLC-305 airfoil. Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS, vol. 33, issue 5, 2021, pp. 249-258 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2021-33(5)-15.
- [9]. Strijhak S., Ryazanov D., Koshelev K., Ivanov A. Neural Network Prediction for Ice Shapes on Airfoils Using ice Foam Simulations. Aerospace, 2022, vol. 9, no. 2. DOI 10.3390/aerospace9020096.
- [10]. Bourgault Y., Beaugendre H., Habashi W. Development of a shallow-water icing model in FENSAPICE. Journal of Aircraft, vol. 37, no. 4, 2000, pp. 640-646.
- [11]. Papadakis M., Yeong H.-W., Wong S.-C. et al. Experimental investigation of ice accretion effects on a swept wing, 2005, 205 p.
- [12]. Chang S, Tang H, Wu H, Su X, Lewis A, et al. Three-Dimensional Modelling and Simulation of the Ice Accretion Process on Aircraft Wings. Int. J. Astronaut Aeronautical Eng., 2018, 3:020.
- [13]. Россети Кубань: доступно по адресу: <https://rosseti-kuban.ru>, дата обращения 25.12.2025.
- [14]. Fikke S. et al. COST 727: Atmospheric Icing on Structures Measurements and data collection on icing: State of the Art. 2006. Publication of MeteoSwiss, 75, 110 p.

Информация об авторах / Information about authors

Сергей Владимирович СТРИЖАК – кандидат технических наук, ведущий инженер Института системного программирования им. В.П. Иванникова РАН с 2009 года. Сфера научных интересов: вычислительная гидродинамика, многофазные течения, турбулентность, ветроэнергетика, машинное обучение, параллельные вычислительные системы.

Sergei Vladimirovich STRIJHAK – Cand. Sci. (Tech.), leading engineer of the Ivannikov Institute for System Programming of the RAS since 2009. Research interests: computational fluid dynamics, multiphase flows, turbulence, wind energy, machine learning, parallel computing.

Константин Борисович КОШЕЛЕВ – кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник Института системного программирования им. В.П. Иванникова РАН с 2016 года. Сфера научных интересов: вычислительная гидродинамика, гидрология, машинное обучение.

Konstantin Borisovich KOSHELEV – Cand. Sci. (Phys.-Math.), associate professor, senior researcher at the Ivannikov Institute for System Programming of the RAS since 2016. Research interests: computational fluid dynamics, hydrology, machine learning.

Андрей Владимирович ОСИПОВ – инженер Института системного программирования им. В.П. Иванникова РАН с 2018 года. Сфера научных интересов: вычислительная гидродинамика, метод контрольного объема, подвижные сетки, лагранжев подход.

Andrei Vladimirovich OSIPOV – engineer of the Ivannikov Institute for System Programming of the RAS since 2018. Research interests: computational fluid dynamics, finite volume method, dynamic meshes, particles.

