

DOI: 10.15514/ISPRAS-2021-33(6)-17



## Разработка решателя flagmanFoam для моделирования обледенения летательных аппаратов в условиях натекания мелких капель

<sup>1</sup> К.А. Ватутин, ORCID: 0000-0002-4090-6320 <vatutin\_kirill@ispras.ru>

<sup>1</sup> М.В. Крапошин, ORCID: 0000-0001-5730-2702 <m.kraposhin@ispras.ru>

<sup>2</sup> М.А. Кудров, ORCID: 0000-0002-7937-6005 <mkudrov@mail.ru>

<sup>3</sup> А.Б. Миллер, ORCID: 0000-0001-8521-9631 <Aleksey.Miller@tsagi.ru>

<sup>1,4</sup> В.Г. Мельникова, ORCID: 0000-0002-1280-2647 <vg-melnikova@ispras.ru>

<sup>2</sup> А.О. Морозов, ORCID: 0000-0003-4620-9662 <morozov.ao@phystech.edu>

<sup>1,4</sup> С.М. Сауткина, ORCID: 0000-0002-3140-1080 <sautkina@ispras.ru>

<sup>1,4</sup> А.А. Шевелев, ORCID: 0000-0002-5043-5796 <ashevelev@ispras.ru>

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

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт, 141701, Россия, Долгопрудный, Институтский пер., д. 9

<sup>3</sup> Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н.Е. Жуковского, 140180, Россия, г. Жуковский, Московская область, ул. Жуковского, 1

<sup>4</sup> Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана 105005, Россия, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, дом 5, стр. 1

**Аннотация.** Работа посвящена созданию программного комплекса flagmanFoam, разрабатываемого на базе пакета OpenFOAM v2012. Решатель предназначен для моделирования процессов обледенения в условиях натекания мелких капель, при характерном размере до 40 мкм, что соответствует Приложению С Авиационных правил АП-25. Приведены физико-математические модели, реализованные в решателе: для описания динамики газочапельного потока используется Эйлер-Эйлер подход, термодинамическая модель Майерса используется для описания процесса нарастания жидкой пленки и льда, для движения межфазной поверхности используется Coupled Level Set – VoF метод, для учета взаимодействия между жидкостью и обтекаемым телом используется метод погруженных границ, турбулентная вязкость вычисляется с помощью  $k-\omega$  SST модели турбулентности. Представлены результаты моделирования на тестовых задачах и сравнение с экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** обледенение; переохлажденные капли; нарастание льда; моделирование; многофазная среда; поверхность.

**Для цитирования:** Ватутин К.А., Крапошин М.В., Кудров М.А., Миллер А.Б. Мельникова В.Г., Морозов А.О., Сауткина С.М., Шевелев А.В. Разработка решателя flagmanFoam для моделирования обледенения летательных аппаратов в условиях натекания мелких капель. Труды ИСП РАН, том 33, вып. 6, 2021 г., стр. 241-252. DOI: 10.15514/ISPRAS-2021-33(6)-17

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках проекта ICE GENESIS при финансовой поддержке Министерства промышленности и торговли РФ, уникальный идентификатор проекта 824310.

## Development of the flagmanFoam Solver for Modeling Aircraft Icing in Conditions of Small Droplet Inflow

<sup>1</sup> K.A. Vatutin, ORCID: 0000-0002-4090-6320 <vatutin\_kirill@ispras.ru>

<sup>1</sup> M.V. Kraposhin, ORCID: 0000-0001-5730-2702 <m.kraposhin@ispras.ru>

<sup>2</sup> M.A. Kudrov, ORCID: 0000-0002-7937-6005 <mkudrov@mail.ru>

<sup>3</sup> A.B. Miller, ORCID: 0000-0001-8521-9631 <Aleksey.Miller@tsagi.ru>

<sup>1,4</sup> V.G. Melnikova, ORCID: 0000-0002-1280-2647 <vg-melnikova@ispras.ru>

<sup>2</sup> A.O. Morozov, ORCID: 0000-0003-4620-9662 <morozov.ao@phystech.edu>

<sup>1,4</sup> S.M. Sautkina, ORCID: 0000-0002-3140-1080 <sautkina@ispras.ru>

<sup>1,4</sup> A.A. Shevelyov, ORCID: 0000-0002-5043-5796 <ashevelev@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, Insitutsky per., Dolgoprudny, 141701, Russia

<sup>3</sup> Central Aerohydrodynamic Institute,

1, Zhukovsky st., Zhukovsky, Moscow Region, 140180, Russia

<sup>4</sup> Bauman Moscow State Technical University

5/1, 2-nd Baumanskaya st., Moscow, 105005, Russia

**Abstract.** This work is devoted to the creation of the flagmanFoam software package developed on the basis of the OpenFOAM v2012 package. A solver has been developed to simulate icing in conditions of small droplet in-flow, with a characteristic droplet size of up to 40 microns, which corresponds to Appendix C of the Aviation Regulations AP-25. Computational models implemented in the solver are presented: the Euler-Euler approach is used to describe the dynamics of a gas-droplet flow, the Myers thermodynamic model is used to describe the growth of a liquid film and ice, the Coupled Level Set - VoF method is used to move the interface, to take into account the interaction between liquid and body, the immersed boundary method is used, the turbulent viscosity is calculated using the  $k-\omega$  SST turbulence model. The results of modeling on test problems and comparison with experimental data are presented.

**Keywords:** icing; supercooled droplets; ice accretion; simulation; multiphase environment; surface.

**For citation:** Vatutin K.A., Kraposhin M.V., Kudrov M.A., Miller A.B., Melnikova V.G., Morozov A.O., Sautkina S.M., Shevelyov A.A. Development of the flagmanFoam solver for modeling aircraft icing in conditions of small droplet inflow. *Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS*, vol. 33, issue 6, 2021, pp. 241-252 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2021-33(6)-17

**Acknowledgements.** The work is supported by ICE GENESIS project with financial support from the Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation, unique project identifier 824310.

### 1. Введение

Разработка способов эффективной противообледенительной защиты, методов подтверждения соответствия изделий авиационной техники для всех возможных условий обледенения является задачей государственной важности. Перед Российской Федерацией остро стоит задача как обеспечения безопасности полетов, так и сертификации продукции отечественной авиационной промышленности во всех условиях обледенения. Экспериментальному и численному моделированию процессов обледенения посвящено большое количество работ, например, [1-5].

Однако, на текущий момент отсутствует отечественное программное обеспечение, с помощью которого можно решать задачи сертификации. В настоящее время коллективом авторов разработан прототип программного комплекса, предназначенного для моделирования процессов обледенения, который включает в себя решатель для условий натекания мелких капель (Приложение С к CS-25) со средним диаметром до 40 мкм [6].

Программный комплекс разрабатывается на универсальном языке программирования C++ и основывается на базе открытой библиотеки OpenFOAM v2012.

## 2. Физико-математическая модель

Математическая модель предполагает, что в расчетной области присутствуют фазы: газ (воздух), переохлажденные капли воды, лед и пленка воды, в общем случае частично покрывающая поверхность льда. Криволинейная поверхность льда с пленкой воды разделяет две среды: двухфазную жидкую среду «газ + капли» и однофазную твердую среду «лед». В каждой среде решается своя система уравнений, которые связываются между собой через граничные условия.

### 2.1 Расчет обтекания тела (модуль aerodynamics)

Решение задачи динамики межфазного фронта проводится в медленном меняющемся аэродинамическом поле, выполняется расчет «на установление» промежуточных состояний. Течение несжимаемого газа (несущей фазы в среде «газ + капли») описывается уравнением неразрывности и уравнением баланса импульсов.

Уравнение неразрывности несжимаемой среды:

$$\nabla \cdot (\mathbf{U}) = 0, \quad (1)$$

Где  $\mathbf{U}$  – скорость потока.

Уравнение баланса импульса:

$$\nabla \cdot (\mathbf{U} \times \mathbf{U}) - \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = -\nabla p, \quad (2)$$

где  $p$  – кинематическое давление окружающей среды;  $\mathbf{g}$  – вектор ускорения свободного падения;  $\boldsymbol{\sigma} = \nu_e(\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T) - \frac{2}{3}\nu_e \mathbf{I} \nabla \cdot \mathbf{U}$  тензор вязких напряжений;  $\nu_e = \nu + \nu_t$  – коэффициент эффективной вязкости смеси;  $\nu$ ,  $\nu_t$  – коэффициенты ламинарной и турбулентной кинематической вязкости окружающей среды;  $\mathbf{I}$  – единичный тензор.

Для учета взаимодействия между жидкостью и обтекаемым телом используется метод погруженных границ [7]. Вводятся две отдельные сетки для расчета течения жидкости и для расчета параметров погруженной границы (области вблизи твердого тела).

Турбулентная вязкость вычисляется с помощью  $k - \omega$  SST модели турбулентности, в которой решаются уравнения для кинетической энергии турбулентных пульсаций и турбулентной частоты. На поверхности исследуемого тела используются логарифмические пристеночные функции [8].

### 2.2 Расчет капельного потока (модуль dropletFlow)

Для расчета капельного потока используется континуальное приближение. Приняты следующие допущения:

- набегающий поток принимается двухфазным, состоящим из несущей фазы окружающей среды и капль одного диаметра, имеющие каждый свои скорости;
- столкновениями между каплями пренебрегаем;
- дискретная фаза считается лишенной собственного давления;
- вязкие силы проявляются только в несущей фазе и при взаимодействии капль с газом;
- траектории капль рассчитываются после получения поля скоростей несущей фазы; обратного влияния капль на несущую среду не оказывают.

В модели решается уравнение для осредненной объемной концентрации капль  $\varphi_k$ :

$$\frac{\partial \varphi_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U}_k) \varphi_k = 0, \quad (3)$$

где  $t$  – время,  $\mathbf{U}_k$  – абсолютная скорость капль, и уравнение импульса капль:

$$\frac{\partial \mathbf{U}_k}{\partial t} + \mathbf{U}_k \cdot \nabla (\mathbf{U}_k) - \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{F}, \quad (4)$$

где  $Re_{eff}$  – турбулентное число Рейнольдса.

Выражение для ускорения  $\mathbf{F}$ , действующего на каплю, выглядит следующим образом:

$$\mathbf{F} = \mathbf{g} + \frac{C_{d,p}(Re_p)}{m_p} \cdot \frac{\rho(\mathbf{U}_k - \mathbf{U})|\mathbf{U}_k - \mathbf{U}|}{2} S_p, \quad (5)$$

Где  $\rho$  – плотность окружающей среды,  $S_p$  – площадь поверхности капль,  $m_p$  – масса капль.

Коэффициент аэродинамического сопротивления капль  $C_{d,p}$ , зависящий от числа Рейнольдса капль  $Re_p$ , вычисляется в соответствии с моделью Путнэма:

$$C_{d,p}(Re_p) = \begin{cases} 24/Re_p \left(1 + \frac{1}{6} Re_p^{2/3}\right), & Re \leq 1000; \\ 0.424, & Re > 1000. \end{cases} \quad (6)$$

Методика может учитывать распределение капльной фазы по размерам, путем добавления уравнений для капль каждого размера.

Массовый поток влаги, попадающий на единицу поверхности,  $\dot{m}_{water}$  вычисляется с помощью нормальной к обтекаемой поверхности скоростью переохлажденных капль и их концентрацией у поверхности:

$$\dot{m}_{water} = -(\mathbf{U}_k \times \mathbf{n}) \cdot \varphi_k \cdot \rho_p,$$

Где  $\rho_p$  – плотность капль,  $\mathbf{n}$  – вектор нормали к поверхности.

### 2.3 Термодинамическая модель Майерса (модуль phaseInterfaceVelocity)

Уравнения, используемые в термодинамической модели, решаются на двумерной сетке, построенной вдоль поверхности твердого тела, заново на каждом шаге по времени. Модель Майерса состоит из четырех основных уравнений и включает в себя следующие допущения: 1) переход из рыхлого льда к гладкому льду в процессе замерзания происходит мгновенно; 2) слои льда и воды считаются изотермическими. Подробно модель и значение коэффициентов изложено в [9].

Уравнение теплопроводности для льда:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k_l}{\rho_l c_{pl}} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \quad (7)$$

где  $T$  – температура льда,  $k_l$  – коэффициент теплопроводности для льда,  $c_l$  – коэффициент теплоемкости льда,  $z$  – пространственная координата,  $\rho_l$  – плотность льда.

Уравнение теплопроводности для воды:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{k_w}{\rho_w c_w} \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2}, \quad (8)$$

где  $\theta$  – температура воды,  $k_w$  – коэффициент теплопроводности для воды,  $\rho_w$  – плотность воды,  $c_w$  – коэффициент теплоемкости воды.

Уравнение баланса массы:

$$\rho_l \frac{\partial b}{\partial t} + \rho_w \frac{\partial h}{\partial t} = \dot{m}_{ice}, \quad (9)$$

где  $b$  – толщина льда,  $h$  – толщина воды.

Уравнение баланса энергии:

$$\rho_g L_f \frac{\partial b}{\partial t} = k_i \frac{\partial T}{\partial z} - k_w \frac{\partial h}{\partial z}, \quad (10)$$

где  $\rho_g$  – плотность льда,  $L_f$  – удельная теплота кристаллизации.

Задаются следующие граничные условия:

1) температура подложки  $T_s$ :

$$T(0, t) = T_s;$$

2) температура на границе вода-лёд равна температуре плавления льда  $T_f$ :

$$T(b, t) = \Theta(b, t) = T_f;$$

3) поток энергии на границе воды:

$$-k_w \left. \frac{\partial \Theta}{\partial z} \right|_{z=b+h} = (Q_c + Q_e + Q_d) - (Q_a + Q_k),$$

где  $Q_c = H_{aw} \cdot [\Theta(b+h, t) - T_a] = q_c \cdot [\Theta(b+h, t) - T_a]$  – конвективный теплообмен на поверхности воды,  $T_a$  – температура воздуха,  $q_c = H_{aw}$  – коэффициент переноса тепла между водой и воздухом,  $Q_e = q_e \cdot [\Theta(b+h, t) - T_a]$  – потери тепла при испарении,  $q_e = e_0 \chi$  – коэффициент потери тепла при испарении,  $e_0$  – константа давления насыщенного пара,  $\chi$  – коэффициент испарения,  $Q_d = \dot{m}_{ice} \cdot [\Theta(b+h, t) - T_a] = q_d \cdot [\Theta(b+h, t) - T_a]$  – охлаждение набегающим капельным потоком,  $Q_a = 0$  – аэродинамический нагрев (пренебрегаем),  $Q_k = 0$  – кинетическая энергия падающих капель (пренебрегаем).

Соответственно, выражение для этого потока можно переписать следующим образом:

$$-k_w \left. \frac{\partial \Theta}{\partial z} \right|_{z=b+h} = (\Theta(b+h, t) - T_a)(q_c + q_e + q_d).$$

Уравнения теплопроводности упрощаются предположением:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial \Theta}{\partial t} = 0.$$

Тогда  $T$  и  $\Theta$  представляют собой линейные функции  $z$ , и выражения для  $\frac{\partial T}{\partial z}$  и  $\frac{\partial \Theta}{\partial z}$  принимают вид:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{T_f - T_s}{b};$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial z} = \frac{-(q_c + q_e + q_d)(T_f - T_a)}{k_w + h(q_c + q_e + q_d)}.$$

Таким образом, уравнение баланса энергии принимает вид:

$$\rho_g L_f \frac{\partial b}{\partial t} = k_i \frac{T_f - T_s}{b} + k_w \frac{(q_c + q_e + q_d)(T_f - T_a)}{k_w + h(q_c + q_e + q_d)}. \quad (11)$$

## 2.4 Модель движения межфазной границы (модуль phaseInterfaceFaMeshGenerator)

Принцип работы этого и следующего модуля заключается в «расщеплении» представления и переноса межфазного интерфейса между воздухом и льдом: в то время как сам интерфейс по-прежнему описывается криволинейной поверхностью, его деформация и перенос осуществляются не явно, а на основе решения уравнения материального баланса льда, сформулированного в консервативном виде. Это позволяет, с одной стороны, сохранить выполнение баланса массы льда, а с другой стороны — снизить риск появления самопересечений и других признаков вырожденности рассматриваемой поверхности.

Поверхность льда определяется по распределению переменной VoF (Volume of Fluid) на каждом шаге по времени. Движущаяся по неподвижной (эйлеровой) сетке поверхность льда

разрезает расчетные ячейки на многогранники произвольной формы, принадлежащие разным средам. Переменная объемной доли VoF  $a_{ice}$  для льда принимает значения от 0 («газ + капли») до 1 («лед»). Ячейка, в которой  $0 < a_{ice} < 1$ , содержит поверхность льда. Для точного вычисления положения поверхности льда используется знаковая функция уровня, которая вычисляется относительно объемной доли  $a_{ice}$  (Coupled Level Set – VoF метод [10]). При запуске модели функция уровня (знакопеременное поле расстояний от данной точки пространства до межфазной поверхности) вычисляется для нескольких рядов ячеек, окружающих поверхность. При решении уравнения переноса объемной доли льда функция уровня пересчитывается через маркер льда исходя из предположения, что межфазная поверхность находится в области, где объемная доля равна  $\frac{1}{2}$ . После вычисления функции уровня одним из указанных способов, используется процедура реинициализации, позволяющая получить поле функции уровня, соответствующее её уравнению.

## 2.5 Модель изменения ледяного нароста (модуль iceGrowth)

В первую очередь происходит перенос данных  $S_i$  и  $\mathbf{U}_{in}$  с межфазной двумерной сетки на конечно-объемную сетку. Источник  $S_i$  задается строго внутри межфазной поверхности. Скорость нарастания льда в нормальном направлении  $\mathbf{U}_{in}$  задается в ячейках рядом с межфазной поверхностью по обе стороны.

Поскольку поле скорости прироста поверхности льда всегда перпендикулярно к её текущему положению, то для него предлагается составить уравнение в потенциальном приближении. Уравнение для потенциала скорости изменения межфазной поверхности  $\Phi_i$ :

$$-\nabla \cdot \mathbf{K} \nabla \Phi_i = 0. \quad (12)$$

Расчет коэффициента проницаемости  $\mathbf{K}$ :

$$\mathbf{K} = \begin{cases} \frac{|\mathbf{U}_{in}|}{\langle |\mathbf{U}_{in}| \rangle}, & \text{где } \mathbf{U}_i \neq 0; \\ 0, & \text{где } \mathbf{U}_{in} = 0; \\ 1, & \text{в остальной области.} \end{cases}$$

Далее с помощью схемы MULES [12] назначается новое поле объемной доли льда.

$$\frac{\partial a_{ice}}{\partial t} + \mathbf{U}_{ice}^* \cdot \nabla a_{ice} = 0. \quad (13)$$

## 3. Архитектура решателя

Решатель включает в себя программные реализации моделей, описанных в разд. 1, и организован согласно архитектуре, представленной на рис.1.

Шаг расчета начинается с построения поверхностной сетки межфазной поверхности. После этого выполняется расчет аэродинамики обтекания тела, для аппроксимации вязких напряжений в области нароста льда используется метод погруженных границ.

Далее происходит решение уравнений, описывающих движение капельного потока. После этого поля скорости, температуры окружающей среды и масса капель, достигших поверхности, передаются в модуль расчета пленки.

Расчет пленки происходит по уравнениям модели Майерса на дополнительной расчетной сетке, построенной на межфазной границе. В результате решения уравнений получают толщины пленки воды и льда, а также скорость нарастания льда (модуль нормальной скорости движения межфазной поверхности). По значению этих параметров изменяется распределение значения переменной объемной доли льда на основной сетке, и получает новое положение поверхности межфазной границы, которое передается строителю дополнительной сетки.

Полученная сетка используется моделью пленки на следующем шаге расчета.

Применяемые принципы позволяют перенести основную часть вычислительной нагрузки на решение задачи внешней аэродинамики при медленно меняющемся профиле. При этом нагрузка на перестроение объёмной сетки существенно снижается (за счет использования соответствующих методов).

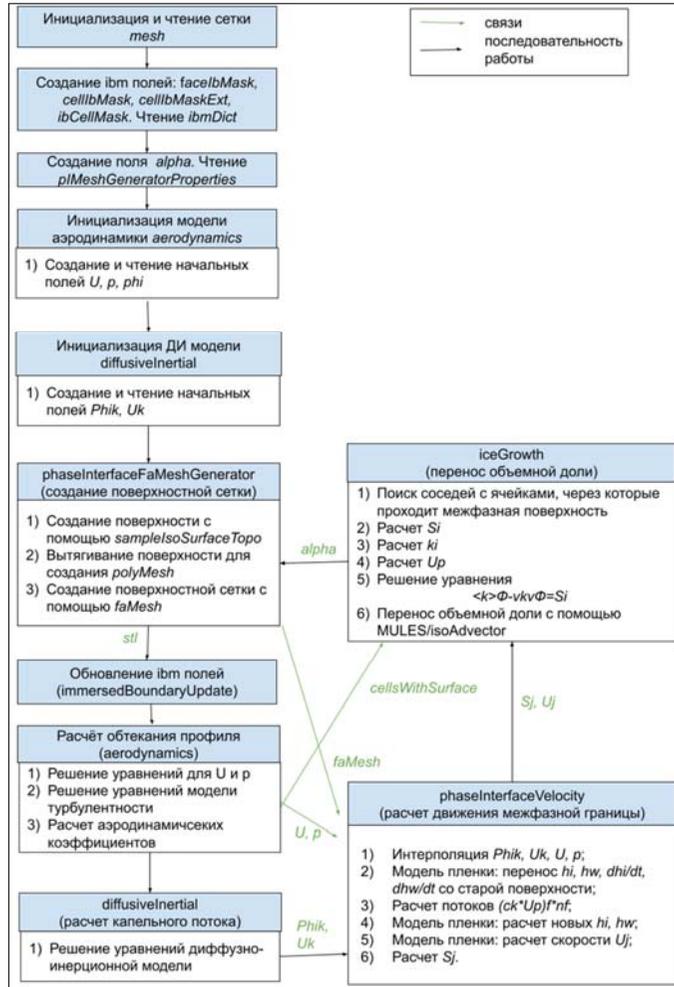


Рис. 1. Архитектура решателя flagmanFoam  
 Fig. 1. flagmanFoam solver architecture

Программа эффективна при параллельных вычислениях за счёт равномерности распределения вычислительной нагрузки по процессам, однотипности вычислительных операций, численных схем для всех процессов. Алгоритмы с низкой эффективностью параллельных вычислений малозатратны в последовательном режиме и изолированы в отдельные модули. В итоге эффективность параллельного масштабирования решателя становится близкой к программам, предназначенным для решения стационарных задач аэродинамики.

#### 4. Результаты численного моделирования

##### 4.1 Обледенение 2D цилиндра

Задача обтекания цилиндра является классической тестовой задачей для моделирования процесса обледенения. Постановка задачи обледенения цилиндра описана в [11], результаты численного моделирования сравнивались с экспериментальными данными (рис. 2). Диаметр цилиндра равнялся 15.2 см. Сетка – 79 584 ячеек, 4 уровня сгущения, шаг по времени – 12 с, время расчета на 1 ядре составило 20 ч 25 мин.

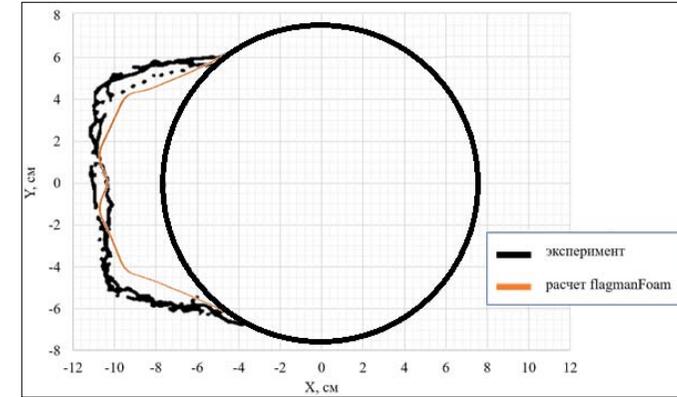


Рис. 2. Результат моделирования обледенения цилиндра ( $U = 76$  м/с,  $LWC = 0.8$  г/м<sup>3</sup>,  $T = 260.15$  К,  $D_p = 28$  мкм,  $t = 18.3$  мин)

Fig.2. The result of the simulation of the icing of the cylinder ( $U = 76$  m/s,  $LWC = 0.8$  g/m<sup>3</sup>,  $T = 260.15$  K,  $D_p = 28$  μm,  $t = 18.3$  min)

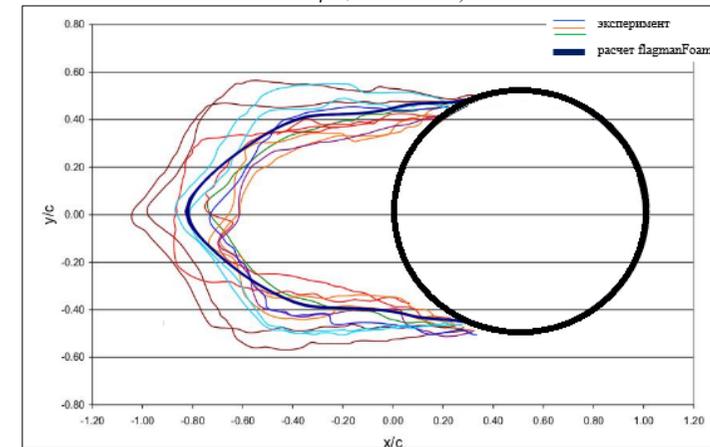


Рис. 3. Результат моделирования обледенения цилиндра ( $U = 67$  м/с,  $LWC = 1$  г/м<sup>3</sup>,  $T = 243.15$  К,  $D_p = 20$  мкм,  $t = 10$  мин)

Fig.3. The result of the simulation of the icing of the cylinder ( $U = 67$  m/s,  $LWC = 1$  g/m<sup>3</sup>,  $T = 243.15$  K,  $D_p = 20$  μm,  $t = 10$  min)

Вторая задача обтекания была решена для цилиндра диаметром 3.81 см [12]. Сетка – 74 248 ячеек. Шаг по времени – 4 с. Время расчета на 4 ядрах кластера UniHub составило 11 ч 30 мин.

## 4.2 Обледенение 2D профиля NASA0012

Для проверки работоспособности программного комплекса flagmanFoam была рассмотрена задача обтекания 2D профиля NASA0012 в режиме «rime ice» (рыхлый лед) [13].

Крыло размером 53.34 см находится под углом 4 градуса к потоку. Расчетная область составила 7,5 на 5 м. Сетка – 114 090 ячеек, 5 уровней разрешения. Шаг по времени – 10 с.

Результаты моделирования приведены на рис. 4 и 5. Время расчета двух случаев составило 8 ч 30 мин и 10 ч 30 мин соответственно.

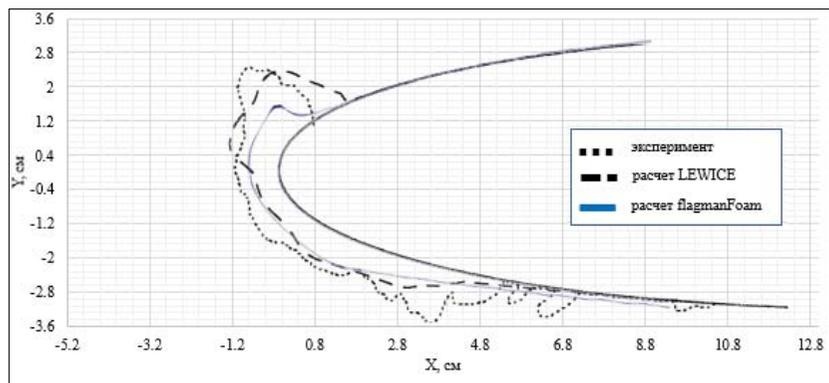


Рис. 4. Результат моделирования обледенения профиля NASA0012 ( $U = 67.1$  м/с,  $LWC = 1.6$  г/м<sup>3</sup>,  $T = 267.59$  К,  $D_p = 30$  мкм,  $t = 6$  мин)

Fig. 4. Result of modeling icing profile NASA0012 ( $U = 67.1$  m/s,  $LWC = 1.6$  g/m<sup>3</sup>,  $T = 267.59$  K,  $D_p = 30$   $\mu$ m,  $t = 6$  min)

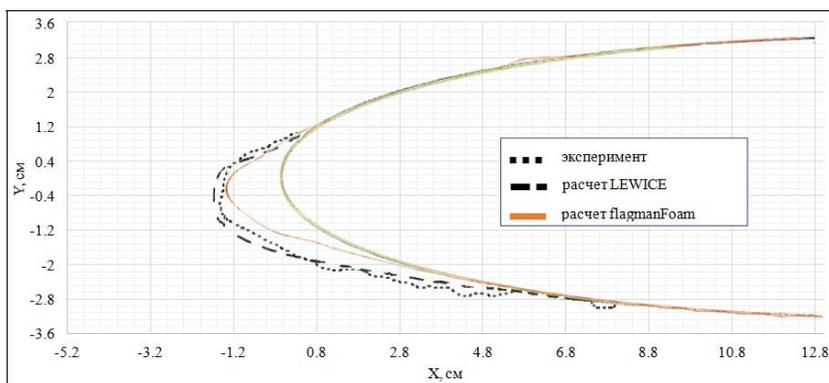


Рис. 5. Результаты моделирования профиля NASA 0012 ( $U = 103$  м/с,  $LWC = 0.55$  г/м<sup>3</sup>,  $T = 247$  К,  $D_p = 20$  мкм,  $t = 7$  мин)

Fig. 5. Result of modeling icing profile NASA0012 ( $U = 103$  m/s,  $LWC = 0.55$  g/m<sup>3</sup>,  $T = 247$  K,  $D_p = 20$   $\mu$ m,  $t = 7$  min)

## 5. Заключение

Разработан прототип программного комплекса flagmanFoam, предназначенный для моделирования обледенения летательных аппаратов, включающий в себя решатель для расчета нарастания льда в условиях натекания мелких капель (Приложение С к CS-25).

Первые результаты расчетов показали хорошую сходимость (в пределах 12 %) с эталонными данными в различных тестовых задачах: обледенение 2D цилиндра и профиля NASA0012. Размер обледенения во всех расчетных случаях оказывается занижен.

Применяемые принципы позволили добиться высокой скорости вычислений на 1 ядре (время расчета составляет в пределах 1 дня), параллельная масштабируемость программы приближена к стандартному решателю стационарных задач.

Использование неявного представления межфазной поверхности в новом решателе позволило проводить вычисления аккреции льда в условиях размеров нароста сопоставимых или превышающих размер тела.

При этом удалось сохранить модульность и расширяемость функционала физико-математической модели и аппроксимирующего её численного алгоритма, а также их соответствие области применения разрабатываемого вычислительного средства.

В дальнейшем планируется расширять функционал программного комплекса с помощью добавления новых физико-математических моделей, что позволит рассчитывать обледенение в условиях натекания крупных капель, в условиях падающего снега и метели, а также предсказывать нарастание льда других типов.

## Список литературы / References

- [1] Миллер А.Б., Потопов Ю.Ф. и др. Лабораторная аэроохлажденная установка для исследования процессов обледенения. Ученые записки ЦАГИ, том 47, no. 4, 2016 г., стр. 55-61 / Miller A.B., Potapov Yu.F. et al. Laboratory aero-refrigeration setup for investigation of ice accretion processes. *TsAGI Science Journal*, vol. 47, no. 4, 2016, pp. 423-432.
- [2] Кашеваров А.В., Левченко В.С. и др. К гидротермодинамике обледенения профиля в воздушно-кристаллическом потоке. Журнал технической физики, том 88, вып. 6, 2018 г., стр. 808-814 / Kashevarov A.V., Levchenko V.S. On the hydrothermodynamics of the icing of a wing profile in the air-crystalline flow. *Technical Physics*, vol. 63, issue 6, 2018, pp. 782-788.
- [3] Thomas S.K., Cassoni R.P., MacArthur C.D. Aircraft Anti-Icing and De-Icing Techniques and Modeling. *Journal of Aircraft*, vol. 33, issue 5, 2012, pp. 841-854.
- [4] Miller A.B., Potapov Yu.F., Stasenko A.L. Experimental and Theoretical Investigations of Aircraft Icing in the Case of Crystal and Mixed-phase Flow. In Proc. of the 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, 2014, paper 2014-0575.
- [5] Bidwell C.S. Collection Efficiency and Ice Accretion Calculations for a Boeing 737-300 Inlet. SAE/AIAA Technical Paper 96-5570, 21p.
- [6] CS-25 Large Aeroplanes. Available at: <https://www.easa.europa.eu/certification-specifications/cs-25-large-aeroplanes>, accessed 25.10.2021.
- [7] Xu Yu., Liu X. An immersed boundary method with  $y^+$ -adaptation wall function for smooth wall shear. *International Journal of Numerical Methods in Fluids*, vol. 93, issue 6, 2021, pp. 1929-1946.
- [8] GitHub-psu-efd/ibwallfunction\_OpenFOAM: An immersed boundary method with  $y^+$ -adaptive wall function for smooth wall shear. Available at: [https://github.com/psu-efd/ibwallfunction\\_OpenFOAM](https://github.com/psu-efd/ibwallfunction_OpenFOAM), accessed 25.10.2021.
- [9] Myers T.G. Extension to the Messinger Model for Aircraft Icing. *AIAA JOURNAL*, vol. 39, no. 2, 2001, pp. 211-218.
- [10] Dianat M., Skarysz M., Garmory A. A Coupled Level Set and Volume of Fluid method for automotive exterior water management applications. *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 91, 2017, pp. 19-38.
- [11] Anderson D.N. Rime-, Mixed- and Glaze-ice Evaluations of Three Scaling Laws. In Proc. of the AIAA 32nd Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 1994, 16 p.
- [12] Icing Wind Tunnel Interfacility Comparison Tests. SAE Aerospace information report AIR5666. 2012.

[13] Wright W.B., Rutkowski A. Validation Results for LEWICE 2.0. Technical Report NASA/CR-1999-208690, 1999, 679 p.

## Информация об авторах / Information about authors

Кирилл Александрович ВАТУТИН – аспирант, его научные интересы включают задачи волновой динамики в стратифицированных и вращающихся средах, разработка программных средств для задач гидроаэродинамики.

Kirill Alexandrovich VATUTIN is a PhD student, his scientific interests include the problems of wave dynamics in stratified or rotating media, and development of CFD software.

Матвей Викторович КРАПОШИН – руководитель лаборатории СПО ЦМТС в ИСП РАН. Область научных интересов: гидродинамика, численное моделирование, многомасштабное моделирование, программное обеспечение с открытым исходным кодом, сжимаемые течения, двухфазные течения, междисциплинарные модели.

Matvey Viktorovich KRAPOSHIN is a head of the laboratory of OSS DMTS at ISP RAS. Research interests: hydrodynamics, numerical modeling, multiscale modeling, open-source software, compressible flows, two-phase flows, interdisciplinary models.

Максим Александрович КУДРОВ – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией информационных технологий и прикладной математики. Научные интересы: разработка комплекса программ для компьютерного моделирования физических процессов.

Maksim Aleksandrovich KUDROV is a Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher, Head of the Laboratory of Information Technologies and Applied Mathematics. Research interests: development of software for computer modeling of physical processes.

Алексей Борисович МИЛЛЕР – кандидат физико-математических наук, начальник отдела отделения исследований аэротермодинамики гиперзвуковых летательных аппаратов и объектов ракетно-космической техники. Научные интересы: физическая механика многофазных потоков, численное моделирование, экспериментальные исследования.

Alexey Borisovich MILLER is a Candidate of Sciences in Physics and Mathematics, Head of the Department for Aerothermodynamics Research of Hypersonic Aircraft and Rocket and Space Facilities. Research interests: physical mechanics of multiphase flows, numerical modeling, experimental research.

Валерия Геннадиевна МЕЛЬНИКОВА – аспирант МГТУ, кафедра «Аэрокосмические системы», научный сотрудник ИСП РАН. Сфера научных интересов: вычислительная гидродинамика, метод контрольного объема, подвижные сетки, лагранжевы подход.

Valeriia Gennadievna MELNIKOVA is a PhD student of BMSTU, «Aerospace systems» department, researcher at ISP RAS. Research interests: computational fluid dynamics, finite volume method, dynamic meshes, particles.

Алексей Олегович МОРОЗОВ – инженер. Научные интересы: компьютерное моделирование физических процессов, численные методы в задачах аэрогидродинамики.

Alexey Olegovich MOROZOV is an engineer. Research interests: computer modeling of physical processes, numerical methods in problems of aerohydrodynamics.

Софья Михайловна САУТКИНА – аспирант МГТУ, сотрудник ИСП РАН. Занимается исследованиями в области гидродинамики, прикладной математики и газовой динамики.

Sofya Mikhailovna SAUTKINA is a PhD student of BMSTU, works at ISP RAS. She does research in Fluid Dynamics, Applied Mathematics and Gas Dynamics.

Александр Алексеевич ШЕВЕЛЕВ – аспирант МГТУ, сотрудник ИСП РАН. Область научных интересов: прикладная математика, численное моделирование, параллельные вычисления.

Alexander Alekseevich SHEVELYOV is a PhD student of BMSTU, works at ISP RAS. Research interests: applied mathematics, numerical modeling, parallel computing.