

УДК 62-733

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ЛЬДА ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ СТРУЕЙ

Д.С. МАКСИМОВ<sup>1</sup>, В.Я. МОДОРСКИЙ<sup>2</sup>, И.Е. ЧЕРЕПАНОВ<sup>3</sup>,  
А.О. МИРЮКОВ<sup>4</sup>, С.Л. КАЛЮЛИН<sup>5</sup>

<sup>1</sup>dsm-996@mail.ru, <sup>2</sup>modorsky@pstu.ru, <sup>3</sup>cherepanovie@sbiw.ru, <sup>4</sup>anto-mikryuko@yandex.ru, <sup>5</sup>kslperm91@gmail.ru  
ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ПНИПУ), г. Пермь

*Поступила в редакцию 21.11.2023*

**Аннотация.** При эксплуатации газокompрессорных станций в сильные снегопады может происходить неконтролируемое образование ледяных наростов на фильтрах воздухоочистительных устройств (ВОУ), что приводит к авариям и простоям. Ранее предложено для очистки фильтров ВОУ использовать газодинамическую систему очистки газопроницаемых деформируемых поверхностей (ГДП). Создана экспериментальная установка. В работе рассматривается численное моделирование разрушения льда на ГДП. Для разрушения льда используется энергия газодинамической струи, моделируемая как кратковременный импульс. Исследование проводится в 3D постановке с учетом давления потока всаса и взаимовлияния деформируемой подложки с ледяной коркой. Проведена верификация полученных результатов. Исследование осуществляется с применением ANSYS на высокопроизводительном вычислительном комплексе ПНИПУ. Определены параметры газодинамической струи, при которых происходит разрушение ледяных наростов на ГДП.

**Ключевые слова:** обледенение; разрушение льда; газопроницаемые деформируемые поверхности; высокопроизводительный вычислительный комплекс; физическое моделирование.

### ВВЕДЕНИЕ

Исследование опасного явления интенсивного нарастания льда на воздухоочистительных устройствах (ВОУ) газоперекачивающих агрегатов (ГПА) является актуальной научной проблемой. Элементы конструкции ВОУ устанавливаются на входной канал перед авиационным двигателем (АД). Они подвержены воздействию снега, льда, изморози, ледяного дождя при высокой ветровой нагрузке, что приводит к запырению воздушного потока и, как следствие, к останову АД.

При исследовании идеи внедрения на входные фильтры ВОУ защитных ГДП авторами были изучены научные труды [1-3], в которых исследовались процессы обледенения на газонепроницаемых объектах. Исследований моделирования процессов обледенения на газопроницаемых и деформируемых поверхностях авторам обнаружить не удалось. Процесс обледенения является сложным явлением и есть ряд трудов, посвященных изучению борьбы с ним [4]. Авторы [5] рассматривали процесс обледенения применительно к крылу летательного аппарата в аэродинамической трубе. Ранее для экспериментального исследования ледяных наростов на ГДП была разработана установка «ФИЛЬТР».

## ФИЗИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ НА УСТАНОВКЕ «ФИЛЬТР»

Ранее при проведении физических экспериментов было выявлено, что для сброса льда недостаточно прямого взаимодействия ГДП с газодинамическим потоком из форсунки. Для повышения очищающей способности ГДП на ней соосно с газодинамической форсункой установили газонепроницаемую площадку, как показано на рис. 1.

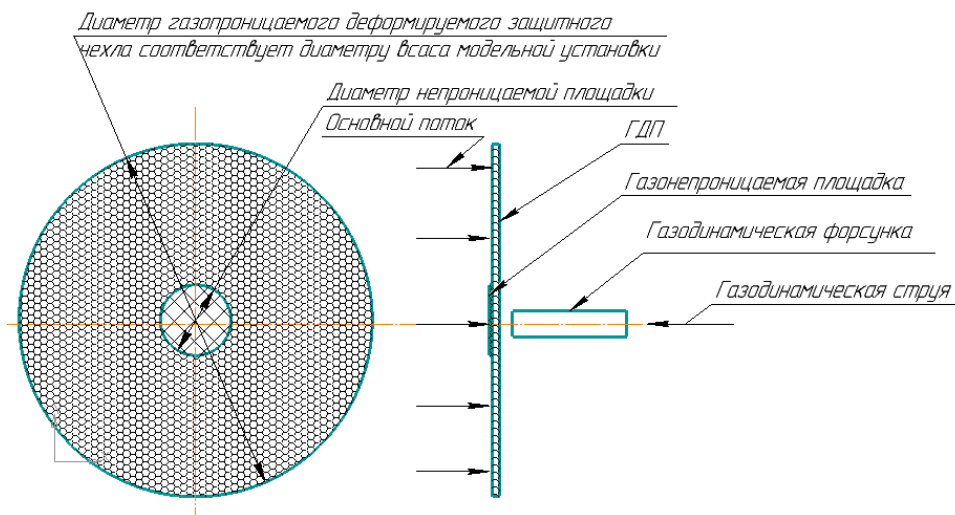


Рис. 1. Расположение газонепроницаемой площадки на ГДП

Ранее получены результаты очищения ГДП из пластика при скорости потока воздуха на всасе, равной 13,5 м/с, с диаметром площадки для увеличения усилия на ГДП, равной 50 мм. Давление в форсунке составляло 0,6 МПа. По итогу эксперимента происходил полный сброс льда с ГДП. На рисунке 2 продемонстрирован результат работы импульсной системы сброса льда с ГДП до и после проведения экспериментов.



Рис. 2. Внешний вид ГДП до и после проведения экспериментов

Затем было проведено численное моделирование обнаруженного эффекта. Были проведены эксперименты при одинаковой скорости потока. Давление изменялось от 0,2 до 0,6 МПа.

### ПОСТАНОВКА ЧИСЛЕННОЙ ЗАДАЧИ

Для численного исследования движения капли в потоке на входе ГДП установки «ФИЛЬТР» использовался метод конечных элементов; подробно процессы обледенения рассматривали авторы [6], и, опираясь на их опыт и анализ поведения капель в трудах [7] и [8], учитывается поле течения газодинамического потока.

Концептуальная модель газодинамического процесса включает в себя следующие допущения. Все поверхности конструкции ГДП являются теплоизолированными, учитывается сила тяжести, в качестве несомой среды используется совершенный газ. В соответствии с принятой концептуальной моделью разработана математическая модель, которая базируется на законах сохранения массы, импульса, энергии и замыкается уравнениями состояния совершенного

сжимаемого газа и турбулентности, а также начальными и граничными условиями, подобный подход применялся в работах [9] и [10].

Поле течения газодинамического потока аппроксимируется конечным числом расчетных точек. В расчетах используется лицензионное программное обеспечение ANSYS.

Математическая постановка для решения газодинамической составляющей исследования процессов обледенения приведена в ранее опубликованных работах [11-12].

Уравнение динамики движения капель:

$$\frac{\partial V_{drop}}{\partial t} = \frac{\pi d_{drop}^2}{8m_{drop}} C_D \rho_{drop} |V_{air} - V_{drop}| (V_{air} - V_{drop}) + g \left( 1 - \frac{\rho_{air}}{\rho_{drop}} \right) \quad (1)$$

где  $d_{drop}$  – диаметр капли;  $m_{drop}$  – масса капли;  $\rho_{drop}$  – плотность капли;  $V_{drop}$  – скорость капли;  $C_D$  – коэффициент сопротивления.

Уравнение сохранения массы капли:

$$\frac{\partial m_{drop}}{\partial t} = -m \pi d_{drop}^2 \quad (2)$$

где  $m$  – параметр вдува пара с единицы поверхности капли.

$$\frac{\partial T_{drop}}{\partial t} = \left( \left[ Nu \frac{\lambda_{air}}{d_{drop}} (T_{air} - T_{drop}) \right] - m q(T_{drop}) \right) \frac{6}{d_{drop} \rho_{drop} c_{p_{drop}}}, \quad (3)$$

где  $c_{p_{drop}}$  – теплоемкость капли;  $T_{drop}$  – температура капли;  $Nu$  – число Нуссельта.

Уравнение турбулентной энергии:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_{air} K) + \bar{v} \cdot (\rho_{air} V_{air} K) = \bar{v} \cdot \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \bar{v} K \right) + \mu_t G - \rho_{air} \varepsilon, \quad (4)$$

где  $\sigma_k$  – const;  $G$  – определяет скорость набора турбулентной энергии;  $\varepsilon$  – скорость рассеивания турбулентной энергии;  $K$  – турбулентная энергия.

Геометрия расчетной области простая, длина участка мала, целесообразно использование  $k$ - $\varepsilon$  модели турбулентности, являющейся допустимой при большем влиянии сил инерции в потоке по сравнению с силами вязкости.

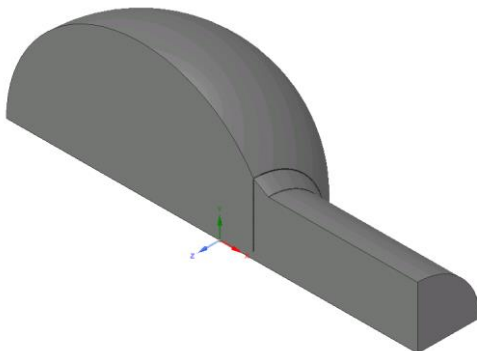
Уравнение скорости диссипации турбулентной энергии

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_{air} \varepsilon) + \bar{v} \cdot (\rho_{air} V_{air} \varepsilon) = \bar{v} \cdot \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \bar{v} \varepsilon \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{K} \mu_t G - C_2 f_1 \rho_{air} \frac{\varepsilon^2}{K}, \quad (5)$$

где  $\sigma_\varepsilon$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  – const.

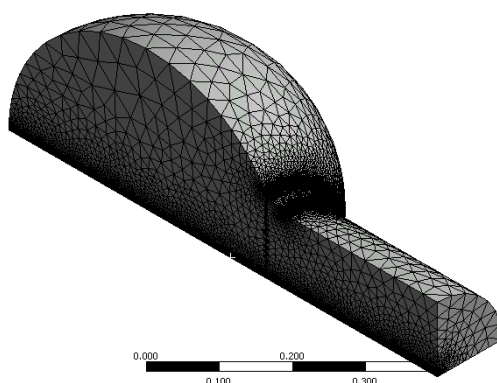
Концептуальная модель для оценки напряженно-деформированного состояния ГДП включает в себя следующие допущения: Начальное состояние расчетной модели недеформированное, модель материала – упругая, контакт между льдом и материалом ГДП обеспечивает соприкосновение по всей поверхности. Прочность на отдир ледяной корки от контактной поверхности соответствует пределу текучести льда.

Для проведения газодинамического вычислительного эксперимента была разработана следующая геометрическая модель. Она представляет из себя сектор проточного тракта установки «ФИЛЬТР», с круговой зоной забора, предназначенной для более точного распределения скоростей на всасе. Модель представлена на рис. 3.



**Рисунок 3.** Геометрическая модель расчетной области

Для последующего моделирования цифрового двойника комплекса используются сеточная модель, содержащая 1024 тыс. элементов, представленная на рис. 4.



**Рис. 4.** Сеточная модель «оптимального» качества

#### **РАСЧЕТ ОБЛЕДЕНЕНИЯ ГДП НА ВХОДЕ В УСТАНОВКУ «ФИЛЬТР»**

В ряде работ процесс моделирования обледенения рассмотрен подробнее. Например, в [5] авторы рассматривали процесс обледенения применительно к крылу летательного аппарата в аэродинамической трубе. В данном случае обледенение изучалось на цифровой модели экспериментального комплекса «ФИЛЬТР».

Расположение обозначений граничных условий для газодинамических расчетов в ANSYS задавались на поверхностях, представленных на рис. 5.

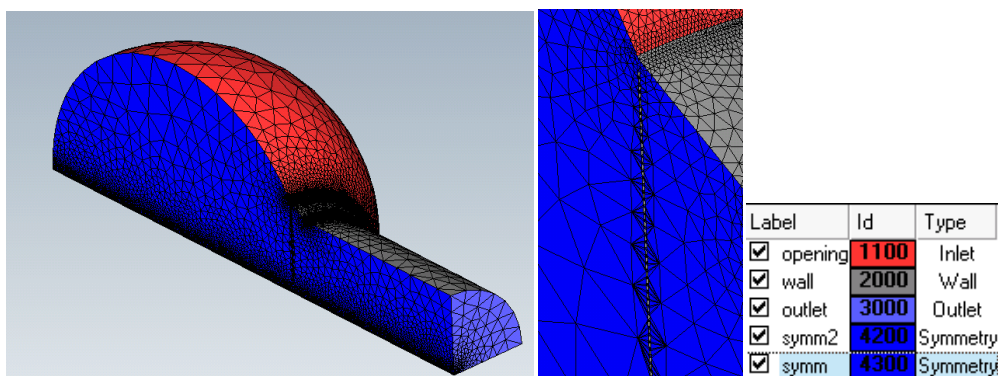


Рис. 5. Расположение обозначений граничных условий для газодинамических расчетов в ANSYS

Обозначение граничных условий, замыкающих математическую модель в области *Inlet* во вкладке *Fensap Ice*, представлены на рис. 6.

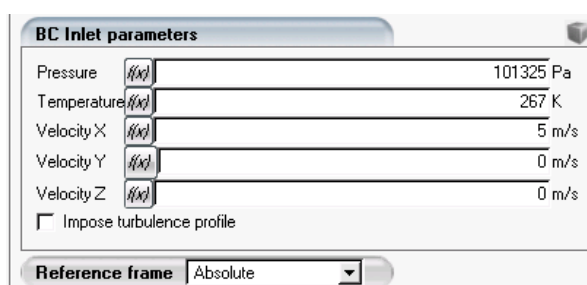


Рис. 6. Обозначение граничных условий, замыкающих математическую модель в области *Inlet* во вкладке *Fensap-Ice*.

Обозначение граничных условий, замыкающих математическую модель в области *Outlet* во вкладке *Fensap Ice*, представлены на рис. 7.

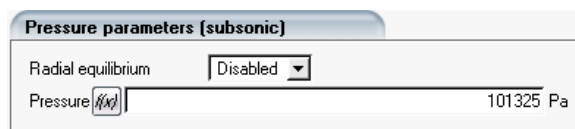


Рис. 7. Обозначение граничных условий, замыкающих математическую модель в области *Outlet* во вкладке *Fensap Ice*.

Для области *Wall* (рис. 4) задавались следующие обозначения ГУ: «*no-slip wall*», *no heat flux*. Что соответствовало гладкой стенке, без теплопередачи.

Для расчета в *Feensap ICE*, принимались следующие начальные условия: температура окружающей среды: - 6°C; Относительная влажность 63%. Эти условия соответствовали условиям в физическом эксперименте.

Распределение скоростей в проточном тракте модельной установки для динамической системы «газ-конструкция» представлено на рис. 8.

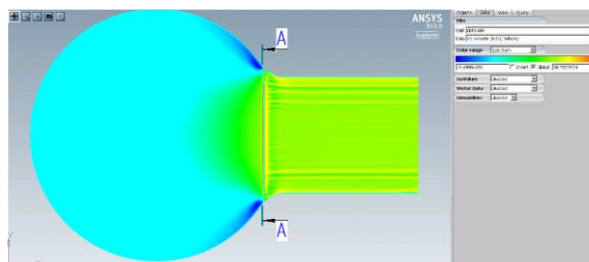


Рис. 8. Распределение скоростей в проточном тракте установки

Анализ поля скоростей показывает, что присутствуют зоны разрежения на границе области, обусловленные выбранной моделью, что позволяет добиться естественного распределения у всаса в плоскости А-А. Результаты обледенения ГДП, при обтекании потоком воздуха представлены на рис. 9.

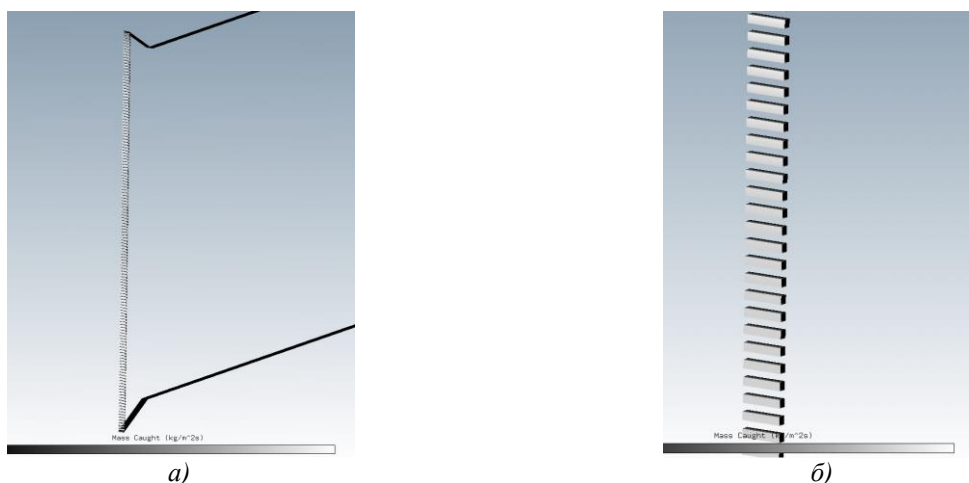


Рис. 9. Результаты обледенения ГДП: а) – общий вид, б) – укрупненно.

#### РАСЧЕТ РАЗРУШЕНИЯ ЛЕДЯНОЙ КОРКИ НА ГДП ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ СТРУЕЙ

В большинстве работ, изучающих методы борьбы с обледенением, рассматривают способы предотвращения обледенения путем нанесения на защищаемую поверхность особых покрытий [12-13], но также рассматривают и физическое устранение образовавшейся наледи. В данной работе рассматривался импульсный метод разрушения ледяной корки с очищаемой поверхности

Было проведено моделирование динамики разрушения льда на упругой подложке импульсным методом. Для этого был использован *ANSYS AUTODYN*.

Для получения решения динамической задачи разрушения льда на ГДП решены уравнения сохранения массы, импульса и энергии. Система уравнения замыкается начальными и граничными условиями. Происходит движение и перестроение сеточной модели вместе с разрушающимся льдом, с учетом свойств моделируемого материала. Плотность определяется по текущему объему зоны и ее начальной массе.

$$\frac{\rho_0 V_0}{V} = \frac{m}{V} \quad (6)$$

В связи с высокой сложностью задачи в качестве расчетной модели принята квазиплоская модель, представляющая собой ленту шириной в два ряда отверстий ГДП, и длиной равной диаметру всаса установки. Толщина ленты равняется толщине ленты ГДП. При этом, масса и форма льда соответствовала получившимся на предыдущем расчетном этапе для динамической модели «газ-конструкция». В расчетах принималось, что на ГДП, с одной из сторон постоянно действует сила, соответствующая давлению потока всаса. Навстречу ему подается импульс продолжительностью 0.1 с, соответствующий удару газодинамической струи. Результаты численного эксперимента по разрушению льда на ГДП представлены на рис. 10.

На рисунке видно, что лед разрушается, при этом сетка из пластика не испытывает неупругих напряжений, превышающих  $\sigma_T$ . План проведения численных экспериментов на ГДП из пластиковой сетки представлен в таблице 1.

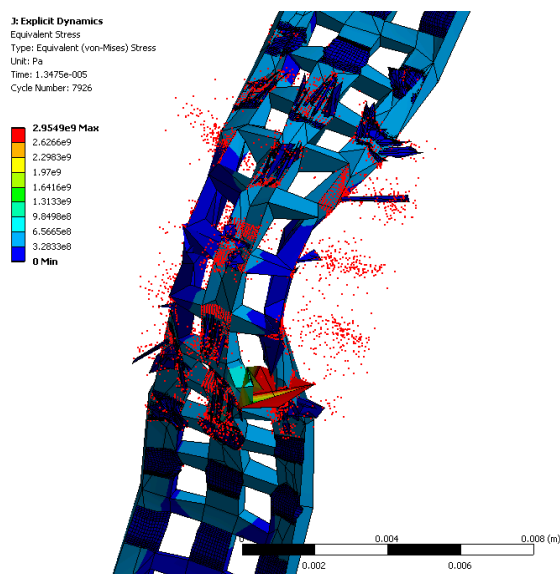


Рис. 10. Результаты численного моделирования разрушения льда на ГДП

Таблица 1


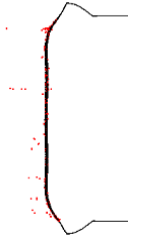
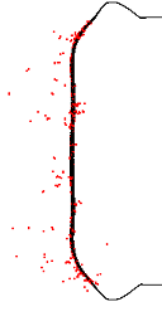
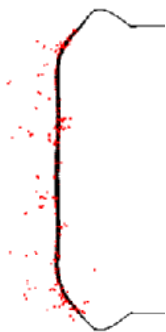
План проведения численных экспериментов на ГДП из пластиковой сетки

№ эксперимента	Давление, МПа	Скорость потока, м/с	Диаметр непроницаемой площадки / Диаметр газопроницаемой площадки, мм
1	0,2	13,5	50/285
2	0,4	13,5	50/285
3	0,5	13,5	50/285
4	0,6	13,5	50/285

Результаты численного эксперимента, демонстрирующие момент «удара» струи сжатого воздуха по непроницаемой области ГДП для пластиковой сетки представлены в таблице 2.

Анализ таблицы 2 показал, что при  $P \leq 0,5$  МПа в форсунке, скорости набегающего потока воздуха равной 13,5 м/с и газонепроницаемой площадке диаметром 50мм в зоне действия струи происходит полный сброс льда. При давлении  $P = 0,4$  МПа в форсунке, происходит частичный сброс льда, а при  $P \leq 0,2$  МПа в форсунке, очищения ГДП не происходит.

Результаты численного эксперимента для пластиковой сетки

№ эксперимента	Результаты численного моделирования	Описание наблюдения
1	2	3
1		нет сброса льда
2		частичный сброс льда по внешнему радиусу
3		полный сброс льда
4		полный сброс льда



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявлено, что эффективная очистка ВОУ от снега наблюдается при в роли защиты ГДП из пластика, для давлении газодинамической струи  $P \geq 0,5$ , скорости набегающего потока воздуха 13,5 м/с и диаметром газонепроницаемой площадки 50мм в зоне действия струи. Сравнив результаты математического моделирования с результатами физических экспериментов на экспериментальном комплексе «ФИЛЬТР» можно сделать вывод о том, что принятая математическая модель корректно отражает сброс льда с модельной ГДП.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Maksimov D.S., Modorskii V.Ya., Masich G.F., Kalyulin S.L., Mikryukov A.O., Cherepanov I.E., Sokolovskii M.I.** Developing cyber infrastructure and a model climatic wind tunnel based on the PNRPU high-performance computational complex // Communications in Computer and Information Science. – Switzerland AG: Springer Nature. – 2020. – CCIS Vol. 2163. – pp. 336 – 350.
2. **Kalyulin S.L., Modorskii V.Ya., Petrov V.Y., Masich G.F.** Computational and experimental modeling of icing processes by means of PNRPU high-performance computational complex // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1096, Iss. 1. – Art. №012081.
3. **Kalyulin S.L., Modorskii V.Ya., Maksimov D.S.** Physical modeling of the influence of the gas-hydrodynamic flow parameters on the streamlined surface icing with vibrations // International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2018), Amer. Inst. of Physics.
4. **Шорина Н.С., Смогунов В.В.** Проблема обледенения и краткий обзор современных методов борьбы с ним // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». [Shorina N.S., Smogunov V.V. The problem of icing and a brief overview of the modern methods of fighting it, (in Russian) // Proc. of the International Symposium “Reliability and Quality”.]
5. **Гайфуллин А.М., Зубцов А.В.** О моделировании обледенения крыла в АДТ // Тезисы Второй Международной школы-семинара «Модели и методы аэродинамики», с. 78-79. [Gayfullin A.M., Zubtsov A.V. On the modeling of the icing of a wing in a wind tunnel, (in Russian) // Abstracts of the 2nd International School-Workshop “Models and Methods of Aerodynamics”, pp. 78-79.]
6. **Guffond D., Hedde T., Henry R.** Overview of icing research at ONERA, Advisory Group for Aerospace Research and Development. Fluid Dynamics Panel (AGARD/FDP) Joint International Conference on Aircraft Flight Safety – Actual Problems of Aircraft Development, Zhukovsky, Russia, p. 7 (1993).
7. **Тимофеева М.В.** Влияние коагуляции капель воды на их распределение по размерам в рабочей части аэроохлаждающей установки // Журнал технической физики. – 2019. – Т. 89. – № 4. – С. 491-496. [Tiofeeva M.V. The effect of coagulation of water droplets on their size distribution in the operating part of an air-cooler device, (in Russian) // Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki. – 2019. – Vol. 89. – No. 4. – P. 491-496.]
8. **Амелюшкин И.А.** Исследование двухфазных потоков в приложении к проблемам обледенения и аэрофизического эксперимента: дисс. канд. физ. мат. наук. – Жуковский, 2014. – 144 с. [Amelyushkin I.A. Study of two-phase flows when applied to the problems of icing and aerophysical experiment: Cand. Sci. thesis, (in Russian). – Zhukovsky, 2014. – 144 p.]
9. **Амелюшкин И.А., Кудров М.А., Морозов А.О., Стасенко А.Л., Щеглов А.С.** Модели процессов, сопровождающих кристаллизацию переохлажденных капель // Труды ИСП РАН, том 32, вып. 4, 2020, стр. 235–244. [Amelyushkin I.A., Kudrov M.A., Morozov A.O., Stasenko A.L., Sheglov A.S. Models of processes accompanying crystallization of supercooled droplets, (in Russian) // Trudy ISP RAN, vol. 32, issue 4, 2020, pp. 235–244.]
10. **Amelyushkin I.A.** Mathematical models of two-phase flows' interaction with a solid body // Journal of Physics: Conference Series, vol. 1129, 2018, article no. 012003.
11. **Калюлин С.Л., Модорский В.Я.** Численное моделирование обледенения при вибрациях аэродинамического профиля // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2023. – № 72. – С. 100–110. [Kalyulin S.L., Modorskii V.Ya. Numerical simulation of icing under airfoil vibrations, (in Russian) // PNRPU Aerospace Engineering Bulletin. – 2023. – No. 72. – P. 100–110.]
12. **Kalyulin S.L., Modorskii V.Y., Cherepanov I.E.** Numerical modeling of the influence of the gas-hydrodynamic flow parameters on streamlined surface icing // AIP Conference Proceedings. 2018. V. 2027. No. 1. Art. no. 030180.
13. **Корноухова Н.С., Кротиков В.А., Красильникова Л.Н., Чуппина С.В., Шнурков Н.В.** Применение антиобледенительного покрытия для радиотехнических устройств // Приложение "ТЕХНОЛОГИИ ОБОРУДОВАНИЕ МАТЕРИАЛЫ" к журналу "Экономика и производство", №7, июль 1999. [Kornoukhova N.S., Krotikov V.A., Krasilnikova L.N., Chuppina S.V., Shnurkov N.V. Application of an anti-icing coating for radio devices, (in Russian) // Supplement “TECHNOLOGIES EQUIPMENT MATERIALS” to the journal “Economics and Manufacture”, No. 7, July 1999.]

## ОБ АВТОРАХ

**МАКСИМОВ Данила Сергеевич**, аспирант кафедры Ракетно-космической техники и энергетических систем ПНИПУ, инженер Центра высокопроизводительных вычислительных систем ПНИПУ.

**МОДОРСКИЙ Владимир Яковлевич**, доктор технических наук, профессор кафедры МКМК ПНИПУ.

**ЧЕРЕПАНОВ Иван Евгеньевич**, инженер Центра высокопроизводительных вычислительных систем ПНИПУ.

**МИКРЮКОВ Антон Олегович**, аспирант кафедры Ракетно-космической техники и энергетических систем ПНИПУ, инженер Центра высокопроизводительных вычислительных систем ПНИПУ.

**КАЛЮЛИН Станислав Львович**, кандидат технических наук, инженер Центра высокопроизводительных вычислительных систем ПНИПУ.

#### METADATA

**Title:** Numerical simulation of ice destruction by gas dynamic jet.

**Authors:** D.S. Maksimov<sup>1</sup>, V.Y. Modorsky<sup>2</sup>, I.E. Cherepanov<sup>3</sup>, A.O. Mikryukov<sup>4</sup>, S.L. Kalyulin<sup>5</sup>

**Affiliation:**

Perm national polytechnic university, Perm, Russia.

**Email:** <sup>1</sup>dsm@pstu.ru, <sup>2</sup>modorsky@pstu.ru, <sup>3</sup>cherepanovie@sbiw.ru, <sup>4</sup>anto-mikryuko@yandex.ru, <sup>5</sup>ksl-91@gmail.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), vol. 27, no. 4 (102), pp. 99-108, 2023. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** When operating gas compressor stations during heavy snowfalls, uncontrolled formation of ice build-up on the filters of air-purifying devices (ACDs) can occur, which leads to accidents and downtime. Previously, it was proposed to use a gas-dynamic system for cleaning gas-permeable deformable surfaces (GPDS) to clean HEU filters. An experimental setup has been created. The paper discusses numerical modeling of ice destruction on the gas turbine engine. To destroy ice, the energy of a gas-dynamic jet is used, modeled as a short-term pulse. The study is carried out in a 3D setting, taking into account the suction flow pressure and the interaction of the deformable substrate with the ice crust. The results obtained were verified. The research is carried out using ANSYS Explicit Dynamics on the high-performance computing complex of PNRPU. The main results on the influence of a gas-dynamic jet on the cleaning ability of a gas turbine engine are presented.

**Key words:** icing; ice destruction; gas-permeable deformable surfaces; high-performance computing complex; physical modeling/

**About authors:**

**MAKSIMOV, Danila Sergeevich**, graduate student of the Department of Rocket and Space Engineering and Energy Systems of PNRPU, engineer of the Center for High-Performance Computing Systems of PNRPU.

**MODORSKY, Vladimir Yakovlevich**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of MKMK PNIU.

**CHERPANOV, Ivan Evgenievich**, engineer of the Center for High-Performance Computing Systems PNRPU.

**MIKRYUKOV, Anton Olegovich**, graduate student of the Department of Rocket and Space Engineering and Energy Systems of PNIU, engineer of the Center for High-Performance Computing Systems of PNIU.

**KALYULIN, Stanislav Lvovich**, candidate of technical sciences, engineer of the Center for High-Performance Computing Systems PNRPU.