

Расчетно-экспериментальное моделирование процессов обледенения с использованием высокопроизводительного вычислительного комплекса ПНИПУ

С.Л. Калюлин¹, В.Я. Модорский¹

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), пр. Комсомольский 29, Пермь, Россия, 614099

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы расчетно-экспериментального моделирования процессов обледенения с использованием высокопроизводительного вычислительного комплекса ПНИПУ. Приводятся результаты вычислительного эксперимента по оценке параметров газодинамического потока в экспериментальной малогабаритной климатической аэродинамической трубе (ЭМКАДТ) «Обледенение», которые позволили уточнить технические требования на компоненты экспериментальной установки. Представлена конструктивная схема и основные элементы ЭМКАДТ, а так же первые результаты физических экспериментов, подтверждающие работоспособность созданной в ПНИПУ малогабаритной климатической аэродинамической трубы.

1. Актуальность проблемы

Актуальная фундаментальная научная проблема образования льда на элементах конструкции летательных аппаратов в полетных условиях является одним из наиболее значимых факторов природного воздействия, оказывающих существенное влияние на безопасность полетов. Образующиеся на поверхности крыльев самолетов ледяные наросты приводят к существенному снижению аэродинамических характеристик и управляемости самолета, а образующийся на входных участках авиационных двигателей лед, при определенных условиях, может сорваться и попасть в двигатель, что, в свою очередь, может привести к существенному повреждению элементов компрессора и, в итоге, быть причиной его остановки. Статистика аварий, по данным «Army Aircraft Icing» (2002 г.), показывает, что в период с 1985 по 1999 годы произошло 255 случаев обледенения самолетов, из них 12% с жертвами, убытки составили 28 млн. \$. По данным «Aircraft Owners and Pilot Association» (2007 г.) – 202 случая обледенения самолетов за 1998-2007 годы, из них 21% с жертвами. Проблема сохраняет остроту и в настоящее время. Особое внимание этим вопросам необходимо уделять в связи с созданием нового семейства авиационных двигателей ПД-14 на этой основе.

Что касается современного состояния вопроса по исследованию мировыми научными организациями процессов обледенения, то можно выделить два наиболее развитых зарубежных центра компетенции в части моделирования процессов обледенения и защиты от обледенения авиационной техники – это североамериканская группа организаций и европейская группа.

Главными научными центрами североамериканской группы являются NASA Glenn Research Center (США) и NRC (Канада). Данные организации имеют хорошую экспериментальную базу

– аэродинамические трубы с возможностью имитации обледенения и единый расчетный код для обледенения LEWICE.

Главными научными центрами европейской группы являются организации ONERA, CIRA и Cranfield University. Эти организации также обладают большим количеством разнообразных экспериментальных установок, однако, все они имеют собственные расчетные коды для моделирования обледенения.

В настоящее время в РФ имеется целый ряд аэродинамических труб: АДТ Т-101 (30 МВт), АДТ Т-102 (500 кВт), АДТ Т-103 (4400 кВт), АДТ Т-104 (28,4 МВт), АДТ Т-105 (450 кВт), АДТ Т-106 (32 МВт), АДТ Т-128 (100 МВт), АДТ Т-1-2 (1000 кВт), АДТ Т-5 (315 кВт), расположенные в ФГУП «ЦАГИ», г. Жуковский и Т-324 (0,5 МВт), Т-313, Т-325, Т-326, Т-327, Т-333, ИТ-302, АТ-303 в ИТПМ СО РАН им. С.А. Христиановича, г. Новосибирск и др. Они способны воспроизводить практически весь перечень полетных условий (регламентированный существующими отечественными нормами) и используются для сертификации авиационной техники. Некоторые из них доработаны для проведения аэродинамических испытаний в условиях обледенения.

Испытания на данных крупногабаритных аэродинамических трубах обуславливают чрезвычайно высокий уровень потребления энергии при работе. Как следствие, это приводит к высокой стоимости проведения испытаний, связанной, в том числе, с необходимостью использования приводов и холодильных установок большой мощности, больших площадей производственных помещений, достаточного количества высококвалифицированного обслуживающего персонала.

Дороговизна испытаний не позволяет создать эффективные методики изучения процессов обледенения. Современные методики проектирования и создания систем защиты от обледенения включают в себя как этап математического моделирования процессов обледенения и работы систем защиты для выбора наиболее оптимальной схемы, так и этап проведения испытаний системы в условиях обледенения (естественных или искусственных) для определения реальной эффективности. При этом существующий уровень методик (в т.ч. и зарубежных) математического моделирования физических процессов, протекающих при обледенении и работе противообледенительных систем, обуславливает необходимость проведения большого объема экспериментальных работ, а так же разработку методик моделирования процессов обледенения.

2. Создание малогабаритной климатической аэродинамической трубы

В ПНИПУ создана экспериментальная малогабаритная климатическая аэродинамическая труба (ЭМКАДТ) «Обледенение» [1,2], имеющая на порядок меньшее энергопотребление по сравнению с существующими аналогами, а так же проведена адаптация к экспериментальной установке аппаратно-программного комплекса системы измерения и регистрации быстропротекающих процессов на базе высокопроизводительного вычислительного комплекса (ВВК) ПНИПУ [3,4]. Было принято решение использовать совместно физический и вычислительный (на базе ВВК ПНИПУ) эксперименты.

На рисунке 1 представлена разработанная конструктивная схема ЭМКАДТ «Обледенение», которая включает в себя следующие элементы:

1. Морозильная камера – для расположения в его внутреннем объеме аэродинамической трубы полностью, с возможностью настройки необходимой температуры;
2. Нагнетатель – для подачи равномерного потока воздуха на вход в рабочую зону;
3. Пароувлажнитель – для создания заданной влажности в рабочей зоне аэродинамической трубы;
4. IP-камера с инфракрасной подсветкой – для отслеживания процессов обледенения экспериментальной модели в режиме реального времени в условиях отсутствия света;
5. Метеостанция с выносными беспроводными датчиками – для измерения данных температуры, скорости, влажности в камере морозильного шкафа, снятия статических характеристик в режиме реального времени;

6. Прозрачная труба из оргстекла круглого сечения – рабочая часть аэродинамической трубы, в которой непосредственно размещена экспериментальная модель;
7. Системы ручного регулирования скорости вентилятора, температуры нагрева ТЭНа – для возможности плавной регулировки необходимыми параметрами;
8. Датчики температуры, влажности, давления – для измерения параметров в рабочей зоне аэродинамической трубы;
9. Виброэлемент – для возбуждения вибраций на экспериментальной модели;
10. Система автоматического регулирования – микроконтроллерный блок с необходимыми элементами на базе системы измерения и регистрации быстропротекающих процессов National Instrument [5,6] для управления в режиме реального времени включением/выключением морозильного шкафа и пароувлажнителя, используя данные с датчиков и данные из предварительно подготовленных программ управления.

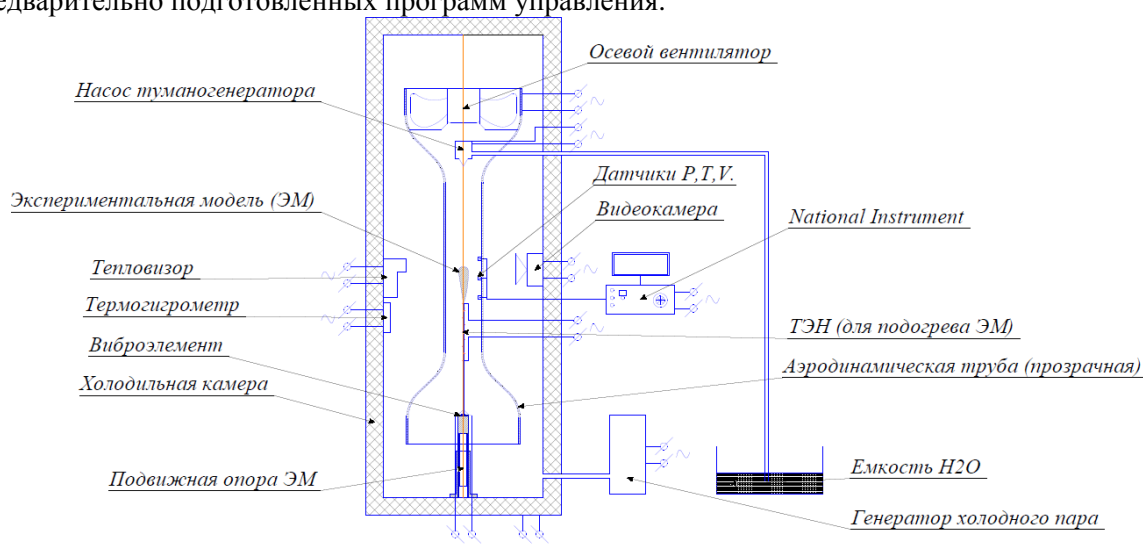


Рисунок 1. Конструктивная схема ЭМКАДТ «Обледенение».

3. Проведение численных расчетов газодинамических процессов в камере малогабаритной ЭМКАДТ «Обледенение»

На основании разработанной конструктивной схемы ЭМКАДТ «Обледенение» были предварительно подобраны габаритные размеры нагнетателя, рабочей части, расстояния до стенок холодильной камеры.

Для оценки характера течений потока в камере ЭМКАДТ «Обледенение» и подбора необходимых компонент экспериментальной установки с конкретными газодинамическими параметрами и габаритно-присоединительными размерами были проведены численные расчеты газодинамических процессов.

Для выполнения численного моделирования течения в ЭМКАДТ «Обледенение» сформулирована следующая физическая модель:

- газодинамические процессы рассматриваются в стационарной постановке;
 - рассматривается течение не реагирующего совершенного газа;
 - газодинамический поток вязкий, однофазный;
 - не учитывается сила тяжести газа;
 - одновременно исследуется течение в рабочей зоне, нагнетателе и во внутреннем охлажденном объеме холодильной камеры;
 - стенки рабочей части непроницаемые, адиабатические и шероховатые (принимается, что все выступы элементов шероховатости лежат внутри вязкого слоя), с прилипанием частиц;
 - для задания граничных условий входа/выхода принят разрыв в зоне после нагнетателя.
- Построена следующая твердотельная 3D модель ЭМКАДТ «Обледенение» (Рисунок 2):

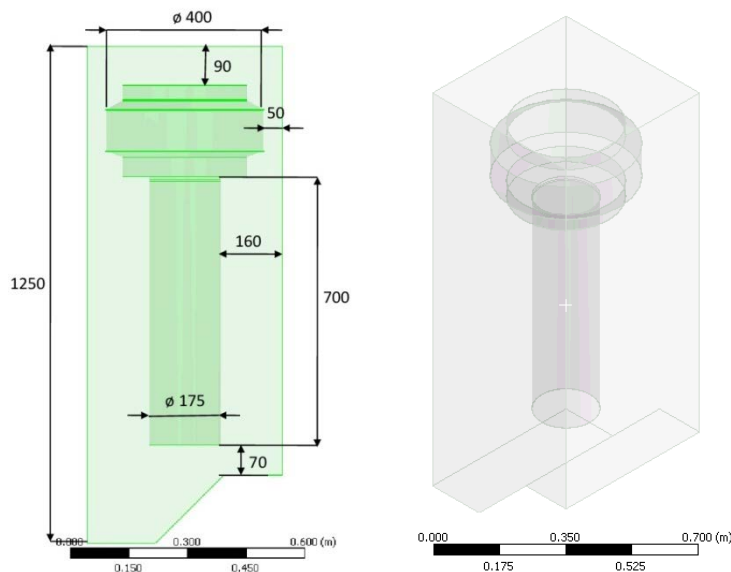


Рисунок 2. Твёрдотельная 3D модель ЭМКАДТ «Обледенение» (мм).

В соответствии с принятой физической моделью разработана математическая модель, которая базируется на законах сохранения массы, импульса, энергии и замыкается уравнениями состояния идеального сжимаемого газа и турбулентности, а также начальными и граничными условиями. Требуется решить систему из четырех независимых уравнений – систему уравнений Навье-Стокса (1-4) [7]:

– закон сохранения массы

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \tag{1}$$

– закон сохранения импульса

$$\frac{\partial \rho \vec{V}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \otimes \vec{V}) = -\nabla P + \nabla \cdot ((\mu + \mu_t)(\nabla \vec{V} + (\nabla \vec{V})^T)) \tag{2}$$

– закон сохранения энергии

$$\frac{\partial (\rho H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} H) = \frac{\partial P}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\left(\frac{\lambda}{c_p} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \nabla H \right) \tag{3}$$

– уравнение состояния

$$P = \rho R T \tag{4}$$

где t – время, ρ – плотность, V – скорость, P – давление, μ – динамическая вязкость, μ_t – турбулентная динамическая вязкость, H – энтальпия, c_p – теплоемкость, λ – коэффициент теплопроводности, Pr_t – турбулентное число Прандтля, R – универсальная газовая постоянная.

Математическая модель замыкается следующими начальными и граничными условиями:

$$\begin{aligned} P_{полн}|_{вход} &= 1 \text{ атм.} \\ T_{полн}|_{вход} &= -20^\circ \text{C} \\ G|_{выход} &= -0,64 \text{ кг/с}^2 \end{aligned}$$

Расположение зоны разрыва твердотельной модели для задания граничных условий показано на Рисунке 3:

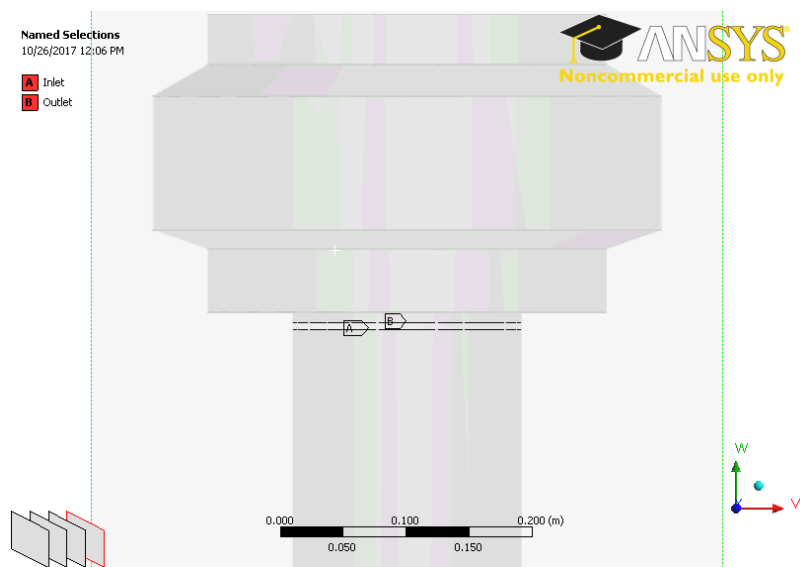


Рисунок 3. Зона разрыва твердотельной модели для задания граничных условий (ANSYS).

Массовый расход соответствует максимальной предполагаемой мощности нагнетателя, для достижения скорости потока в рабочей зоне, равной 18 м/с.

Для решения исходной системы дифференциальных уравнений в частных производных [8-12], твердотельная 3D модель ЭМКАДТ «Обледенение» была разбита на ячейки. Сеточная модель, построенная с использованием ANSYS Mesher, представлена на рисунке 4.

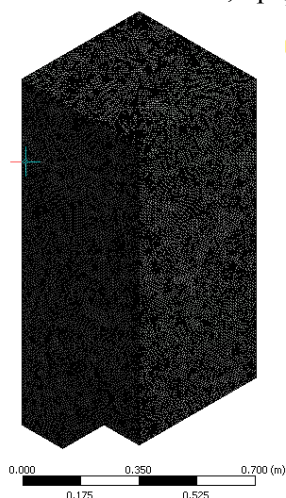


Рисунок 4. Сеточная модель ЭМКАДТ «Обледенение» (ANSYS Mesher).

Число конечных элементов в ЭМКАДТ «Обледенение» составило 2,76 млн. Сеточная модель преимущественно состоит из гексагональных элементов. Максимальный размер элемента 10 мм.

В качестве аппаратного обеспечения для вычислительных экспериментов использовались ресурсы ВВК ПНИПУ (пиковая производительность 24 ТФлопс) [7-12].

Основные технические характеристики ВВК ПНИПУ:

- 95 вычислительных узлов;
- 128 четырехядерных процессоров «Barcelona-3» (всего 512 ядер);
- 62 восьмиядерных процессоров «Intel Xeon E5-2680» (всего 480 ядер);
- Пиковая производительность 24,096 Тфлопс;
- Производительность в тестовом пакете Linpack 78%;
- Объем системы хранения информации 27 ТБ;

- Объем оперативной памяти 5888 ГБ (32 ГБ/узел с процессорами «Barcelona-3», 128 ГБ/узел с процессорами «Intel Xeon E5-2680»);
- 12 вычислительных модулей GPU NVIDIA Tesla M2090 (512 ядер, 6 ГБ).

В результате проведения газодинамических расчетов получены поля распределения скоростей, статических, полных давлений, температур и других газодинамических параметров. Ниже представлены поля линий тока (Рисунок 5), полного давления (Рисунок 6), полной температуры (Рисунок 7).

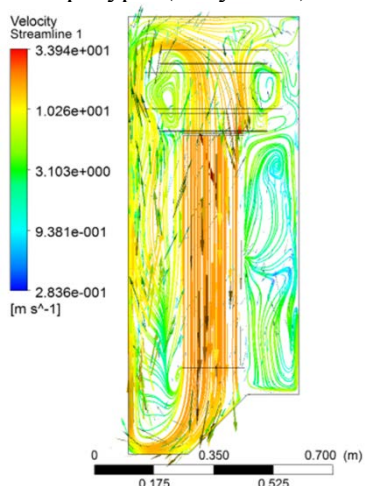


Рисунок 5. Линии тока в ЭМКАДТ «Обледенение» (ANSYS).

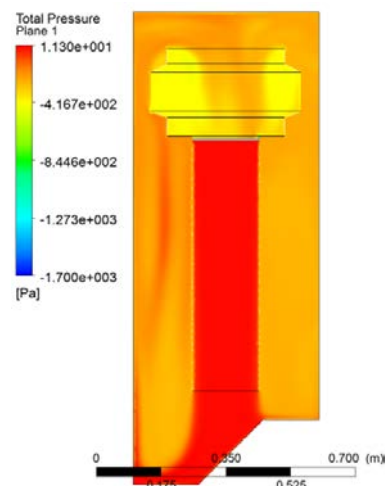


Рисунок 6. Поле распределения полного давления в ЭМКАДТ «Обледенение» (ANSYS).

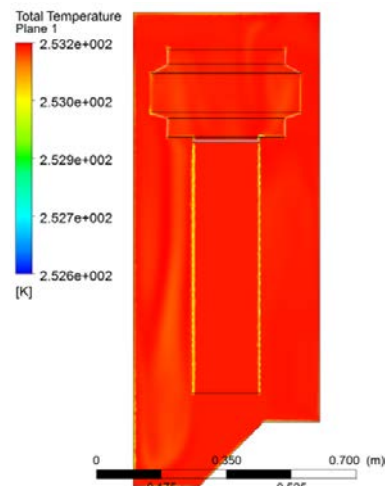
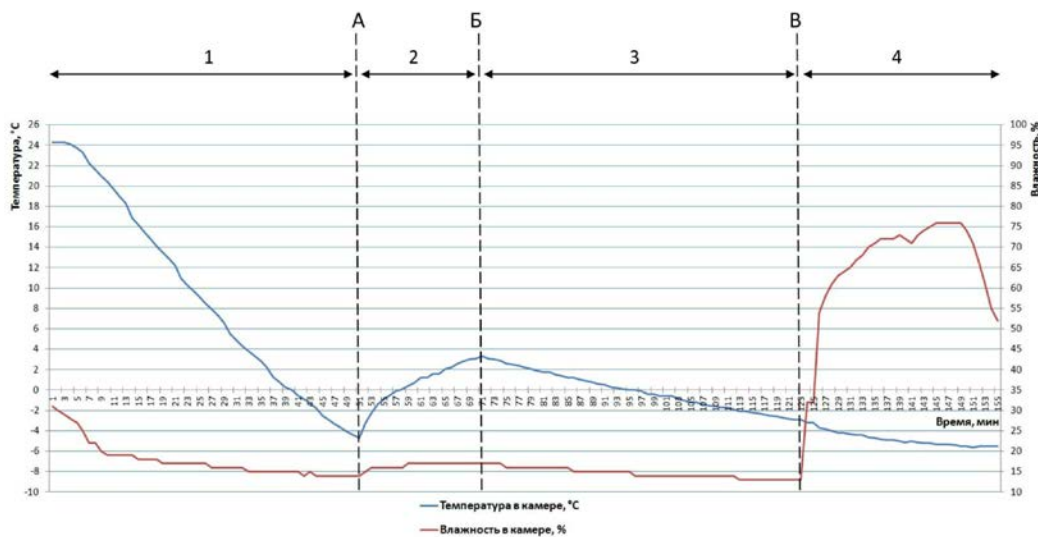


Рисунок 7. Поле распределения полной температуры в ЭМКАДТ «Обледенение» (ANSYS).



- | | |
|---|--|
| 1 – охлаждение камеры от комнатных условий ($T = 24,3 \text{ }^\circ\text{C}$, $\phi = 31 \%$) | A – включение вентилятора ($V = 14,7 \text{ м/с}$) при $T = -5,0 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| 2 – нагрев от вентилятора | B – переключение вентилятора на $V = 6,4 \text{ м/с}$ |
| 3 – охлаждение с вентилятором (в 5,7 раз медленнее, чем без него) | B – включение пароувлажнителя |
| 4 – повышение влажности до 76%, обледенение. | |

*149 минута эксперимента – пар перестал поступать в камеру, произошло обледенение трубки подачи от пароувлажнителя.

Рисунок 8. Зависимость температуры в рабочей зоне и влажности от времени с указанием режимов работы ЭМКАДТ «Обледенение».

Поля распределения полных давлений и температур равномерны. Численные величины соответствуют заданным значениям на границах.

По результатам проведенных газодинамических расчетов в ANSYS выявлены возможные габаритные размеры нагнетателя и рабочей зоны ЭМКАДТ «Обледенение», получена высокая однородность газодинамического потока в рабочей зоне, получены газодинамические параметры, обеспечивающие равномерный поток на входе в нагнетатель.

Проведенные численные расчеты позволили сформировать подробные технические требования на необходимые компоненты ЭМКАДТ «Обледенение».

4. Проведение физических экспериментов на ЭМКАДТ «Обледенение»

На созданной в ПНИПУ ЭМКАДТ «Обледенение» была проведена серия первых физических экспериментов. На рисунке 8 представлен график изменения статической температуры в рабочей зоне аэродинамической трубы и влажности от времени для одного из запусков ЭМКАДТ «Обледенение».

По итогам данного эксперимента выяснилось, что необходима установка ТЭНа на концевую часть трубки подачи пара для исключения ее обледенения.

На рисунках 9-11 приведены фотографии с IP-камеры до начала эксперимента и в процессе обледенения экспериментальной модели:



Рисунок 9. Экспериментальная модель в рабочей зоне до начала эксперимента.



Рисунок 10. Обледенение Экспериментальной модели.



Рисунок 11. Образование наледи на концевой части трубки подачи пара.

Получены первые данные физических экспериментов на ЭМКАДТ «Обледенение», подтверждена работоспособность экспериментальной установки.

5. Выводы

1. Получены результаты вычислительного эксперимента по оценке параметров газодинамического потока в ЭМКАДТ «Обледенение», которые позволили сформировать подробные технические требования на необходимые компоненты экспериментальной установки;

2. На основе данных вычислительного эксперимента в ПНИПУ создана ЭМКАДТ «Обледенение»;

3. Проведена адаптация к экспериментальной установке аппаратно-программного комплекса системы измерения и регистрации быстропротекающих процессов на базе ВВК ПНИПУ;

4. Проведены первые физические эксперименты по моделированию процессов обледенения, получены экспериментальные данные в режиме реального времени, подтверждена работоспособность ЭМКАДТ «Обледенение».

6. Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 17-47-590017 р_а «Ресурсосберегающая технологическая платформа для экспериментальных и вычислительных исследований процессов обледенения при вибрациях в авиационной технике на базе СуперЭВМ»).

7. Литература

- [1] Kalyulin, S.L. Optimization of Drop Characteristics in a Carrier Cooled Gas Stream Using ANSYS and Globalizer Software Systems on the PNRPU High-Performance Cluster / S.L. Kalyulin, E.V. Shavrina, V.Y. Modorskii, K.A. Barkalov, V.P. Gergel // Communications in Computer and Information Science. – 2017. – Vol. 753. – P. 331-345.
- [2] Kalyulin, S.L. Numerical design of the rectifying lattices in a small-sized wind tunnel / S.L. Kalyulin, V.Ya. Modorskii, A.P. Paduchev // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1770. – N 030110.
- [3] Gaynutdinova, D.F. Infrastructure of Data Distributed Processing in High-Speed Process Research Based on Hydroelasticity Tasks / D.F. Gaynutdinova, V.Y. Modorsky, G.F. Masich // Procedia Computer Science. – 2015. – Vol. 66. – P. 556-563.

- [4] Modorskii, V.Y. Optimization in Design of Scientific Products for Purposes of Cavitation Problems / V.Y. Modorskii, D.F. Gaynutdinova, V.P. Gergel, K.A. Barkalov // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1738. – N 400013.
- [5] Модорский, В.Я. Анализ влияния конструкции входа в соединительный канал на колебательные процессы в первой ступени модельного двухступенчатого насоса / И.А. Арбузов, А.А. Ташкинов, Д.В. Щенятский, Б.Е. Кириевский, Р.В. Бульбович, В.Я. Модорский, П.В. Писарев // Научно-технический вестник Поволжья. – 2012. – № 6. – С. 108-111.
- [6] Kozlova, A.V. Modeling of Cooling Processes in the Variable Section Channel of a Gas Conduit / A.V. Kozlova, V.Y. Modorskii, A.N. Ponik // Russian Aeronautics. – 2010. – Vol. 53(4). – P. 401-407.
- [7] Modorskii, V.Ya. Research of aerohydrodynamic and aeroelastic processes on PNRPU HPC system / V.Ya. Modorskii, N.A. Shevelev // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1770. – N. 020001.
- [8] Butymova, L.N. Development and application of a unified algorithm for solving the interdisciplinary problem of modeling aeroelastic processes in the labyrinth seal of centrifugal compressors / L.N. Butymova, V.Ya. Modorskii // AIP Conference Proceedings. – 2017. – Vol. 1893. – N. 030067.
- [9] Butymova, L.N. Numerical modeling of the labyrinth seal taking into account vibrations of the gas transmittal unit rotor in aeroelastic formulation / L.N. Butymova, V.Ya. Modorskii // CEUR Workshop Proceedings. – 2017. – Vol. 1902. – P. 10-17.
- [10] Модорский, В.Я. Параллельный расчет газодинамического процесса в крупногабаритном нагнетателе / В.Я. Модорский, А.Ф. Шмаков, Л.Н. Бутымова, Д.Ф. Гайнутдинова, Е.В. Мехоношина, С.Л. Калюлин // Научный сервис в сети Интернет: многообразие суперкомпьютерных миров. Труды Международной суперкомпьютерной конференции. Российская академия наук. Суперкомпьютерный консорциум университетов России. – 2014. – С. 258-262.
- [11] Gaynutdinova, D.F. Infrastructure of data distributed processing in high-speed process research based on hydroelasticity tasks / D.F. Gaynutdinova, V.Ya. Modorskii, G.F. Masich // Procedia Computer Science 4th. – 2015. – P. 556-563.
- [12] Gaynutdinova, D.F. Optimization in Design of Scientific Products for Purposes of Cavitation Problems / D.F. Gaynutdinova, V.Ya. Modorskii, V.P. Gergel // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1738. – N 400013.

Computational and experimental modeling of icing processes by means of PNRPU high-performance computational complex

S.L. Kalyulin¹, V.Ya. Modorskii¹

¹Perm National Research Polytechnic University, 614990, 29, Komsomolsky Av., Perm, Russia

Abstract. The article deals with calculation and experimental modeling of icing processes using the high-performance computational complex in PNRPU. Results of the computational experiment for estimating parameters of the gas-dynamic flow in the experimental small-sized climatic wind tunnel (ESCWT) "Icing" are presented, which allowed us to refine the technical requirements for the experimental setup components. The constructive scheme and the main elements of ESCWT are demonstrated, as well as the first results of physical experiments confirming the efficiency of the small-sized climatic wind tunnel developed in PNRPU.

Keywords: small-sized climatic wind tunnel, icing processes, computational and experimental modeling, gas flow, ANSYS.