

УДК 532.526 : 532.24

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.240418.17.262

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУШНО-КАПЕЛЬНОЙ СМЕСИ ВДОЛЬ ОБТЕКАЕМОЙ КРИВОЛИНЕЙНОЙ ПОВЕРХНОСТИ С УЧЕТОМ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ

АЛЕКСЕЕНКО С. В.^{1*}, к. т. н.,
ЮШКЕВИЧ О. П.², к. т. н.

^{1*} Кафедра механотроники, Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, Днепро, пр. Гагарина, 72, 49000, Украина, тел. +38(050)-480-85-03, e-mail: alexeyenko_sv@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-0320-989X

² Кафедра механотроники, Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, Днепро, пр. Гагарина, 72, 49000, Украина, тел. +38(066)-775-37-58, e-mail: ReilTO@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-7199-8424

Аннотация. Постановка проблемы. Определена необходимость нахождения параметров воздушно-капельного потока вдоль обтекаемой криволинейной поверхности на основе разработанного программно-методического обеспечения, позволяющего моделировать процессы обтекания тел многофазными потоками. Для описания внешнего воздушно-капельного потока, а также процессов выпадения влаги на обтекаемую поверхность использована модель взаимопроникающих сред, основанная на решении уравнений Навье – Стокса и учитывающая взаимодействие несущего газа и капель жидкости. Численное моделирование процесса распределения жидкости, с учетом фазовых переходов, вдоль обтекаемой поверхности выполнено с использованием метода поверхностных контрольных объемов, базирующегося на уравнениях неразрывности, сохранения количества движения и энергии. **Использована методика** определения конвективного теплообмена на основе решения уравнений Навье – Стокса и модели турбулентности Spalart – Allmaras с коррекцией для шероховатой стенки и приведено сравнение с известными результатами, полученными в двумерном приближении с использованием интегральных соотношений. **Представлены результаты** исследований на примере задачи обледенения аэродинамических поверхностей в потоке, содержащем переохлажденные капли воды. Приведены распределения параметров потока обтекаемой поверхности, а также основных величин, входящих в уравнения массовых и тепловых балансов. **Выводы.** Разработанная методика дает хорошее качественное и количественное согласование результатов с известными, полученными с помощью полуэмпирических одномерных соотношений, и, при этом, может быть использована при решении задач в трехмерной постановке. Результаты работы могут быть использованы для решения широкого круга прикладных задач, например, при моделировании процессов водно-воздушного охлаждения тонких острогой рельсов, которые подвергаются упрочняющей термической обработке, с использованием нагрева ТВЧ, упрочняющей термической обработки, напыления расплавов на поверхности металлоизделий, алитирования труб.

Ключевые слова: математическое моделирование; воздушно-капельный поток; осаждение влаги на обтекаемую поверхность; обледенение криволинейных поверхностей; нарастание льда; водно-воздушное охлаждение; рельсовые детали; остряки стрелочных переводов

РОЗПОДІЛ ПАРАМЕТРІВ ПОВІТРЯНО-КРАПЕЛЬНОЇ СУМІШІ УЗДОВЖ ОБТІЧНОЇ КРИВОЛІНІЙНОЇ ПОВЕРХНІ З УРАХУВАННЯМ ФАЗОВИХ ПЕРЕХОДІВ

АЛЕКСЕЄНКО С. В.^{1*}, к. т. н.,
ЮШКЕВИЧ О. П.², к. т. н.

^{1*} Кафедра механотроніки, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, пр. Гагаріна, 72, 49000, Україна, тел. 050-480-85-03, e-mail: alexeyenko_sv@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-0320-989X

² Кафедра механотроніки, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, пр. Гагаріна, 72, 49000, Україна, тел. +38(066)-775-37-58, e-mail: ReilTO@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-7199-8424

Анотація. Постановка проблеми. Визначено необхідність знаходження параметрів повітряно-крапельного потоку уздовж обтічної криволинійної поверхні за допомогою розробки програмно-методичного забезпечення, яке дозволяє моделювати процеси обтікання тіл багатofазними потоками. Для опису зовнішнього повітряно-крапельного потоку, а також процесів випадання вологи на обтічну поверхню використано модель взаємопроникних середовищ, яка базується на розв'язанні рівнянь Нав'є – Стокса і враховує взаємодію несеного газу і крапель рідини. Числове моделювання процесу розподілу рідини, з урахуванням фазових переходів, уздовж обтічної поверхні виконано із застосуванням методу поверхневих контрольних об'ємів, що базується на рівняннях нерозривності, збереження кількості руху і енергії. **Застосовано методіку** визначення конвективного теплообміну на основі розв'язку рівнянь Нав'є – Стокса і моделі турбулентності Spalart – Allmaras з корекцією для шорсткої стінки і наведено порівняння з відомими результатами,

отриманими у двовимірному наближенні з використанням інтегральних співвідношень. *Наведено результати* досліджень на прикладі задачі обмерзання аеродинамічних поверхонь у потоці, що містить переохолоджені краплі води. Наведено розподіл параметрів потоку уздовж обтічної поверхні, а також основних величин, що входять у рівняння масових і теплових балансів. *Висновки.* Розроблена методика дає хороше якісне і кількісне узгодження результатів із відомими, отриманими за допомогою напівемпіричних одновимірних співвідношень, і, при цьому, може бути застосовано для розв'язання задач у тривимірній постановці. Результати роботи можуть бути використані для розв'язання широкого кола прикладних задач, наприклад, для моделювання процесів водо-повітряного охолодження тонких вістрякових рейок, термічної обробки, наплення розплавів на поверхні металовиробів, алітування труб.

Ключові слова: математичне моделювання; повітряно-крапельний потік; осадження вологи на обтічну поверхню; обмерзання криволінійних поверхонь; наростання криги; водно-повітряне охолодження; рейкові деталі; вістряки стрілочних переводів

DISTRIBUTION OF THE PARAMETERS OF THE AIR-DROPLET MIXTURE ALONG THE CURVED SURFACE TAKING INTO ACCOUNT THE PHASE TRANSITIONS

ALEKSEYENKO S.V.^{1*}, *Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*,
YUSHKEVICH O.P.², *Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*

^{1*} Department of Mechatronics, Oles Honchar Dnipro national university, Dnipro, Gagarin ave., 72, 49000, Ukraine, tel. 050-480-85-03, e-mail: alexeyenko_sv@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-0320-989X

² Department of Mechatronics, Oles Honchar Dnipro national university, Dnipro, Gagarin ave., 72, 49000, Ukraine, tel. +38(066)-775-37-58, e-mail: ReiITO@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-7199-8424

Abstract. Formulation of the problem. The problem of finding of air-droplet flow parameters along the curved surfaces is considered. The methodology and software has been developed, which allows to model the multiphase flows. A model of interpenetrating media based on solving the Navier – Stokes equations and taking into account the interaction of the carrier gas and liquid drops was used to describe the external air-droplet flow, as well as the processes of moisture sedimentation on the streamlined surface. Numerical simulation of the fluid distribution process, taking into account phase transitions, along the streamlined surface was performed using the method of surface control volumes, based on the equations of continuity, conservation of momentum and energy. **The method** of determining convective heat transfer based on solving the Navier – Stokes equations and the Spalart – Allmaras turbulence model with correction for a rough wall was used and compared with the known results obtained in the two-dimensional approximation using integral relations. **The results** of studies are presented on the example of the problem of aerodynamic surfaces icing in a stream containing supercooled water droplets. The distributions of the flow parameters along the streamlined surface, as well as the basic quantities included in the equations of mass and heat balances are given. **Conclusions.** The developed method gives a good qualitative and quantitative agreement of the results with the known, obtained using semi-empirical one-dimensional relationships, and, at the same time, can be used to solve problems in a three-dimensional formulation. The results of the work can be used to solve a wide range of applied tasks, for example, when modeling water-air cooling processes of thin switch tongues that undergo hardening heat treatment using high-frequency heating, hardening heat treatment, spraying melts on metal surfaces, the process of pipe aluminizing.

Keywords: mathematical modeling; air-droplet flow; moisture sedimentation on a streamlined surface; icing of curved surfaces; ice buildup; water-air cooling; rail parts; switch tongue

Введение

Проблема исследования многофазных течений, осаднения жидкости из воздушно-капельного потока на обтекаемую поверхность, в том числе с учетом фазовых переходов, является одной из ключевых при решении широкого круга прикладных задач. Например, при изучении процессов обледенения летательных аппаратов, лопастей ветроагрегатов, линий электропередач в неблагоприятных метеорологических условиях, процессов водо-воздушного охлаждения поверхностей сложной конфигурации при термической обработке, процессов напыления расплавов на поверхности металлоизделий и многих других задач.

Происходящие в двухфазном потоке и на обтекаемой поверхности физические процессы могут оказывать существенное влияние на структуру

течения, аэродинамические характеристики обтекаемого тела, свойства воздушно-капельной среды.

Изучение этих процессов представляет собой многопрофильную задачу, охватывающую различные направления, такие как метеорология, аэродинамика, тепломассообмен, физика фазовых переходов, материаловедение.

Постановка задачи

При рассмотрении задач такого типа одними из наиболее эффективных инструментов исследования в настоящее время становятся методы численного моделирования. В работе представлены результаты исследований на примере обледенения аэродинамических поверхностей летательных аппаратов при полете в неблагоприятных

метеорологических условиях. Разработанная методика и программно-методическое обеспечение позволяют получать данные о распределении параметров воздушно-капельного потока вдоль обтекаемой криволинейной поверхности, и, соответственно, определять, в каких местах и какой формы на различных этапах в течение заданного временного интервала будут образовываться ледяные наросты. При этом наросты определяют картину распределения влаги в воздушно-капельном потоке вдоль поверхности сложной конфигурации.

Ледяные наросты на криволинейных поверхностях, в зависимости от параметров набегающего воздушно-капельного потока, могут образовываться в виде рыхлого, стекловидного либо смешанного льда [1–3]. Это определяется количеством выделяющейся скрытой теплоты фазового перехода, которая может поглощаться окружающим воздухом, каплями жидкости, выпавшими на поверхность, и обтекаемым твёрдым телом либо уже существующим льдом.

Рыхлый лед, как правило, формирует гладкие наросты хорошо обтекаемой формы, оказывающие не столь значительное негативное влияние на аэродинамические характеристики. Конфигурации его наростов не позволяют выявить направления преобладающих тепловых потоков.

Стекловидному льду обычно присуща рогаобразная форма наростов с возможным образованием «перьевых» образований за выступами ниже по потоку. При этом форма рога может быть охарактеризована его высотой, углом, который он образует с линией хорды, и местоположением вдоль поверхности профиля. Рогообразные наросты могут формироваться как на верхней, так и на нижней части профиля, значительно изменяя структуру течения, вплоть до критически негативного влияния на аэродинамику летательного аппарата [1–3].

Нарастание стекловидного льда вдоль обтекаемой поверхности происходит с различной интенсивностью, что является результатом влияния многих факторов, изменяющихся в процессе разрастания наростов, однако на начальной стадии процесса – распределение интенсивности льдообразования и, соответственно, форма образующейся наледи может являться косвенным индикатором интенсивности процесса теплоотвода и может характеризоваться расположением областей, в которых кристаллизуется максимальное количество воды.

Целью настоящей работы является анализ, с помощью разработанного программно-методического обеспечения, основных физических процессов, происходящих при выпадении переохлажденной жидкости из внешнего воздушно-капельного потока на обтекаемое тело, нахождение распределения параметров потока вдоль обтекаемой поверхности и определение формы образующейся наледи, имеющей шероховатую поверхность.

Анализ исследований и публикаций, в которых начато решение поставленной проблемы

На основании данных, полученных в результате проведения экспериментов [4; 5], полагаем, что механизм перемещения жидкости вдоль обтекаемой поверхности следующий: при достаточно высокой температуре и влажности вода может принимать форму несплошной пленки, обтекающей «бугорки» шероховатостей, и перемещаться под действием аэродинамической силы, а при более низкой температуре и влажности, а также в области торможения и вдали от неё вода перемещается посредством разбрызгивания с последующим «подхватыванием» отскочивших капелек внешним потоком и их «вторичным» выпадением, а также «перепрыгиванием» через налипшие капли – в результате столкновения переохлажденных капель с шероховатой поверхностью. При этом точное определение распределения коэффициента конвективного теплообмена в воздушно-капельном потоке вдоль обтекаемой шероховатой поверхности показывает, с одной стороны, доминирующее их влияние на тепло- и массообмен в процессе обледенения твердого тела и, по сути, определяет форму образующихся ледяных наростов, а, с другой стороны, играет ключевую роль в определении локальных тепловых потоков, которые отводятся от каждого элемента поверхности [6].

Применение методов вычислительной гидродинамики при решении поставленной задачи

При расчете внешнего воздушно-капельного потока, содержащего переохлажденные капли воды, использованы осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье – Стокса, которые можно представить в векторно-интегральной форме как:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{1}{S} \oint_L [F_n(q) - F_{vn}(q)] dl = H, \quad (1)$$

где q , $F_n(q)$, $F_{vn}(q)$ – векторы независимых переменных, невязких и вязких потоков, H – вектор, описывающий межфазное взаимодействие.

При моделировании турбулентности применена однопараметрическая дифференциальная модель Spalart – Allmaras [7] с коррекцией для шероховатой стенки [8; 9].

Дискретизация осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса выполнена с помощью неявного конечнообъемного метода. Для вычисления конвективных слагаемых использована схема Roe [10]. Вязкие слагаемые аппроксимируются по трехточечному шаблону со вторым порядком точности. Блочная матричная система алгебраических уравнений решается итерационным алгоритмом Гаусса – Зейделя.

Моделирование нарастания льда, длящееся в среднем 2...10 минут, выполняется итерациями с приращениями по времени в условиях, определяемых параметрами атмосферы. Математическая модель, описывающая движение переохлажденных капель, позволяет вычислить поток влаги, выпадающей на обтекаемую поверхность. Затем на каждом шаге по времени на основе термодинамической модели нарастания льда определяется форма существования влаги, рассчитывается толщина слоя накопленного льда и шероховатость поверхности. При этом процесс моделирования нарастания льда осуществляется на макро- и микроуровнях.

Для описания термодинамических процессов фазовых превращений воды, выпавшей в виде переохлажденных капель на обтекаемую поверхность, использован метод поверхностных

контрольных объемов [1–3; 11; 12]. Уравнения баланса массы и энергии для контрольного объема можно получить на основе законов сохранения массы, энергии и количества движения (рис. 1).

Внешние тепловые и массовые потоки, входящие в уравнения баланса массы и энергии, определяются непосредственно из решения системы уравнений, описывающих воздушно-капельный поток. При этом были сделаны следующие основные допущения: физические превращения в поверхностном контрольном объеме в пределах шага по времени происходят мгновенно, процессы гидродинамики в пределах временного шага считаются квазистационарными, замерзание жидкости на поверхности происходит со стороны обтекаемого тела.

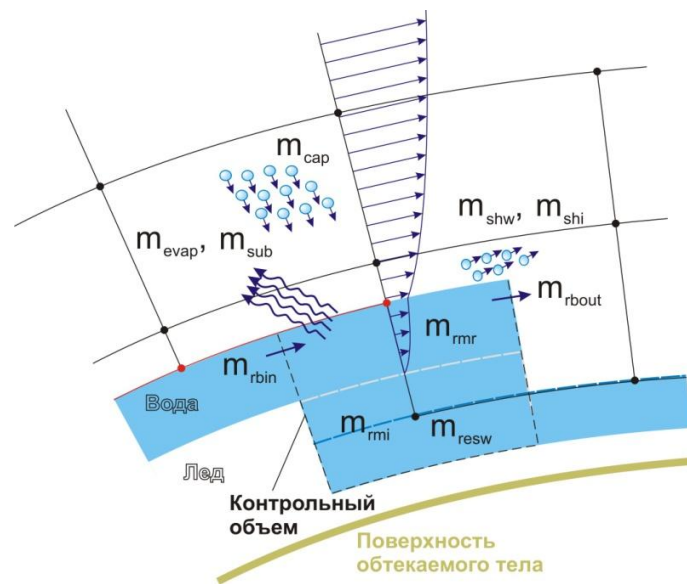


Рис. 1. Схема потоков массы в рассматриваемом контрольном объеме /
Fig. 1. Mass flow pattern in the control volume in question

На основе массового и теплового балансов вычисляется замерзшая доля f воды, проходящей через контрольный объем за время Δt_{acc} .

Построение уравнения баланса массы.

Рассмотрим контрольный объем (рис. 1), расположенный на поверхности обтекаемого тела. Масса входящей в контрольный объем воды за рассматриваемый промежуток времени состоит из суммы трех масс воды в жидком состоянии: массы влетающей воды из внешнего потока в виде переохлажденных капелек m_{cap} , массы втекающей воды из предыдущего контрольного объема m_{rbin} и массы оставшейся жидкой воды из предыдущего шага по времени m_{resw} :

$$m_{in} = m_{cap} + m_{rbin} + m_{resw} \quad (2)$$

Масса влетающей из внешнего потока воды – часть переохлажденных капелек, находящихся во внешнем потоке воздуха, которые ударяются о

поверхность. В случае применения двухфазной модели:

$$m_{cap} = \rho_j \cdot U_{jn} \cdot \Delta b \cdot \Delta s \cdot \Delta t_{acc} \quad (3)$$

где ρ_j – концентрация частиц у поверхности тела, U_{jn} – нормальная к обтекаемой поверхности составляющая скорости второй фазы, Δb , Δs – ширина и длина контрольного объема, Δt_{acc} – шаг по времени нарастания льда.

Масса втекающей воды m_{rbin} – часть массы жидкости m_{rbout} из предыдущего контрольного объема, обозначенного индексом $i-1$, которую вовлекает в текущий контрольный объем, обозначенный индексом i , внешний поток:

$$m_{rbin(i)} = m_{rbout(i-1)} \quad (4)$$

Масса оставшейся воды равна массе остаточной жидкой воды m_{resw} , рассчитываемой в

контрольном объеме на предыдущем шаге по времени:

$$m_{resw}^t = m_{rmw}^{t-\Delta t} \quad (5)$$

С другой стороны, масса воды m_{in} , входящей в контрольный объем, расходуется на массу выбывающей воды m_{out} , массу остаточной воды m_{rmw} и массу остаточного льда m_{rmi} :

$$m_{in} = m_{out} + m_{rmw} + m_{rmi} \quad (6)$$

Масса выбывающей воды – масса воды в твердой фазе, в виде жидкости или пара, которая покидает контрольный объем. Она состоит из пяти составляющих: массы сублимированного льда m_{sub} , массы испаренной воды m_{evap} , массы вытекающей жидкой воды m_{rbout} , массы вырванной потоком жидкой воды m_{shw} и массы вырванного потоком льда m_{shi} :

$$m_{out} = m_{sub} + m_{evap} + m_{rbout} + m_{shw} + m_{shi} \quad (7)$$

Масса сублимированного льда и масса испаренной воды – части ледяной массы и массы жидкой воды, которые испаряются в воздух под воздействием перепада температур в пограничном слое. Масса вытекающей жидкой воды – часть массы жидкой воды, находящейся в контрольном объеме, которая переходит в следующий контрольный объем. Масса вырванной жидкой воды – часть массы жидкой воды, находящейся внутри контрольного объема, которая выбрасывается в воздух под действием касательных напряжений, вызванных набегающим потоком. Ее можно определить по числу Вебера, используя эмпирическое соотношение [1]. При наличии срыва потока, что определяется из расчета внешнего сжимаемого вязкого потока с применением модели турбулентности Spalart – Allmaras, будем считать, что вся незамерзшая вода, вытекающая из предыдущего контрольного объема, разбрызгивается и уносится внешним потоком.

Масса вырванного льда – часть ледяной массы, находящейся в контрольном объеме, которая выброшена в воздух вследствие отрыва кристаллов льда под действием аэродинамической силы.

Уравнение теплового баланса. Применяя принцип сохранения энергии для контрольного объема, получаем уравнение теплового баланса:

$$\begin{aligned} Q_f + Q_{ss} + Q_{sub} + Q_{evap} + Q_{adh} + \\ Q_{kin} + Q_{cd} + Q_{cv} + Q_{rad} = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

где Q_f – скрытая теплота затвердевания, Q_{sub} – скрытая теплота сублимации, Q_{evap} – скрытая теплота

испарения, Q_{ss} – внутренняя теплота, Q_{cv} – теплообмен конвекцией, Q_{cd} – теплообмен проводимостью, Q_{rad} – теплообмен излучением, Q_{adh} – теплота аэродинамического нагрева, Q_{kin} – теплота кинетического нагрева.

Расчет конвективного теплообмена. В рамках разработанной методики осредненная местная температура обледеневающей аэродинамической поверхности определяется из решения массового и теплового балансов для данного контрольного объема. Так, в области, характеризующейся влажным режимом обледенения (на обтекаемой поверхности будет присутствовать незамерзшая вода) осредненная температура рассматриваемого элемента поверхности будет близка к температуре фазового перехода. В области сухого режима обледенения (на обтекаемой поверхности присутствует только лед) осредненная температура элемента поверхности будет ниже температуры фазового перехода, но выше температуры набегающего потока (за счет выделения в рассматриваемом контрольном объеме высвобождающейся теплоты фазового перехода), либо, если влага на этот участок обтекаемой поверхности, покрытый льдом, больше не выпадает – ниже температуры набегающего потока (за счет испарения льда).

Принимая гипотезу сплошности среды будем считать справедливыми условия «прилипания» на стенке. То есть будем полагать, что непосредственно у самой поверхности обтекаемого тела имеется тонкий слой неподвижного газа, и в пограничном слое можно выделить вязкий динамический подслой, а также тепловой подслой, характеризующийся ламинарным течением и преобладанием переноса теплоты теплопроводностью над турбулентным переносом. Таким образом, будем считать, что при описании изменения температуры вдоль нормали к стенке в границах толщины теплового подслоя справедлива линейная зависимость [14]. Тогда, решая задачу об обледенении аэродинамической поверхности, конвективный тепловой поток можно определить по известному температурному полю вблизи поверхности при ее заданной температуре.

Температура стенки и тепловой поток в процессе расчета определяется из условия равенства на границе раздела обтекаемая поверхность – набегающий поток температур и тепловых потоков (граничные условия четвертого рода):

$$t_w = t_a, \quad (9)$$

$$-\lambda_w \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_w = -\lambda_a \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_a, \quad (10)$$

где индекс w обозначает стенку, a – набегающий поток, n – нормаль к границе раздела.

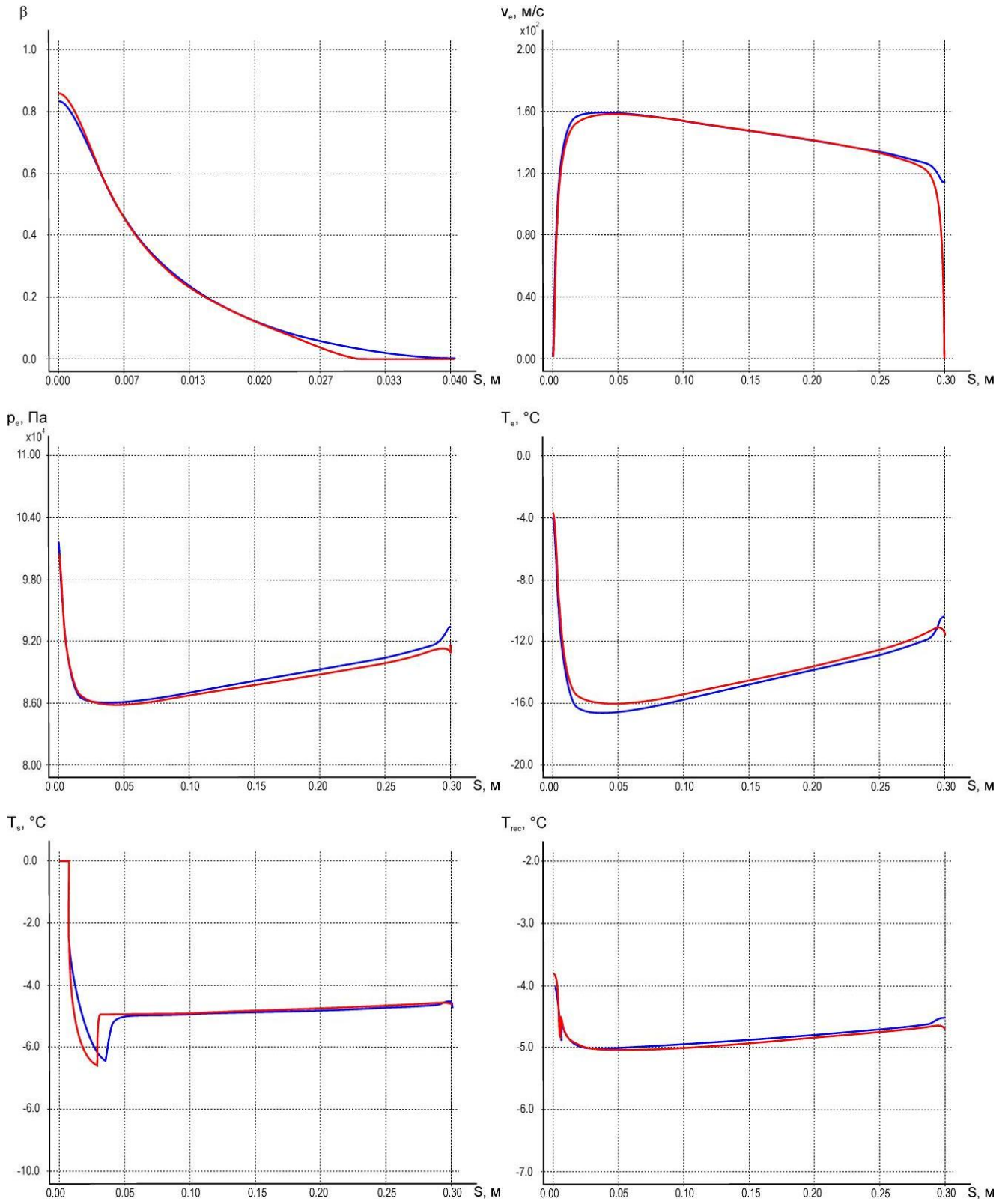


Рис. 2. Параметры воздушно-капельного потока, соответствующие начальной стадии процесса обледенения:
 — с использованием интегральных соотношений, — с помощью разработанной методики /
 Fig. 2. Parameters of the airborne flow corresponding to the initial stage of the icing process:
 — using integral ratios — using the developed technique

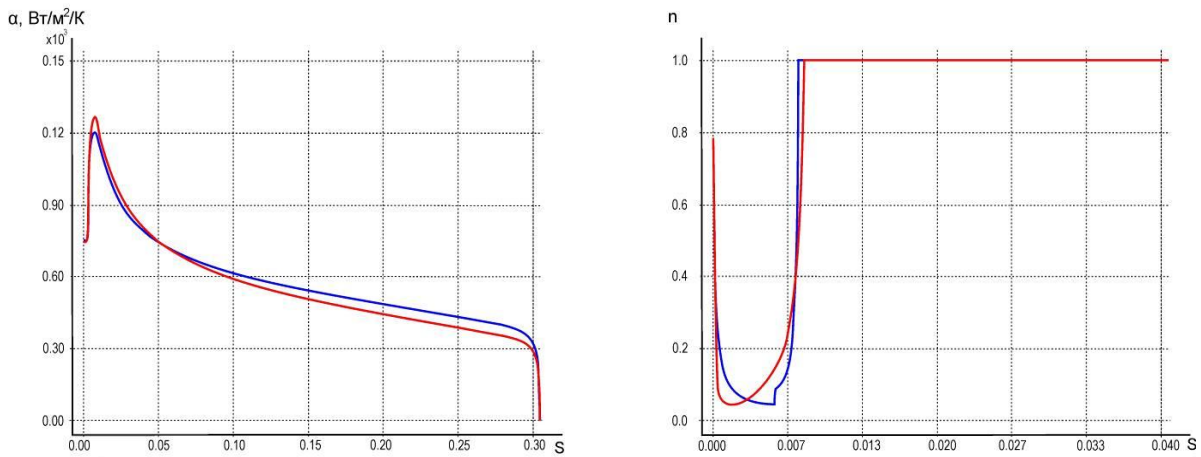


Рис. 3. Распределение коэффициента конвективного теплообмена и замерзшей доли вдоль поверхности обледенения:
 — с использованием интегральных соотношений, — с помощью разработанной методики /
 Fig. 3. The distribution of the convective heat transfer coefficient and the frozen share along the icing surface:
 — using integral relations; — using the developed methodology

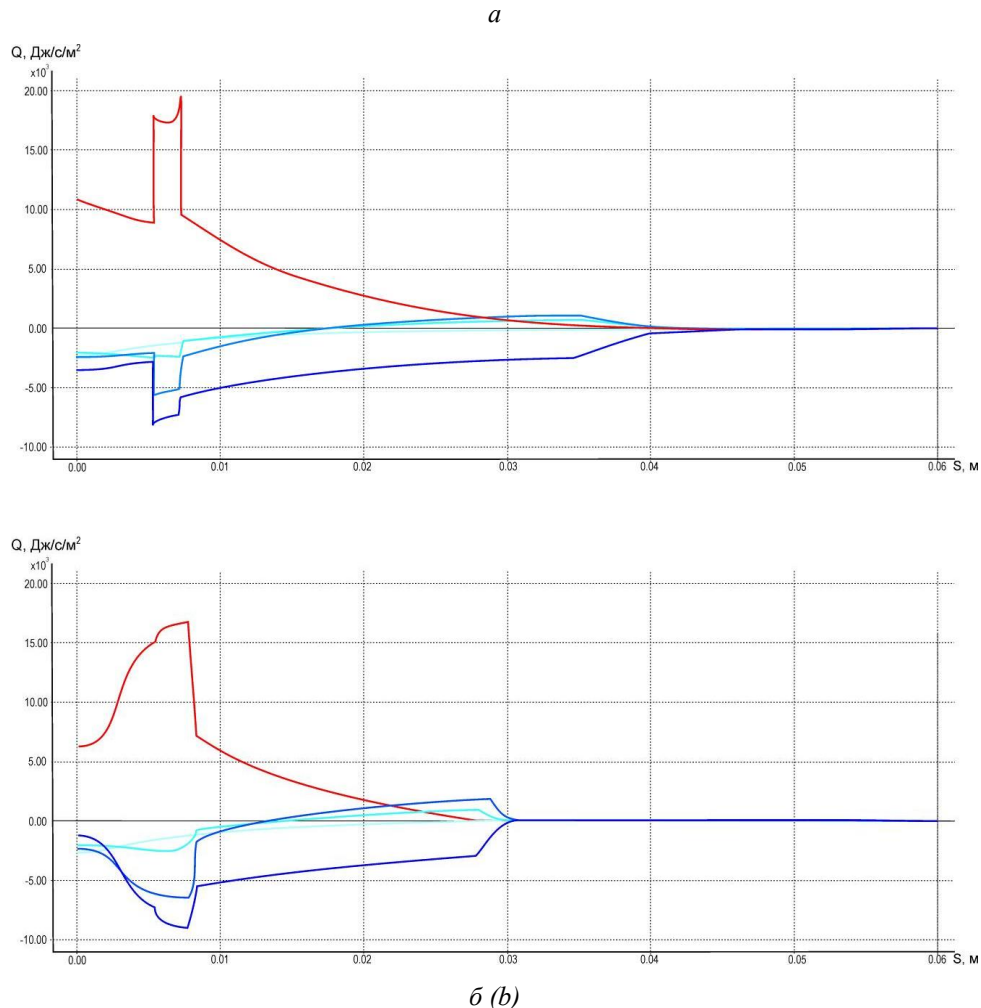


Рис. 4. Составляющие теплового баланса: а) – с использованием интегральных соотношений, б) – с помощью разработанной методики
 — скрытая теплота испарения, — конвективный теплообмен за вычетом теплоты кинетического нагрева и теплоты аэродинамического нагрева, — теплообмен посредством теплопроводности, — внутренняя теплота, — скрытая теплота затвердевания /
 Fig. 4. The components of heat balance: а – using integral ratios, б – using the developed technique
 — latent heat of evaporation, — convective heat exchange minus heat of kinetic heating and heat of aerodynamic heating, — heat exchange by means of heat conduction, — internal heat, — latent heat of solidification

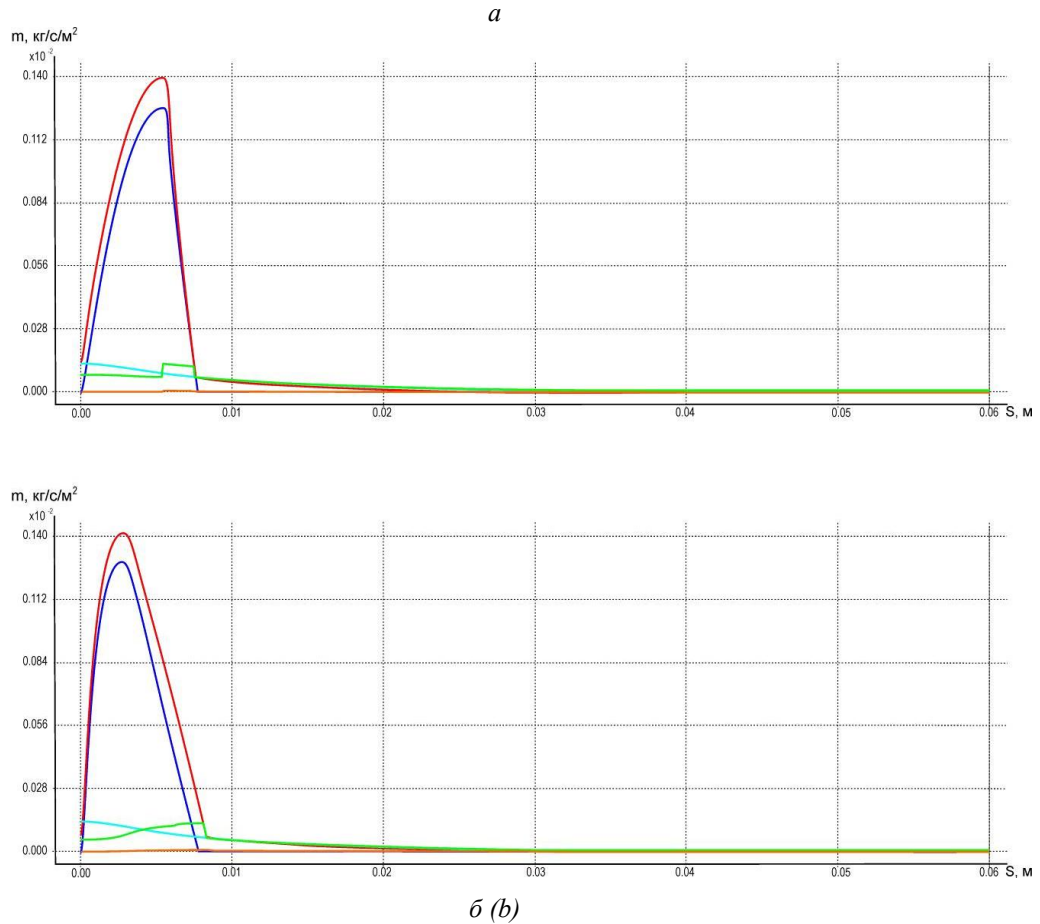


Рис. 5. Составляющие массового баланса:

а) с использованием интегральных соотношений, б) с помощью разработанной методики
 — массовый расход влетающей из внешнего потока переохлажденной воды, — массовый расход жидкости, входящий из предыдущего КО, за вычетом испаряющейся воды, — массовый расход жидкости, вытекающей в следующий КО, — массовый расход замерзающей воды,
 — массовый расход испаряющейся воды / Fig. 5. Components of mass balance:
 a) with the use of integral relations, b) using the developed methodology
 — mass flow rate of supercooled water entering from an external flow, — mass flow rate of a fluid entering from a previous TO, minus evaporating water, — flow rate of a fluid flowing into the next TO, — mass flow of a freezing water, — mass flow of evaporating water

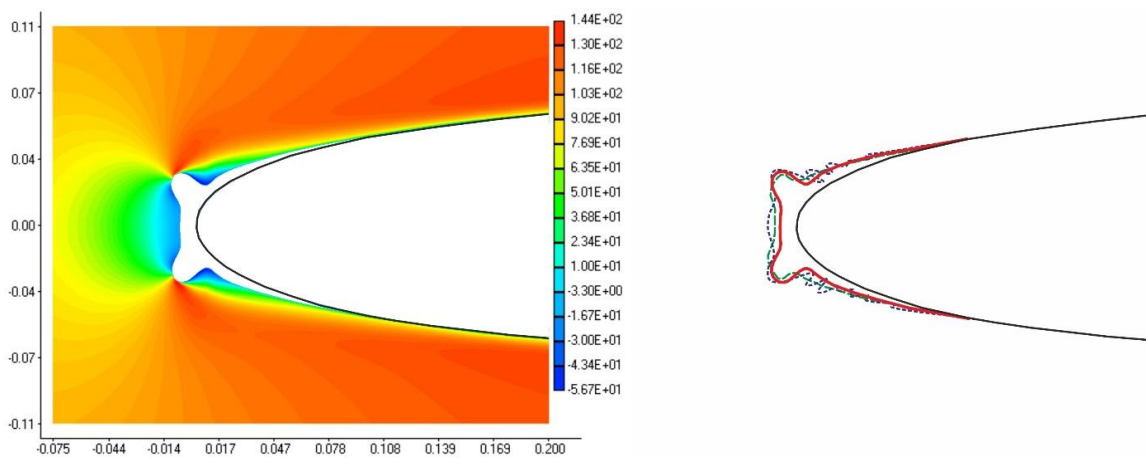


Рис. 6. Форма нароста, распределение скорости воздушного потока вблизи профиля NACA 0012 ($\alpha = 0^\circ$):

— расчет настоящей работы, - - - - - расчет по LEWICE 1.6 [1],
 — — — — — экспериментальные данные [1] /

Fig. 6. Build shape, air velocity distribution near the NACA 0012 profile ($\alpha = 0^\circ$):

— calculation of this work, - - - - - calculation according to LEWICE 1.6 [1], — — — — — experimental data [1]

Изложение основного материала исследований и обсуждение полученных результатов

Расчёты были выполнены для случая обтекания воздушно-капельным потоком профиля NASA 0012 с длиной хорды $L = 0,3$ м под нулевым углом атаки. Параметры набегающего потока были приняты следующими: скорость $V_\infty = 129,46$ м/с, температура $T_\infty = -12,6$ °С, давление $p_\infty = 9,075 \cdot 10^4$ Па. С помощью разработанной методики были выполнены расчеты для «шероховатой» поверхности, имеющей среднее значение высоты эквивалентной «песочной» шероховатости $k_s = 0,00020$ м.

Проведено сравнение результатов с известными данными расчётов, полученных с помощью интегральных соотношений при использовании траекторной модели, описывающей движение переохлажденных капель и уравнений потенциала при описании воздушного потока [1].

На рисунке 2 представлено распределение коэффициента выпадения капель β вдоль поверхности профиля. Поскольку в рассмотренном расчетном случае размер капель в набегающем потоке был принят постоянным и равным среднему объемному диаметру, область выпадения капель сократилась на 25 % по сравнению с результатами, полученными с помощью траекторной модели и с использованием закона распределения Langmuir. При этом наблюдается полное совпадение результатов в остальной части профиля, за исключением области торможения, где наблюдается превышение β на ~3 % по сравнению с траекторной моделью.

Значения скорости v_e , давления p_e и температуры T_e на границе пограничного слоя, а также температуры восстановления T_{rec} (рис. 2) практически полностью совпадают (с максимальным расхождением данных не более 3 %), за исключением задней кромки профиля, где вязкие эффекты оказывают значительное влияние на картину течения. Отличия в распределениях температуры T_s вдоль обтекаемой поверхности обусловлены уменьшением области выпадения капель.

На рисунке 3 приведены распределения коэффициента конвективного теплообмена α и замерзшей доли n вдоль поверхности обледенения. Видно, что разработанная методика дает более плавное изменение тепловых потоков на участке от точки торможения до области перехода ламинарного потока в турбулентный режим и существенно меньшие значения конвективного теплового потока и скрытой теплоты фазового перехода (на 40...50 %) в области точки торможения. В результате масса образующегося льда в области ламинарного

пограничного слоя оказывается меньше (рис. 5), по сравнению с величиной, рассчитанной по интегральной методике, однако форма образующегося ледяного нароста оказывается значительно ближе к экспериментальной (рис. 6).

На рисунках 4 и 5 приведены составляющие теплового и массового балансов, полученные с использованием интегральных соотношений и с помощью разработанной методики. Продемонстрировано, что основной вклад в тепловой баланс вносит нагрев за счет выделяющейся скрытой теплоты фазового перехода и охлаждение вследствие конвекции и испарения. Значительное увеличение массы замерзающей воды происходит при переходе пограничного слоя в турбулентный режим сопровождающимся значительным (в несколько раз) увеличением теплового потока за счет конвекции и испарения. В результате в области ламинарно-турбулентного перехода начинают формироваться наросты, с течением времени переходящие в крупные «рогообразные».

На рисунке 6 приведены распределение скорости воздушного потока вблизи обтекаемого профиля, а также формы наростов, полученные с помощью разработанной методики, методики LEWICE 1.6 [1], и экспериментальная форма [1].

Выводы

1. Разработано программно-методическое обеспечение, позволяющее моделировать процессы обтекания тел многофазными потоками.

1. Предложенная методика определения конвективного теплообмена на основе решения уравнений Навье – Стокса и модели турбулентности Spalart – Allmaras с коррекцией для шероховатой стенки дает хорошее качественное и количественное согласование результатов с известными, полученными с помощью полумпирических одномерных соотношений, и, при этом, может быть использована при решении задач в трехмерной постановке.

3. Результаты работы могут быть использованы для решения широкого круга прикладных задач, например, при моделировании процессов водовоздушного охлаждения тонких остроговых рельсов, которые подвергаются упрочняющей термической обработке, с использованием нагрева ТВЧ, упрочняющей термической обработки деталей машин, напыления расплавов на поверхности металлоизделий и алитирования труб.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Wright W. B. Users Manual for the Improved NASA Lewis Ice Accretion Code LEWICE 1.6 / W. B. Wright // National Aeronautical and Space Administration (NASA), Contractor Report. – May, 1995. – 95 p.
2. Fortin G. A new roughness computation method and geometric accretion model for airfoil icing / G. Fortin, A. Ilinca, V. Brandi // J. Aircraft. – 2004. – Vol. 41. – № 1. – Pp. 119–127.
3. Gent R. W. TRAJICE2, A Combined Water Droplet and Ice Accretion Prediction Program for Aerofoil / R. W. Gent // Royal Aerospace Establishment (RAE), Farnborough, Hampshire, Technical Report Number TR90054. – 1990. – 83 p.
4. Alekseyenko S. Interaction of Supercooled Large Droplets with Aerodynamic Profile / S. Alekseyenko, M. Sinapius, M. Schulz, O. Prykhodko // SAE Technical Paper 2015-01-2118, 2015. – 12 p. DOI:10.4271/2015-01-2118.

5. Alekseenko S. V. An Experimental Study of Freezing of a Supercooled Water Droplet on a Solid Surface / S. V. Alekseenko, C. Mendig, M. Schulz, M. Sinapius, A. A. Prikhod'ko // Technical Physics Letters. – 2016. – Vol. 42. – № 5. – Pp. 524–527. DOI:10.1134/S1063785016050187.
6. Fuzaro Rafael C. CFD and Boundary Layer Models with Laminar–Turbulent Transition around Airfoils and a Rough Cylinder: Results Validation / Rafael C. Fuzaro, Pio D. Mendes, G. A. Lima da Silva // SAE Technical Paper. – 2015-01-2163. – 2015. – 14 p. DOI:10.4271/2015-01-2163.
7. Spalart P. R. A one-equation turbulence model for aerodynamic flow / P. R. Spalart, S. R. Allmaras // AIAA Paper. – № 92. – 0439. – 1992. – 22 p.
8. Aupoix B. Extensions of the Spalart-Allmaras Turbulence Model to Account for Wall Roughness / B. Aupoix, P. R. Spalart // International Journal of Heat and Fluid Flow. – Vol. 24. – 2003. – Pp. 454–462.
9. Prykhodko A. A. Numerical investigation of the influence of surface roughness on convective heat transfer at airfoil icing process / A. A. Prykhodko, S. V. Alekseyenko // Industrial Heat Engineering. – Vol. 40(2). – 2018. – Pp. 65–71.
10. Roe P. L. // Annual review of fluid mechanics. – Vol. 18. – 1986. – Pp. 337–365.
11. Alekseyenko S. V. Numerical Simulation of Icing of a Cylinder and an Airfoil: Model Review and Computational Results / S. V. Alekseyenko, O. A. Prykhodko // TsAGI Science Journal. – Vol. 44(6). – 2013. – Pp. 761–805.
12. Alekseyenko S. V. Mathematical Modeling of Ice Body Formation on the Wing Airfoil Surface / S. V. Alekseyenko, O. A. Prykhodko // Fluid Dynamics. – Vol. 49(6). – 2014. – Pp. 715–732. DOI: [10.1134/S0015462814060039](https://doi.org/10.1134/S0015462814060039).

REFERENCES

1. Wright W.B. Users Manual for the Improved NASA Lewis Ice Accretion Code LEWICE 1.6. National Aeronautical and Space Administration (NASA), Contractor Report, 1995, 95 p.
2. Fortin G., Ilinca A. and Brandi V. A new roughness computation method and geometric accretion model for airfoil icing. J. Aircraft, 2004, vol. 41, no. 1, pp. 119–127.
3. Gent R.W. TRAJICE2, A Combined Water Droplet and Ice Accretion Prediction Program for Aerofoil. Royal Aerospace Establishment (RAE), Farnborough, Hampshire, Technical Report Number TR90054, 1990, 83 p.
4. Alekseyenko S., Sinapius M. and Schulz M. and Prykhodko O. Interaction of Supercooled Large Droplets with Aerodynamic Profile. SAE Technical Paper 2015-01-2118, 2015, 12 p. DOI:10.4271/2015-01-2118.
5. Alekseenko S.V., Mendig C., Schulz M., Sinapius M. and Prikhod'ko A.A. An Experimental Study of Freezing of a Supercooled Water Droplet on a Solid Surface. Technical Physics Letters, 2016, vol. 42, no. 5, pp. 524–527. DOI:10.1134/S1063785016050187.
6. Fuzaro Rafael C., Pio D. Mendes, Lima G.A. da Silva. CFD and Boundary Layer Models with Laminar-Turbulent Transition around Airfoils and a Rough Cylinder: Results Validation. SAE Technical Paper, 2015-01-2163, 2015, 14 p.
7. Spalart P.R. and Allmaras S.R. A one-equation turbulence model for aerodynamic flow. AIAA Paper, no. 92, 0439, 1992, 22 p.
8. Aupoix B. and Spalart P.R. Extensions of the Spalart-Allmaras Turbulence Model to Account for Wall Roughness. International Journal of Heat and Fluid Flow, vol. 24, 2003, pp. 454–462.
9. Prykhodko A.A. and Alekseyenko S.V. Numerical investigation of the influence of surface roughness on convective heat transfer at airfoil icing process. Industrial Heat Engineering, vol. 40(2), 2018, pp. 65–71. DOI:[10.31472/ihe.2.2018.09](https://doi.org/10.31472/ihe.2.2018.09)
10. Roe P.L. Annual review of fluid mechanics, vol. 18, 1986, pp. 337–365.
11. Alekseyenko S.V. and Prykhodko O.A. Numerical Simulation of Icing of a Cylinder and an Airfoil: Model Review and Computational Results. TsAGI Science Journal, vol 44(6), 2013, pp. 761–805.
12. Alekseyenko S.V. and Prykhodko O.A. Mathematical Modeling of Ice Body Formation on the Wing Airfoil Surface. Fluid Dynamics, vol. 49(6), 2014, pp. 715–732. DOI: [10.1134/S0015462814060039](https://doi.org/10.1134/S0015462814060039).

Статья рекомендована д-ром техн. наук, проф. Г. И. Сокол (Украина); д-ром техн. наук Н. Е. Калининой (Украина).

Поступила в редакцию 01.04.2018.

Принята в печать 07.04.2018.