

# Modeling of Collision the Drip Liquid Phase with the Surface Air Intake

M.A. Lybimova<sup>2</sup>, V.V. Kuzenov<sup>1,2</sup>, S.V. Ryzhkov<sup>2</sup>

1 –Institute for problem in mechanics RAS, Russia, Moscow, 119526

vik.kuzenov@gmail.com

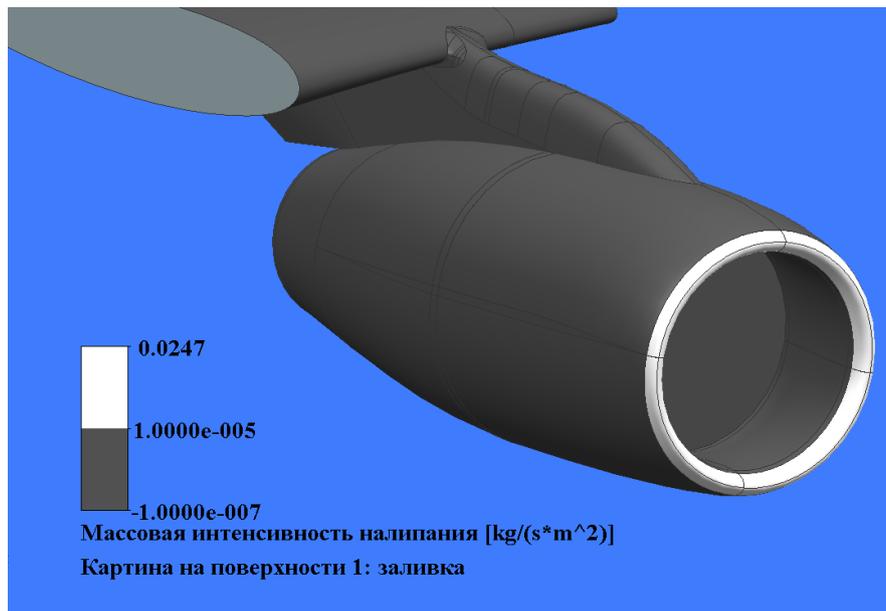
2 –Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia,

svryzhkov@gmail.com

## Abstract

Based on the developed mathematical model, obtained in the field of gas–dynamic parameters of the air intake, the calculations of the intensification of buildup of ice on the surface of the air intake, calculated the trajectory of the particles within the air intake. The calculations were performed for the standby mode (the height of 7000 m, flight time 45 minutes). The important results of the practice are: the mass of sticky ice mass trapping and intensity of adhesion of supercooled droplets.

It is hoped that the results of this study in the future to simulate the flight of aircraft in the clouds to other modes and optimized design process the different edges of the air intake heating system of the aircraft, subject to icing.



The distribution of the intensity of the mass of ice build-up on the edge of the air intake of the engine nacelle PS–90A.

Keywords: mathematical model, air intake, gas dynamics, the movement of supercooled droplets

УДК 629.73.075

# Моделирование процесса столкновения капельно–жидкой фазы с поверхностью воздухозаборника

М.А. Любимова<sup>2</sup>, В.В. Кузенов<sup>1,2</sup>, С.В. Рыжков<sup>2</sup>

*1 – Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, 119526, проспект Вернадского 101-1*

*vik.kuzenov@gmail.com*

*2 – МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, 105005, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1  
svryzhkov@bmstu.ru*

## Аннотация

На основе, разработанной математической модели, получены поля газодинамических параметров внутри воздухозаборника, выполнены расчеты интенсификации налипания льда на поверхность воздухозаборника, произведен расчет траектории движения частиц внутри воздухозаборника. Расчеты проведены для режима ожидания (высота 7000 м, время полета 45 минут). Важными для практики результатами работы являются: величина массы налипающего льда, массы улавливания и интенсивность налипания переохлажденных капель.

Ключевые слова: математическая модель, воздухозаборник, газодинамика, движение переохлажденных капель

## 1. Введение

Обеспечение безопасности эксплуатации авиационной техники, повышения регулярности воздушных сообщений и экономической эффективности воздушного транспорта требует учета метеорологической информации. Одним из наиболее важных физических параметров атмосферы Земли является влажность воздуха, которая обуславливает образование облачности, осадков, тумана.

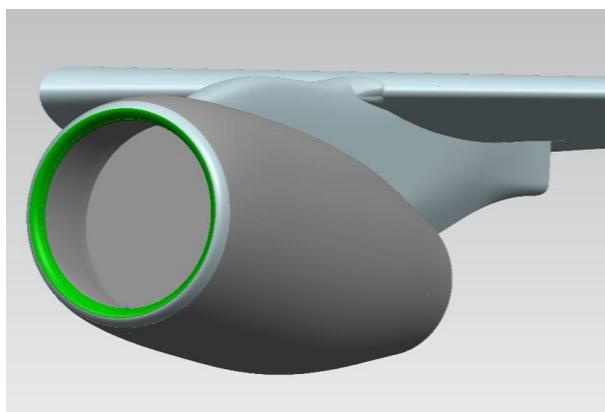


Рис. 1. Мотогондола турбовентиляторного двигателя ПС-90А и ее геометрическая модель.

а) Мотогондола двигателя ПС-90А. б) Геометрическая модель мотогондолы двигателя ПС-90А

При этом известно, что полет самолета в облаках (в слоистых или кучевых), состоящих из переохлажденных капель воды, может сопровождаться образованием льда [1] на поверхности мотогондолы двигателя (рис. 1). Это явление обусловлено расширением воздуха, который движется в канале воздухозаборника. Расширение воздуха сопровождается снижением его температуры, что приводит к конденсации и замерзанию капельно-жидкой фазы. При этом очевидно, что образовавшийся лед может понижать эффективность работы компрессора и турбины. Кроме того, в случае попадания кусков льда на вращающиеся лопадки турбины, возможно, её повреждение.

Поэтому одной из главных целей данной работы является исследование особенностей термоаэродинамического обтекания и математическое моделирование процесса конденсации двухфазной среды, состоящей из капельно-жидкой фазы и газа (воздуха), вблизи кромки воздухозаборника самолета семейства Ту-204/214.

Второй целью является выработка некоторых предварительных рекомендаций по защите мотогондол самолетов от обледенения.

## 2. Математическая модель процессов обтекания и столкновения капельно-жидкой фазы с поверхностью

Математическое моделирование обтекания, определение зоны и интенсивности улавливания переохлажденной капельно-жидкой фазы ( $m_{вл}$ ) проводилось с помощью программного комплекса FloEFD (производитель Mentor Graphics США). FloEFD позволяет рассчитывать движение текучих сред (газа или жидкости), решать задачи теплообмена с учетом процессов конвекции, излучения и теплопроводности (в том числе в твердых телах).

В пакете FloEFD движение (в том числе и турбулентные течения) и теплообмен текучей среды моделируется с помощью уравнений Навье–Стокса осредненных по Рейнольдсу. Кроме того, используются уравнения состояния компонентов сплошной среды, а также эмпирические зависимости вязкости и теплопроводности этих компонентов среды от температуры.

В декартовой системе координат ( $x_i, i = 1, 2, 3$ ) эта система уравнений (1) – (4) имеет следующий вид (нижние индексы означают суммирование по трем координатным направлениям) [5]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_i u_k - \tau_{ik}) + \frac{\partial P}{\partial x_i} = S_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} ((\rho E + P)u_k + q_k - \tau_{ik} u_i) = S_k u_k + Q_n \quad (3)$$

$$S_i = S_{comp} \quad (4)$$

где  $t$  – время;  $u_k, \rho, P$  – скорость, плотность, давление сплошной среды;  $E$  – полная энергия единичной массы сплошной среды;  $Q_n$  – теплота, выделяемая источником в единичном объеме сплошной среды;  $\tau_{ik}$  – тензор вязких сдвиговых напряжений;  $q_k$  – тепловой поток, основанный на законе Фурье;  $S_i$  – внешние массовые силы, действующие на единичную массу сплошной среды ( $S_{comp}$  – силы вязкого сопротивления).

Двухфазные течения сплошной среды с жидкими или твердыми частицами моделируются в FloEFD, как движение этих частиц в установившемся (рассматриваются только

стационарные двухфазные течения) потоке текучей среды, т.е. предполагается, что силовое и тепловое воздействие частиц на течение газовой фазы пренебрежимо мало.

При определении коэффициента сопротивления частиц предполагается, что они, как жидкие, так и твердые, имеют сферическую форму. Коэффициент сопротивления частиц рассчитывается по формуле Хендерсона [3] для неразряженных или разряженных газовых сред при до-, транс- и сверхзвуковых, ламинарных и турбулентных условий обтекания частиц. Температура частицы определяется по формуле теплообмена частицы с окружающей средой [3]. При этом, так как учитывается влияние температуры частицы на плотность материала, а масса частицы считается неизменной, то соответственно изменяется размер частицы. Взаимодействие частиц с поверхностями твердых тел моделируется, как полное прилипание частиц к поверхности.

Исходя из континуальной модели двухфазного течения, т.е. течения взаимопроникающих континуумов газовой фазы и частиц различных фракций (все частицы различаются на фракции по какому либо признаку, позволяющему однозначно задавать начальные условия движения частиц в сечении, от которого это движение рассчитывается, например, если в некоторой точке начального сечения могут находиться частицы различных размеров, то таким параметром является размер частиц), при попадании частиц на стенку определяется суммарная по всем поверхностям, на которые выпали частицы, интенсивность налипания частиц на эти поверхности по формуле:

$$R_{\sum accretion} = \sum_{i=1}^N M_{pi}$$

где  $N$  – число фракций частиц;  $M_{pi}$  – расход частиц  $i$ -й фракции, выпавших на эти поверхности [2].

### 3. Некоторые результаты расчета

С помощью системы автоматизированного проектирования SolidWorks [2] была построена геометрическая 3D модель поверхности мотогондолы двигателя ПС-90А самолета семейства Ту-204/214, которая представлена на рис. 1. Известно [1, 5], что кромка мотогондолы двигателя является основной зоной нарастания льда (на рис. 1 она выделена зеленым цветом). Именно по этой причине эта область считается в работе основной областью преобразования капельно-жидкой фазы в лед. При этом режим ожидания выбран из-за самых жестких метеорологических условий обледенения.

В табл. 1 представлены исходные данные для расчета структуры течения и траектории движения капельно-жидкой фазы у поверхности мотогондолы двигателя в режиме ожидания на высоте полета 7000 м. На рис. 2 изображена расчетная область, в которой выполняется численное моделирование процесса конденсации двухфазной среды вблизи кромки воздухозаборника самолета семейства Ту-204/214. Расчетная сетка, показанная на рис. 2, построена автоматическим программным пакетом FloEFD с использованием "ручной" адаптации её вблизи кромки воздухозаборника и траекторий движения частиц. После построения сетка имеет 1264898 ячеек. Серым квадратом показана поверхность, на которой задавались параметры капле, а именно водность и расход.

На рис. 3 приведено распределение скоростей, набегающего на мотогондолу двигателя ПС-90А воздушного потока.

Используя это поле скоростей, был выполнен расчет траекторий движения капле при обтекании профиля воздухозаборника воздушным потоком. На рис. 4 показаны отдельные результаты этих вычислений (траектории движения капле вблизи поверхности мотогондолы).

Таблица № 1

**Исходные данные для расчета интенсивности улавливания переохлажденных капель воды**

Параметр	Обозначение	Значение	Размерность
Высота полета	H	7000	м
Давление окружающей среды	$p_h$	41105	Па
Температура набегающего потока	$t_h$	258	К
Время ожидания	t	2700	с
Истинная скорость самолета	$V_{ист}$	180.6	м/с
Водность	W	0.33	г/м <sup>3</sup>
Площадь экрана	$S_{эк}$	8.4	м <sup>2</sup>
Погонный метр	$L_{пог}$	5.95	м
Площадь исследуемой области	$S_{пов}$	1.3	м <sup>2</sup>
Расход воздуха двигателя	$G_{дв}$	245	кг/с
Диаметр капель	D	20	мкм
Количество частиц	N	50000	—
Материал поверхности	—	12X18H10T	—
Число Маха	M	0.56	—

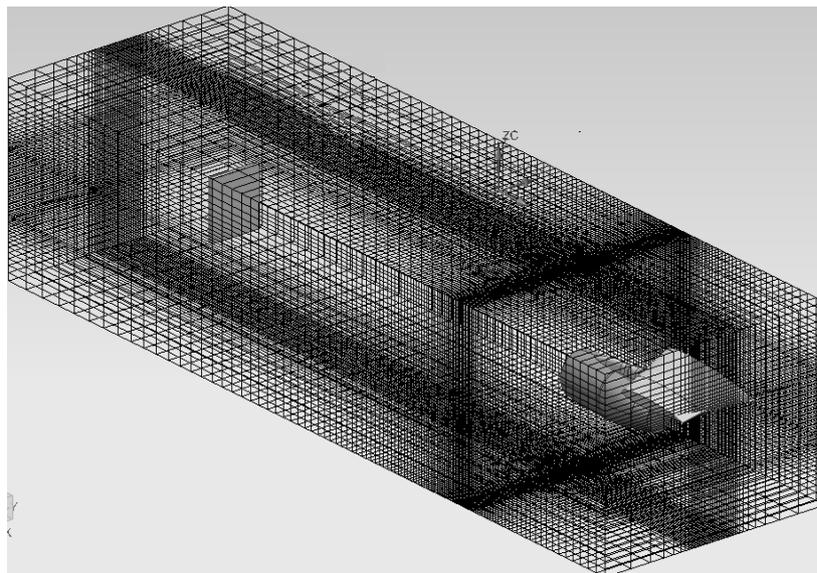


Рис. 2. Регулярная расчетная сетка, используемая при изучении структуры течения и траектории движения капельно-жидкой фазы у поверхности мотогондолы двигателя.

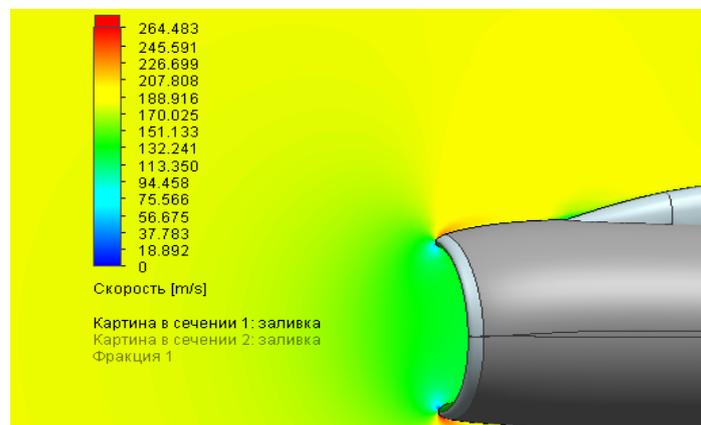


Рис. 3. Распределение скоростей вблизи поверхности мотогондолы двигателя.

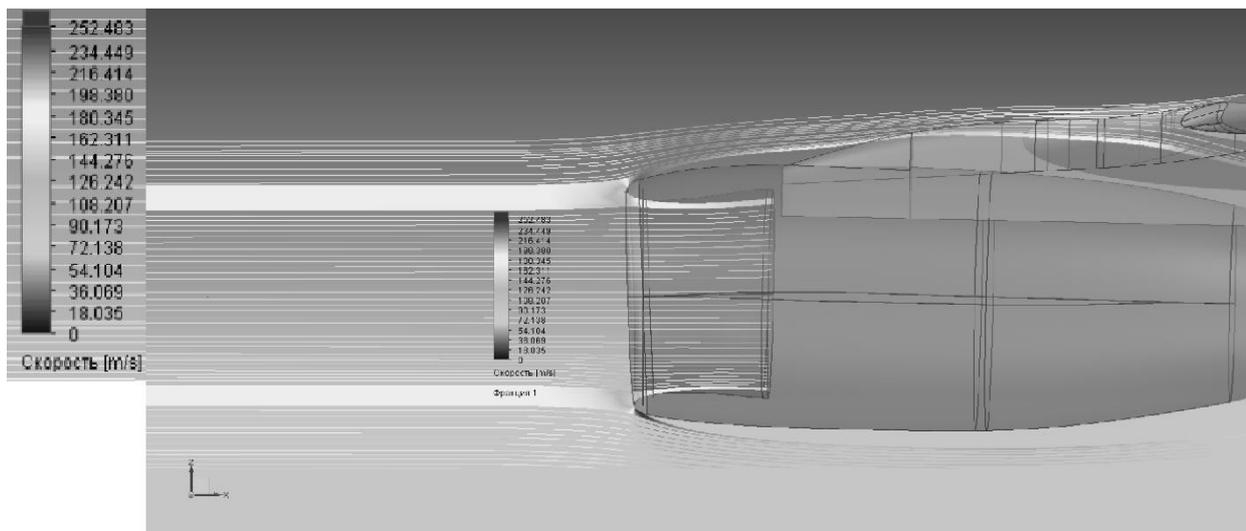


Рис. 4. Траектория движения капель при обтекании профиля воздухозаборника двухфазным потоком воздуха.

Для определения массы льда, налипающего на кромку воздухозаборника мотогондолы двигателя ПС–90А, на расстоянии 15 метров (вверх потоку) от кромки воздухозаборника был поставлен пронцаемый экран (на рис. 1 он показан в виде серого квадрата), на поверхности которого задаются граничные условия для капельно–жидкой фазы: массовый расход переохлажденных капель, средний диаметр капель, скорость.

Массовый расход капельно-жидкой фазы задается с помощью следующей формулы:

$$G_{м.в.} = S_{эк} \cdot w \cdot V_{ист} \cdot 10^{-3} \quad (5)$$

где  $S_{эк}$  – площадь экрана, из которого вылетают капели воды;  $w$  – водность среды;  $V_{ист}$  – истинная скорость самолета.

Дополнительные исходные данные для расчета движения жидких частиц следующие:

- количество рассчитываемых частиц (50000), расчетная область, диаметр частиц;
- их материал (в данном случае вода);
- массовый расход, относительная скорость частиц и их температура.

На рис. 5 приведено распределение массовой интенсивности налипания льда на кромку воздухозаборника мотогондолы двигателя ПС–90А. На этом рисунке хорошо видна геометрическая область (обозначена белым цветом), на которую налипают переохлажденные капели. Выполненные расчеты показали, что интенсивность налипания переохлажденных капель на этой поверхности составляет величину равную  $G_k = 21,8$  г/с.

Масса улавливаемых переохлажденных капель на интересующей нас поверхности определяется по формуле (6):

$$M_{ул} = \frac{G_k}{L_{ног}}, \quad (6)$$

Если не включать противообледенительную систему, то масса налипшего льда, за время ожидания (45 мин), определяется по следующей формуле [4]:

$$M_{л} = \frac{G_k \cdot t}{10^3}, \quad (7)$$

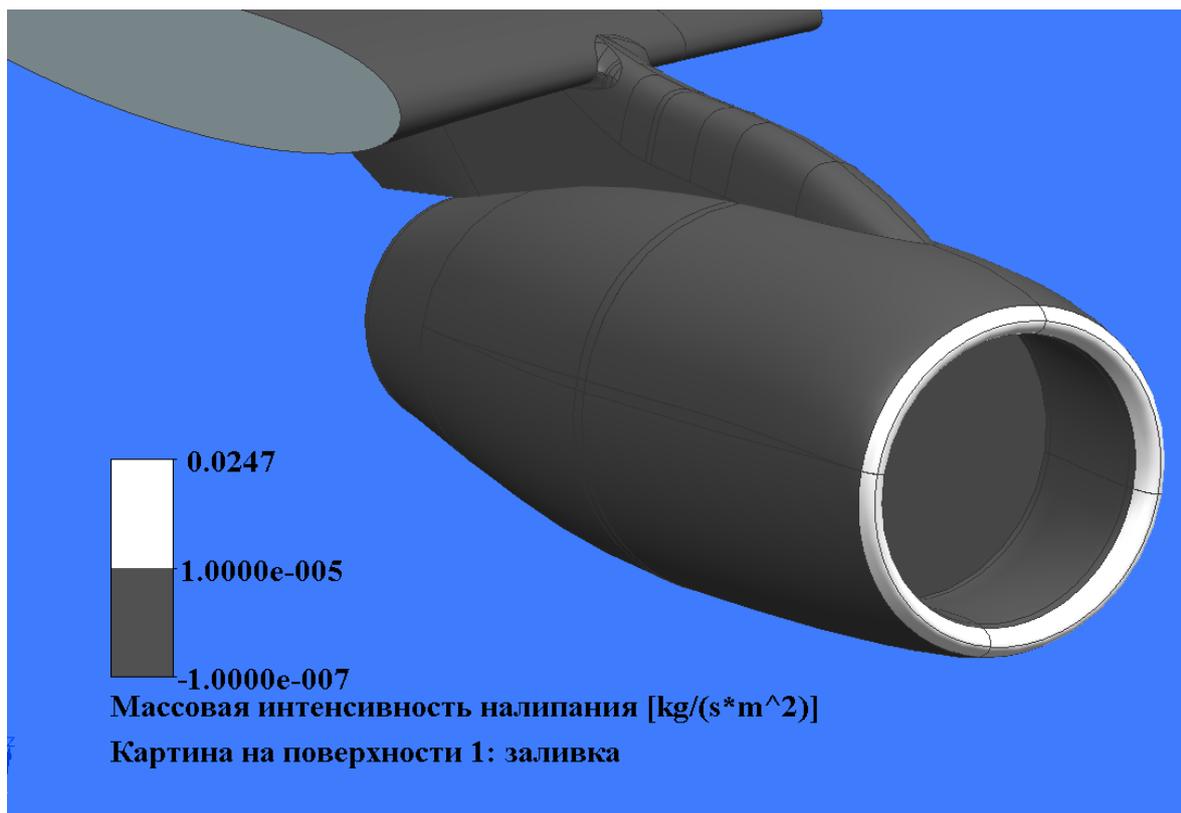


Рис. 5. Распределение массовой интенсивности налипания льда на кромку воздухозаборника мотогондолы двигателя ПС-90А.

Далее в таблице №2 представлены результаты, полученные по формулам (5) – (7).

Таблица № 2

**Результаты расчета интенсивности налипания  
переохлажденных капель воды**

Обозначение	Значение	Размерность
$G_{м.в.}$	0.5	кг/с
$G_k$	21.8	г/с
$M_{ул}$	3.66	г/м·с
$M_{л}$	58.86	кг

Отметим, что на самолете ТУ-214 в ходе летных испытаний проводилась экспериментальная проверка (с минутной задержкой включения при полете в условиях обледенения [5]) работы электрической противообледенительной системы (ПОС), которая осуществляет подогрев горячим воздухом – носка крыла, киля, стабилизатора, воздухопоглотителей (ПОС ВЗ). В ходе проведенных экспериментов установлено, что за одну минуту полета на поверхности канальной части воздухозаборника образовывается слой льда толщиной 4.1 мм, что соответствует массе льда 2.13 кг. После включения ПОС ВЗ лед на обогреваемой поверхности плавился и отделялся от поверхности мотогондолы, попадая в канал воздухозаборника. Однако в ходе испытаний [6–12] не выявлено недопустимых повреждений двигателя от попавшего в канал воздухозаборника льда. При этом все же очевидно, что за 45 минут полета на воздухозаборник налипают гораздо больше количество льда и такое количество льда представляет заметную опасность для лопаток компрессора и турбины двигателя.

## 4. Заключение

На основе, разработанной математической модели, получены поля газодинамических параметров внутри воздухозаборника, выполнены расчеты интенсификации налипания льда на поверхность воздухозаборника, произведен расчет траектории движения частиц внутри воздухозаборника. Расчеты проведены для режима ожидания (высота 7000 м, время полета 45 минут). Важными для практики результатами работы являются: величина массы налипающего льда, массы улавливания и интенсивность налипания переохлажденных капель.

Можно надеяться, что результаты данного исследования позволят в дальнейшем провести моделирование полетов летательных аппаратов в облаках на других режимах и оптимизировать процесс проектирования различных систем обогрева кромок воздухозаборника летательного аппарата, подверженных обледенению.

## Благодарности и ссылки на гранты

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (гос.задание № 13.79.2014/К) и в рамках программы фундаментальных исследований Президиума РАН.

## Литература

1. Тенишев Р.Х. Противо-обледенительные системы летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1967. 320 с.
2. Алямовский А.А. SolidWorks Компьютерное моделирование в инженерной практике. С–П.: БХВ–Петербург, 2005. 798 с.
3. Henderson C.B. Drag coefficient of spheres in continuum and rarefied flows. AIAA Journal. 1976. V. 14, N6. P. 707–708.
4. Трунов О.К. Обледенение самолетов и средства борьбы с ним. М.: Машиностроение, 1965. 248 с.
5. Быков Е.П. Сергеев Е.В. Филиппов В.А. Барьерный лед в канале воздухозаборника самолета Ту–214-ОН. ОАО «Туполев», 2008. 86 с.
6. Скиданов С.Н., Сергеев В.А., Филиппов В.А. Расчет эффективности противообледенительной системы воздухозаборников двигателей ПС–90А и ПС–90А2, ОАО «Туполев», Отчет, 2009. 75 с.
7. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Numerical modeling of magnetized plasma compressed by the laser beam: and plasma jets // Problems of Atomic Science and Technology. 2013. № 1 (83). Pp. 12–14.
8. Железнякова А.Л., Кузенов В.В., Петрусев АС., Суржииков СТ. Расчет аэротермодинамики двух типов моделей спускаемых космических аппаратов // Физико-химическая кинетика в газовой динамике 2010. Том 9. 6с. <http://chemphys.edu.ru/issues/2010-9/articles/144/>
9. Глушко ГС., Иванов Н.Э., Крюков ИА. Моделирование турбулентности в сверхзвуковых струйных течениях // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2010. Том 9. 8с. <http://chemphys.edu.ru/issues/2010-9/articles/142/>
10. Суржииков С.Т. Перспективы многоуровневого подхода к задачам компьютерной аэрофизики // Физико–химическая кинетика в газовой динамике. 2008. Том 7. 9с. <http://chemphys.edu.ru/issues/2008-7/articles/435/>
11. Днкалюк А.С., Суржииков С.Т. Сравнение прогонки четвертого и второго порядков точности на примере задачи, имеющей аналитическое решение // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2010. Том 9. 5с. <http://chemphys.edu.ru/issues/2010-9/articles/156/>
12. Котов М.А., Рулева Л.Б., Козлов П.В., Суржииков С.Т. Предварительные экспериментальные исследования обтекания моделей в гиперзвуковой ударной аэродинамической трубе // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2013. Т.14, вып. 2. 6с. <http://chemphys.edu.ru/issues/2013-14-2/articles/394/>

Статья поступила в журнал 17 ноября 2015 г.