

Научная статья

УДК 532.529:536.24

DOI: 10.18384/2949-5067-2024-3-20-32

ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ ОБТЕКАЕМОГО ТЕЛА НА ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С НИМ ПОТОКА ЧАСТИЦ

Зубова Н. В.¹, Кудров М. А.², Амелюшкин И. А.^{2}*

¹ *Московский государственный университет технологий и управления им. К. Г. Разумовского (Первый казачий университет), 109004, г. Москва, ул. Земляной вал, д. 73, Российская Федерация*

² *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), 141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9, Российская Федерация*

**Корреспондирующий автор, e-mail: Amelyushkin_Ivan@mail.ru*

Поступила в редакцию 20.05.2024

Принята к публикации 28.05.2024

Аннотация

Цель: создание алгоритмов, позволяющих рассчитывать и управлять дисперсным потоком с обтекаемым телом в приложении к задачам управления тепломассообменом и снижения сопротивления в условиях обильных осадков.

Процедуры и методы. Используются известные физические закономерности, методы интегрирования и анализ исследований других авторов.

Результаты. В настоящей работе развит метод расчёта параметров взаимодействия потока твёрдым телом, свойства покрытия которого влияют на процессы его обтекания. Проведены параметрические исследования, показаны оптимальные формы тел в двухфазных средах при больших значениях числа Стокса.

Теоретическая и практическая значимость. Результаты могут быть использованы при проектировании форм обтекаемых тел, движущихся в аэрозольных средах, в частности, при движении летательных аппаратов в облаках и осадках.

Ключевые слова: рельефное тело, молекулярное моделирование, потенциалы взаимодействия, атомы кристаллической решётки

Благодарности. Исследование выполнено при поддержке РФФИ в рамках проекта № 19–29–13024а.

Для цитирования:

Зубова Н. В., Кудров М. А., Амелюшкин И. А. Особенности влияния формы обтекаемого тела на взаимодействие с ним потока частиц // Вестник Государственного университета просвещения. Серия: Физика-математика. 2024. № 3. С. 20–32. <https://doi.org/10.18384/2949-5067-2024-3-20-32>

Original research article

FEATURES OF THE INFLUENCE OF THE SHAPE OF A STREAMLINED BODY ON THE INTERACTION OF A PARTICLE FLOW WITH IT

N. Zubova¹, M. Kudrov², I. Amelushkin^{2}*

¹ *K. G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management (the First Cossack University), Zemlyanoy val 73, Moscow 109004, Russian Federation*

² *Moscow Institute of Physics and Technology, Institutskiy pereulok 9, Dolgoprudny 141701, Moscow region, Russian Federation*

**Corresponding author, e-mail: Amelyushkin_Ivan@mail.ru*

*Received by the editorial office 20.05.2024
Accepted for publication 28.05.2024*

Abstract

Aim. Creation of algorithms for calculating and controlling a dispersed flow with a streamlined body in application to the problems of heat and mass transfer control and drag reduction in heavy precipitation conditions.

Methodology. Known physical laws, integration methods and analysis of studies by other authors are used.

Results. In this paper, a method for calculating the parameters of interaction of a flow with a solid body, the properties of the coating of which affect the processes of its flow, is developed. Parametric studies are carried out, optimal shapes of bodies in two-phase media at large values of the Stokes number are shown.

Research implications. The results can be used in designing the shapes of streamlined bodies moving in aerosol media, in particular when a flying vehicle move through clouds and media with precipitation.

Keywords: relief body, molecular modeling, interaction potentials, crystal lattice atoms

Acknowledgments. The study was carried out with the support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of project No. 19-29-13024a.

For citation:

Zubova, N. V., Kudrov, M. A. & Amelushkin, I. A. (2024). Features of the influence of the shape of a streamlined body on the interaction of a particle flow with it. In: *Bulletin of the Federal State University of Education. Series: Physics and Mathematics*, 3, pp. 20-32. <https://doi.org/10.18384/2949-5067-2024-3-20-32>

Введение

Моделирование управления взаимодействием потока с обтекаемой поверхностью представляет большой интерес в различных областях науки и техники: разработка противообледенительных покрытий, изменение тепломассообмена, транспорт веществ по каналам, ламинаризация и

турбулизация потока, управление пограничным слоем и ряд других приложений.

Развиваемый в настоящей работе подход позволяет учесть возможность прилипания молекул к поверхности обтекаемого тела для различных режимов взаимодействия, например, формирования пограничного слоя у рельефного тела, образования инея и конденсации.

Известно, что аэродинамическое качество летательного аппарата может измениться на 70% при полёте в сильный дождь [1]. Отметим, что хотя большинство самолётов летают над уровнем облаков, влияние осадков на полёты малых беспилотных летательных аппаратов может быть весьма существенным как из-за длительного времени пребывания в потоке осадков, так и с точки зрения более значительного влияния жидкости на ламинарно-турбулентный переход, нестационарные срывы плёнки и другие процессы, сопровождающие заметное влияние осадков на аэродинамические характеристики.

Управление тепломассообменом летательного аппарата в двухфазном потоке представляет большой научный и практический интерес. Обеспечение безопасности полётов, снижение энергозатрат противообледенительных систем, повышение полезной нагрузки летательных аппаратов за счёт снижения веса противообледенительных систем также представляются весьма интересными с научной и практической стороны в широкой области приложений. При расширении предназначений и областей применения летательных аппаратов и аэрогидросредной техники требуется обеспечение надёжности режимов полёта и функционирования необходимого для движения транспортного средства оборудования.

Управление тепломассообменом, силовым и эрозионным воздействием двухфазного потока представляет большой научный и практический интерес. Так, например, при незначительной концентрации пыли (несколько процентов) тепловой поток к поверхности сверхзвукового летательного аппарата увеличивается в несколько раз [2] по сравнению со случаем незапылённого газа, а увеличение концентрации пыли с 1 до 3% может привести к появлению дисперсного экрана – области с повышенной концентрацией дисперсной фазы [3]. Применение гидрофобных покрытий в определённом диапазоне параметров потока позволяет полностью устранить образование льда [4], а их использование в сочетании с тепловой противообледенительной системой позволяет снизить её энергозатраты и вес и при этом предотвратить образование на крыле барьерного льда [4; 5]. Создание на поверхности обтекаемого жидкостью тела слоя воздушной или иной смазки за счёт удержания газа в порах нанорельефного тела позволяет значительно снизить сопротивление трения [6, с. 84–86] и в ряде задач интенсифицировать перемешивание жидкостей при малых значениях числа Рейнольдса [7]. Управление неустойчивыми гидродинамическими явлениями при сворачивании жидкой плёнки в ручейки и распаде ручейков в отдельные капли [8] представляет интерес в задачах теплообмена, предотвращения

образования барьерного льда и в некоторых методах визуализации ламинарно-турбулентного перехода на крыле самолёта. Кроме того, учитывая значительный вклад силового воздействия льдин в сопротивление движущихся за ледоколом караванов судов [9] представляет интерес подготовка рекомендаций по выбору формы обтекаемого тела, обеспечивающей снижение сопротивления в двухфазном потоке. Эта задача также актуальна в проектировании элементов конструкции летательной техники, обеспечивающих защиту от обледенения и попадания посторонних предметов в тех случаях, когда аэродинамические аспекты не так важны, как процессы, сопровождающие взаимодействие частиц и капель с поверхности: например, при проектировании приёмника воздушного давления, обледенение которого может привести к тяжёлым последствиям [10]. Отдельного внимания заслуживает повышение аэрогидродинамического качества движущегося по воде колеса с грунтозацепами, при аквапланировании которого могут реализоваться своеобразные режимы обтекания: от гребного до образования под колесом изогнутого воздушного экрана [11]. Влияние водности потока и влажности рассмотрено ранее в работах [12–14], однако в этом исследовании не учитываются безразмерные критерии, определяющие влияние инерции взвешенных в потоке частиц и капель, а также их прогрев на особенности нарастания льда, теплообмен и структуру пограничного слоя на элементах конструкции летательной техники.

Оптимизация формы тел в двухфазных потоках представляет большой практический интерес в широком спектре областей практических приложений. Так, например, при полёте летательного аппарата в сильный ливень масса капель в единице объёма может в десятки раз превышать плотность воздуха, при движении во льдах сопротивление судна возрастает на порядок; даже ничтожные (меньше 1%) массовые и объёмные концентрации частиц и капель в атмосфере приводят к возрастанию тепловых потоков в несколько раз, абляции поверхности вплоть до полного разрушения или к противоположному этому явлению – обледенению, которое может привести к катастрофическому снижению аэродинамического качества летательного аппарата. Особого внимания заслуживает применение смазок и специальных покрытий, с помощью которых можно значительно (несколько десятков процентов в практических задачах) снизить массу наростшего льда и даже полностью предотвратить обледенение твёрдого тела в аэрозольном потоке за конечное время.

Управление взаимодействием двухфазного потока с твёрдым телом

Снижению сопротивления тел в дисперсных средах посвящено множество исследований: от известной формулы И. Ньютона до использования современных методов расчёта динамики разреженного газа или хаоса частиц в пылевой плазме и иных гетерогенных средах, в том числе при эволюции галактик и образовании звёзд. Тем не менее формулировка принципов

оптимальных форм обтекаемых тел в двухфазных средах пока далеко от своего завершения.

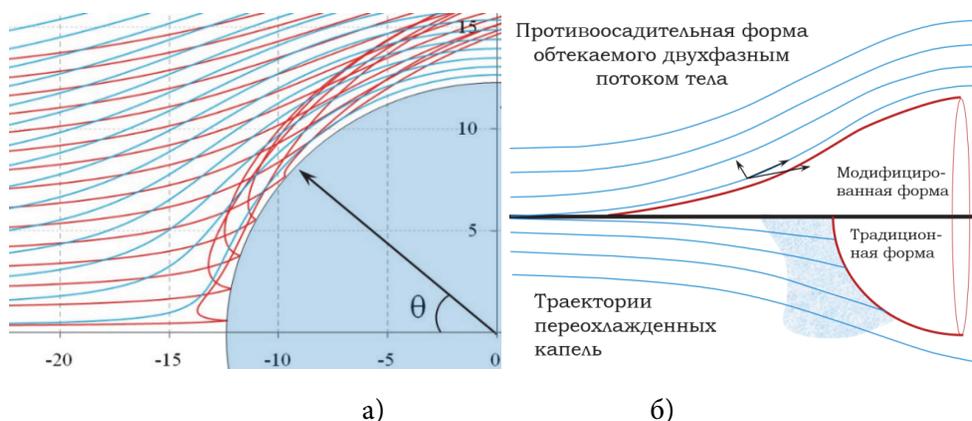


Рис. 1 / Fig. 1. Особенности обтекания тела двухфазным потоком: а – различие траекторий частиц и линий тока газа; б – иллюстрация к определению формы тела, которое устойчиво к образованию льда / Features of a two-phase flow around a body: а – difference in particle trajectories and gas flow lines; б – illustration for determining the shape of a body that is resistant to ice formation.

Источник: по данным авторов

Цель настоящего исследования – формулировка принципов проектирования формы тел, которая препятствует обледенению. С точки зрения практических приложений в области летательных аппаратов наибольшую ценность представляет снижение обледенения крыла. С точки зрения фундаментальных исследований наибольший практический интерес представляет собой определение формы тела с минимальным количеством образующегося на нём льда. На рис. 1 показано отличие линий тока газа и частиц двухфазного потока. Справа (1а) показана иллюстрация возможностей снижения интенсивности обледенения за счёт изменения формы обтекаемого тела.

В качестве одного из существующих методов борьбы с обледенением используется небольшая деформация профиля крыла за счёт надувных мешков на его атакующей кромке. Предлагаемый в настоящей работе метод заключается в более радикальной управляющей оптимизации профиля, позволяющей минимизировать плотность падающего потока диспергированной массы за счёт специальной формы обтекаемого тела.

С точки зрения противодействия оледенению крылья можно разделить на три группы (рис. 2). Заметим, что режимы образования льда зависят от многих параметров, к наиболее важным из которых можно отнести температуру переохлаждения и число Стокса, в котором в качестве размера обтекаемого тела выбран радиус кривизны передней кромки.

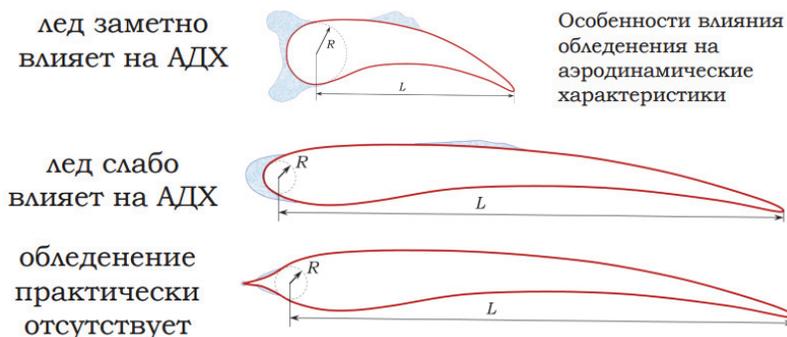


Рис. 2 / Fig. 2. Разновидности форм крыльев с различной степенью чувствительности к обледенению / Varieties of wing shapes with varying degrees of sensitivity to icing

Источник: по данным авторов

Удлинение носовой части обтекаемого тела увеличивает время на выравнивание скоростей частиц (капель) и несущего их потока, тем самым снижая скорость удара частиц (или капель) о поверхность, поток массы двухфазного потока, ослабляя эффекты дробления, эрозии и проникновения в поры покрытия.

Если рассмотреть случай крупных частиц (число Стокса много больше единицы), нетрудно заметить, что сила воздействия частиц на конус при их абсолютно упругом ударе уменьшается пропорционально квадрату синуса угла полураствора конуса. В качестве основных форм-факторов, которые влияют на обледенение, могут быть рассмотрены следующие параметры: 1) форма передней части крыла, 2) отношение длины крыла к характерному размеру передней кромки, 3) угол атаки.

Заметим, что изменение каждого из них может ощутимо влиять на аэродинамические характеристики. При этом результат оптимизации будет весьма существенно зависеть от числа Стокса и температуры переохлаждения капель аэрозоля, а также от поверхностных сил адгезии льда с поверхностью. Количество образовавшегося льда на крыле можно характеризовать: 1) отношением площади поперечного сечения льда к площади, ограниченной контуром профиля (коэффициент ψ) и 2) относительным изменением аэродинамических коэффициентов.

Для определения формы тела, подверженного наименьшему влиянию обледенения, рассмотрен плоский случай обтекания симметричного относительно горизонтальной оси тела, то есть тела с минимальным значением коэффициента ψ . Заметим, что при решении такой задачи изменится коэффициент аэродинамического сопротивления C_x и оптимальная форма тела будет определяться минимальным значением сопротивления хорошо

обтекаемого тела, покрытого льдом, и хуже обтекаемого тела, но с меньшим значением образовавшегося льда.

При обтекании клина или конуса поток массы и энергии не меняется. Силу, то есть импульс, который передаётся частицами при их ударе о конус с углом раствора 2α и радиусом основания R при больших значениях числа Стокса, найдём, используя уравнения переноса импульса и рис. 3.

$$S = \int_0^{R \operatorname{ctg} \alpha} \frac{2\pi x \operatorname{tg} \alpha dx}{\cos \alpha} = \frac{\pi R^2}{\sin \alpha} - \text{площадь боковой поверхности конуса};$$

$V_1 = V \sqrt{(a_n \sin \alpha)^2 + (a_\tau \cos \alpha)^2}$ – импульс отражённой частицы в системе координат, в которой конус неподвижен;

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{a_n}{a_\tau} \operatorname{tg} \alpha - \text{угол отскока};$$

$V_r = \sqrt{V^2 + V_1^2 - 2VV_1 \cos(\alpha + \beta)}$ – импульс отражённой частицы в неподвижной системе координат;

$\sin \gamma = \frac{V_1}{V_r} \sin(\alpha + \beta)$ – угол между скоростью отражённой частицы и горизонтальной плоскостью;

$V_r^\tau = V_r \cos \gamma$ – горизонтальная составляющая импульса, переданного частицей поверхности;

$$F = \rho V V_r^\tau S - \text{сила, действующая со стороны частиц на конус.}$$

В случае полидисперсного двухфазного потока с распределением частиц по размерам a_p , описываемой функцией $f(a_p)$, которую можно найти из следующего выражения: $dn/n = f(a_p)da_p$, где n – концентрация частиц, имеем $F = SV \int_0^\infty V_r^\tau \frac{4}{3} \pi a_p^3 N_0 \rho_p f(a_p) da_p = VS \frac{4}{3} \pi N_0 \rho_p \int_0^\infty V_r^\tau a_p^3 f(a_p) da_p$.

Учитывая выражение

$$\rho_0 = \int_0^\infty \frac{4}{3} \pi a_p^3 \rho_p dN = \int_0^\infty \frac{4}{3} \pi a_p^3 \rho_p N_0 f(a_p) da_p = \frac{4}{3} \pi \rho_p N_0 \int_0^\infty a_p^3 f(a_p) da_p,$$

$$\text{имеем } F = \rho_0 VS \frac{\int_0^\infty V_r^\tau a_p^3 f(a_p) da_p}{\int_0^\infty a_p^3 f(a_p) da_p}.$$

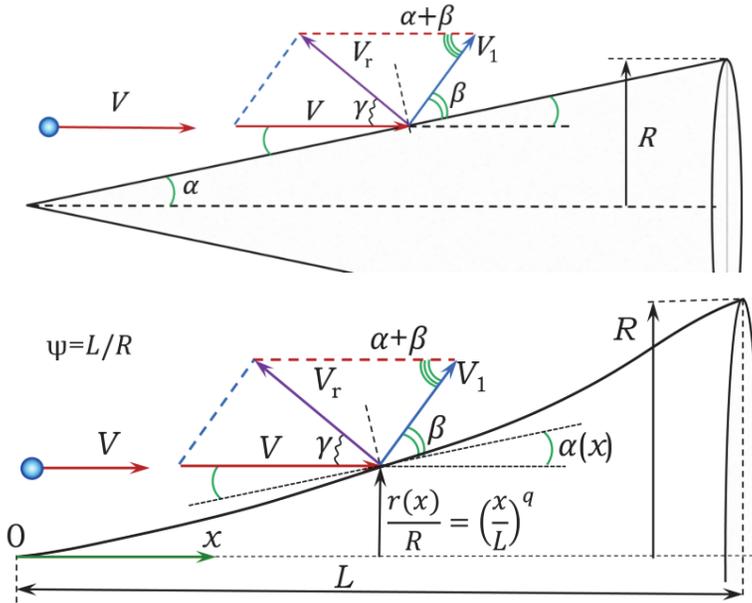


Рис. 3 / Fig. 3. Иллюстрация к расчётам силового воздействия частиц на обтекание конуса (слева) и степенного тела (справа) / Illustration of calculations of the force action of particles on the flow around a cone (left) and a power-law body (right)

Источник: по данным авторов

В частных случаях, например, при абсолютно упругом ударе частиц о поверхность $a_n = a_t = 1$, получим $V_r = 2V \sin \alpha$, $\sin \gamma = \cos \alpha$, $V_r^t = 2V \sin^2 \alpha$, а выражение для силы будет иметь следующий вид: $F = 2\pi R^2 \rho V^2 \sin \alpha$.

При фиксированном радиусе тела вращения найдём форму тела, которое обладает минимальным сопротивлением в двухфазном потоке: $r(x)/R = (x/L)^q$. Найдём значение q и удлинения $\psi = L/R$, при которых сопротивление минимально в случае абсолютно упругих ударов. $\text{tg} \alpha = (q/\psi)(x/L)^{q-1}$, $V_r = 2V \sin \alpha$,

$$\sin \gamma = \cos \alpha, V_r^t = 2V \sin^2 \alpha = 2V \left(\frac{\frac{q}{\psi} \left(\frac{x}{L}\right)^{q-1}}{1 + \frac{q}{\psi} \left(\frac{x}{L}\right)^{q-1}} \right)^2, dS = \frac{2\pi r(x) dx}{\cos \alpha},$$

$$dF = 2\rho V^2 \sin^2 \alpha \frac{2\pi r(x) dx}{\cos \alpha} = 4\pi \rho V^2 \text{tg}^2 \alpha \frac{r(x) dx}{\sqrt{1 + \text{tg}^2 \alpha}} =$$

$$4\pi \rho V^2 \left(\frac{q}{\psi}\right)^2 \left(\frac{x}{L}\right)^{2q-2} \frac{RL \left(\frac{x}{L}\right)^q d\left(\frac{x}{L}\right)}{\sqrt{1 + \left(\frac{q}{\psi}\right)^2 \left(\frac{x}{L}\right)^{2q-2}}} = 4\pi \rho V^2 R^2 \psi \left(\frac{q}{\psi}\right)^2 \frac{\xi^{3q-2} d\xi}{\sqrt{1 + \left(\frac{q}{\psi}\right)^2 \xi^{2q-2}}}$$

$$\frac{F}{\rho V^2 \pi R^2} = \frac{4q^2}{\psi} \int_0^1 \frac{\xi^{3q-2} d\xi}{\sqrt{1 + (q/\psi)^2 \xi^{2q-2}}} - \text{коэффициент силы воздействия частиц}$$

двухфазного потока на обтекаемое тело при абсолютно упругом ударе. Меняя параметры $\psi = L/R$ и q , нетрудно найти оптимальное значение формы обтекаемого тела.

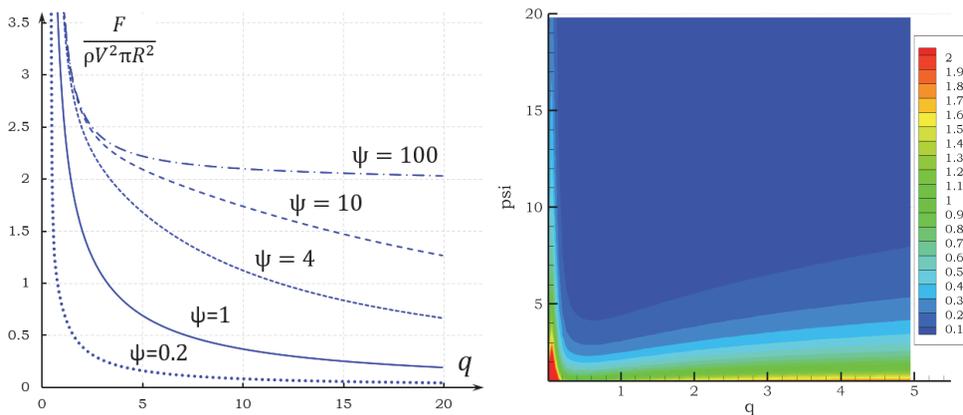


Рис. 4 / Fig. 4. Зависимость коэффициента силы сопротивления от параметров q и ψ при абсолютно упругих ударах частиц о поверхность. Справа показано распределение плотности потока массы в зависимости от упомянутых выше параметров / Dependence of the drag force coefficient on the parameters q and ψ for perfectly elastic impacts of particles on a surface. The distribution of the mass flow density is shown on the right as a function of the above parameters

Источник: по данным авторов

Результаты моделирования и их обсуждение

На рис. 4 и рис. 5 показаны зависимости коэффициента силы сопротивления тела от параметров q и ψ . Видно, что чем меньше удлинение и менее заострённое тело, тем меньше коэффициент сопротивления.

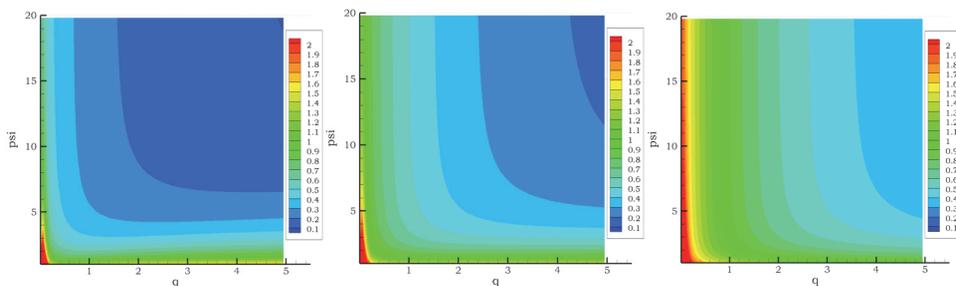


Рис. 5 / Fig. 5. Зависимость коэффициента сопротивления степенного тела от показателя степени q , удлинения ψ и коэффициентов изменения скорости частиц при их ударах о поверхность: слева $a_n = a_\tau = 0.75$; в центре $a_n = a_\tau = 0.5$; справа $a_n = a_\tau = 0.1$ / The dependence of the drag coefficient of a power-law body on the exponent q , elongation ψ and the coefficients of change in the velocity of particles when they hit the surface: on the left $a_n = a_\tau = 0.75$; in the center $a_n = a_\tau = 0.5$; on the right $a_n = a_\tau = 0.1$

Источник: по данным авторов

При уменьшении размеров частиц вплоть до размеров молекулярных кластеров будут проявляться эффекты, которые связаны с тепловым движением молекул, для расчёта силы необходимо проинтегрировать по скоростям выражение действующей на обтекаемое тело силы, умноженной на функцию распределения молекул по скоростям. При этом с уменьшением массы молекул тепловая скорость увеличивается пропорционально кубическому корню из массы. Развита в настоящей работе модель может быть использована при расчёте обтекания тел потоком частиц произвольной физической природы. Важно отметить, что наряду с изменением формы, силами, моментами сил и потоком массы можно управлять путем подбора свойств материала обтекаемого тела, от которых зависят вектора скорости отскочивших от обтекаемого тела частиц.

Заключение

В результате аналитических решений и компьютерного моделирования определены формы тел в двухфазном потоке с точки зрения снижения интенсивности тепломассообмена и силового воздействия двухфазного потока на обтекаемое тело с учётом физических свойств материалов поверхности обтекаемого тела. В настоящей работе в течение ряда лет создана и развита программа, позволяющая рассчитывать динамику разреженных газов с учётом многократных взаимодействий молекул между собой и с атомами твёрдого тела. Созданная программа позволяет не только предсказать коэффициенты аэродинамических сил и теплообмена летательного аппарата в потоке множества тел произвольной природы и размеров, но определить, какими свойствами должны обладать материалы обтекаемого тела или тонкий поверхностный слой для изменения коэффициентов аэродинамических сил и интенсивности тепломассообмена в широком диапазоне управляющих параметров – от обледенения до абляции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yihua Cao, Zhenlong Wu, Zhengyu Xu. Effects of rainfall on aircraft aerodynamics // Progress in Aerospace Sciences. 2014. Vol. 71. P. 85–127. DOI: 10.1016/j.paerosci.2014.07.003.
2. Теплообмен в окрестности точки торможения при сверхзвуковом обтекании тел гетерогенным потоком со скольжением фаз / Василевский Э. Б., Домбровский Л. А., Михатулин Д. С., Полежаев Ю. В. // Теплофизика высоких температур. 2001. Т. 39. № 6. С. 925–938.
3. Экспериментальное исследование натекания высокотемпературной струи запыленного газа на преграду / Кудин О. К., Нестеров Ю. Н., Токарев О. Д., Флакман Я. Ш. // Ученые записки ЦАГИ. 2013. Т. 44. № 6. С. 105–115.
4. Противообледенительные свойства супергидрофобных покрытий на алюминии и нержавеющей стали / Бойнович Л. Б., Домантовский А. Г., Емельяненко А. М., Миллер А. Б., Потапов Ю. Ф., Ходан А. Н. // Известия Академии наук. Серия химическая. 2013. № 2. С. 383–390.

5. Амелюшкин И. А. Критерии подобия и особенности обледенения тел в потоках воздуха, содержащего переохлажденные капли // Ученые записки ЦАГИ. 2023. Т. 54. № 3. С. 22–41.
6. Морозов М. А. Расчетно-экспериментальные исследования гидравлических характеристик трубопроводов систем теплоснабжения с учетом степени гидрофобности функциональных поверхностей: дисс. ... канд. тех. наук. М., 2016. 134 с.
7. Stone H. A., Stroock A. D., Ajdari A. Engineering Flows in Small Devices: Microfluidics Toward a Lab-on-a-Chip // Annual Review of Fluid Mechanics. 2004. Vol. 36. P. 381–411. DOI: 10.1146/annurev.fluid.36.050802.122124.
8. Kai Zhang, Hui Hu. An experimental study on the transient runback characteristics of wind-driven film/rivulet flows // Physics of Fluids. 2021. Vol. 33. Iss. 11. Article: 112104. DOI: 10.1063/5.0067672.
9. Ионов Б. П., Грамузов Е. М. Ледовая ходкость судов. СПб.: Судостроение, 2001. 512 с.
10. Aircraft Icing / eds. J. Steuernagle, K. Roy, D. Wriugh. Frederick, MD: AOPA Air Safety Foundation, 2008. 16 p. URL: <https://www.aopa.org/-/media/Files/AOPA/Home/Pilot-Resources/ASI/Safety-Advisors/sa11.pdf> (дата обращения: 10.02.2024).
11. Амелюшкин И. А., Дружинин О. В. Гидродинамические установки и моделирование сил, действующих на колесо с грунтозацепами, при его качении по воде // Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика: сборник трудов XXVI Международной научно-технической конференции (Москва, 07 декабря 2022 г.). М.: Мир науки, 2022. С. 13–16.
12. Математические модели и методы расчета процессов, сопровождающих обледенение летательного аппарата / Амелюшкин И. А., Кудров М. А., Морозов А. О., Щеглов А. С. // Труды Института системного программирования РАН. 2021. Т. 33. № 5. С. 237–248. DOI: 10.15514/ISPRAS-2021-33(5)-14.
13. Амелюшкин И. А., Стасенко А. Л. Взаимодействие нанок капель аэрозольного потока с твердым телом // Наноструктуры. Математическая физика и моделирование. 2016. Т. 14. № 2. С. 5–23.
14. Особенности формирования ледяных наростов на симметричном и несимметричном профиле и их влияние на аэродинамические характеристики крыла / Амелюшкин И. А., Павленко О. В., Февральских А. В., Багхдади М. К. // Письма в Журнал технической физики. 2023. Т. 49. № 24. С. 28–30. DOI: 10.61011/PJTF.2023.24.56867.87A.

REFERENCES

1. Yihua, Cao, Zhenlong, Wu & Zhengyu, Xu (2014). Effects of rainfall on aircraft aerodynamics. In: *Progress in Aerospace Sciences*, 71, 85–127. DOI: 10.1016/j.paerosci.2014.07.003.
2. Vasilevskii, E. B., Dombrovskii, L. A., Mikhatulin, D. S. & Polezhayev, Yu. V. (2001). Heat Transfer in the Neighborhood of the Stagnation Point under Conditions of Hypersonic Heterogeneous Slip Flow past Bodies. In: *High Temperature*, 39 (6), 925–938 (in Russ.).
3. Kudin, O. K., Nesterov, Yu. N., Tokarev, O. D. & Flaksman, Ya. Sh. (2013). Experimental study of the leakage of a high-temperature jet of dusty gas onto an obstacle. In: *Scientific Notes of Central Aerohydrodynamic Institute*, 44 (6), 105–115 (in Russ.).
4. Boinovich, L. B., Domantovskii, A. G., Emelyanenko, A. M., Miller, A. B., Potapov, Y. F. & Khodan, A. N. (2013). Antiicing performance of superhydrophobic coatings on aluminum and stainless steel. In: *Russian Chemical Bulletin*, 2, 83–390 (in Russ.).

5. Amelyushkin, I. A. (2023). Similarity criteria and peculiarities of ice accretion on bodies in air flows containing supercooled droplets. In: *Scientific Notes of Central Aerohydrodynamic Institute*, 54 (3), 22–41 (in Russ.).
6. Morozov, M. A. (2016). *Calculation and experimental studies of hydraulic characteristics of pipelines of heat supply systems taking into account the degree of hydrophobicity of functional surfaces* [dissertation]. Moscow (in Russ.).
7. Stone, H. A., Stroock, A. D. & Ajdari, A. (2004). Engineering Flows in Small Devices: Microfluidics Toward a Lab-on-a-Chip. In: *Annual Review of Fluid Mechanics*, 36, 381–411. DOI: 10.1146/annurev.fluid.36.050802.122124.
8. Kai, Zhang & Hui, Hu (2021). An experimental study on the transient runback characteristics of wind-driven film/rivulet flows. In: *Physics of Fluids*, 33 (11), article: 112104. DOI: 10.1063/5.0067672.
9. Ionov, B. P. & Gramuzov, Ye. M. (2001). *Ice propulsion of ships*. St. Petersburg: Sudostroyeniye publ. (in Russ.).
10. Steuernagle, J., Roy, K. & Wrigh, D., eds. (2008). *Aircraft Icing*. Frederick, MD: AOPA Air Safety Foundation. URL: <https://www.aopa.org/-/media/Files/AOPA/Home/Pilot-Resources/ASI/Safety-Advisors/sa11.pdf> (accessed: 10.02.2024).
11. Amelyushkin, I. A. & Druzhinin, O. V. (2022). Hydrodynamic installations and modeling of forces acting on a lugged wheel when it rolls on water. In: *Hydraulic machines, hydraulic drives and hydropneumatic automation: collected papers of the XXVI International scientific and technical conference (Moscow, December 7, 2022)*. Moscow: Mir nauki publ., pp. 13–16 (in Russ.).
12. Amelyushkin, I. A., Kudrov, M. A., Morozov, A. O. & Shcheglov, A. S. (2021). Mathematical models and methods of numerical investigation of processes which accompany aircraft icing. In: *Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS*, 33 (5), 237–248. DOI: 10.15514/ISPRAS-2021-33(5)-14 (in Russ.).
13. Amelyushkin, I. A. & Stasenko, A. L. (2016). Interaction of aerosol flow nanodroplets with a solid body. In: *Nanostruktury. Matematicheskaya fizika i modelirovaniye*, 14 (2), 5–23 (in Russ.).
14. Amelyushkin, I. A., Pavlenko, O. V., Fevralskikh, A. V. & Baghdadi, M. K. (2023). Features of the formation of ice creations on a symmetrical and asymmetrical airfoil and their influence on aerodynamic characteristic of the wing. In: *Technical Physics Letters*, 49 (24), 28–30. DOI: 10.61011/PJTF.2023.24.56867.87A (in Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Зубова Наталья Валерьевна (г. Москва) – кандидат педагогических наук, доцент кафедры физики Московского государственного университета технологий и управления им. К. Г. Разумовского (Первого казачьего университета);
ORCID: 0000-0002-8112-1378; e-mail: Na448@yandex.ru

Кудров Максим Александрович (г. Жуковский, Московская обл.) – кандидат технических наук, доцент, начальник научного центра, директор Передовой инженерной школы радиолокации, радионавигации и программной инженерии Московского физико-технического института (национального исследовательского университета);
ORCID: 0000-0003-2056-1932; e-mail: MKudrov@mail.ru

Амелюшкин Иван Алексеевич (г. Жуковский, Московская обл.) – кандидат физико-математических наук, программист лаборатории информационных технологий и прикладной математики Физтех-школы аэрокосмических технологий Московского физико-технического института (национального исследовательского университета);
ORCID: 0000-0002-4281-3531; e-mail: Amelyushkin_Ivan@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Natalya V. Zubova (Moscow) – Cand. Sci. (Education), Assoc. Prof., Department of Physics, Moscow State University of Technology and Management;
ORCID: 0000-0002-8112-1378; e-mail: Na448@yandex.ru

Maksim A. Kudrov (Zhukovsky, Moscow region) – Cand. Sci. (Engineering), Assoc. Prof., Head of the Research Center, Director of the Advanced Engineering School of Radar, Radionavigation and Software Engineering, Moscow Institute of Physics and Technology;
ORCID: 0000-0003-2056-1932; e-mail: MKudrov@mail.ru

Ivan A. Amelyushkin (Zhukovsky, Moscow region) – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Programmer, Laboratory of Information Technologies and Applied Mathematics, Phystech School of Aerospace Technology, Moscow Institute of Physics and Technology;
ORCID: 0000-0002-4281-3531; e-mail: Amelyushkin_Ivan@mail.ru