

УДК 532.529:536.24

DOI: 10.18384/2310-7251-2022-1-6-15

ОСОБЕННОСТИ ОБТЕКАНИЯ ТЕЛА ПОТОКОМ, СОДЕРЖАЩИМ ПЕРЕОХЛАЖДЁННЫЕ КАПЛИ

Амелюшкин И. А.

*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9, Российская Федерация
Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н. Е. Жуковского
140180, Московская обл., г. Жуковский, ул. Жуковского, д. 1, Российская Федерация*

Аннотация

Цель: систематизировать результаты теоретических и экспериментальных исследований по обтеканию затупленного тела потоком газовой среды, включающей переохлаждённые капли.

Процедуры и методы. Используются методы компьютерного моделирования и экспериментальные данные при проведении численных расчётов.

Результаты. Дана классификация режимов обтекания затупленного тела потоком газовой среды. Систематизированы в виде диаграммы области применимости различных методов исследования в зависимости от характерных размеров тела, капель и числа Кнудсена. Найдена область при обтекании передней кромки крыла, в которой переохлаждённые капли не будут кристаллизоваться при ударе о поверхность.

Теоретическая и практическая значимость: Результаты могут быть использованы в моделировании обледенения и послужить основой в борьбе с этим неблагоприятным явлением.

Ключевые слова: метастабильные капли, режимы обтекания, устойчивость переохлаждённого состояния

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 19–29–13024 и № 19–29–13016.

FEATURES OF A FLOW WITH SUPERCOOLED DROPS AROUND A BODY

I. Amelyushkin

Moscow Institute of Physics and Technology

Institutskii pereulok 9, Dolgoprudny 117303, Moscow Region, Russian Federation

Central Aerohydrodynamic Institute

ulitsa Zhukovskogo 1, Zhukovsky 140180, Moscow Region, Russian Federation

Abstract

Aim. The purpose of the paper is to systematize the results of theoretical and experimental studies on the flow of a gas suspension around a blunt body, including supercooled drops.

Methodology. Computer modeling methods and experimental data are used in numerical calculations.

Results. A classification of regimes of a flow around a blunt body by a gas suspension flow is presented. The results of applying various research methods depending on the characteristic dimensions of the body, drops and the Knudsen number are systematized in the form of a diagram. A region is found in the flow around the leading edge of the wing, where supercooled drops will not crystallize upon hitting the surface.

Research implications. The results can be used in the modeling of icing and serve as a basis in the fight against this unfavorable phenomenon.

Keywords: metastable droplets, flow regimes, stability of the supercooled state

Acknowledgments. The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research (Scientific project Nos 19–29–13024 and 19–29–13016).

1. Введение

Моделирование и управление взаимодействием многофазных потоков с твёрдым телом – одна из актуальных задач аэрогидромеханики. Управление взаимодействием аэрозольных течений с твёрдым телом представляет интерес широком спектре областей человеческой практики, в частности, в задачах противодействия обледенению [1–3] и при пространственной диагностике потоков с помощью естественно присутствующих или специальной введённых частиц и капель [4]. Присутствие дисперсной примеси даже в малых количествах зачастую приводит к существенным изменениям характеристик физического процесса, в частности к значительному снижению аэродинамического качества и повышению веса при обледенении.

2. Методы моделирования

При исследовании динамики многофазных сред в зависимости от масштаба задачи и требуемой точности можно выделить пять основных методов моделирования: 1 – макромоделли с полуэмпирическими коэффициентами, 2 – уравнения движения сплошной среды с источниковыми членами, 3 – кинетический уровень, 4 – статистическое моделирование при решении уравнений механики для множества отдельных элементов; 5 – рассмотрение атомно-молекулярных процессов с использованием методов молекулярного моделирования и ab-initio

алгоритмов квантовой химии. В первом методе форму льда или тепловых потоков на поверхность тела при характерных параметрах обтекания можно рассчитать согласно простым алгебраическим соотношениям. Например, выражение для максимальной нормальной скорости удара капли о поверхность цилиндра, движущегося со скоростью V имеет следующий вид [4]:

$$\frac{V_n^{\max}}{V_\infty} \cong \exp\left(-\frac{1}{4\text{Stk}}\right), \text{ где Stk – число Стокса.}$$

Такой подход очень удобен при решении многих практических задач в силу его простоты, но для исследования тонких физических особенностей и исследования новых физических особенностей применение этого подхода весьма ограничено.

Второй метод представляет собой Эйлеровский подход расчёта движения многофазных сред (см. напр., [6]), заключающийся в том, что в правых частях уравнений аэрогидродинамики возникают дополнительные слагаемые, отвечающие за межфазный обмен массой, импульсом и энергией. Кроме того, в уравнениях меняются коэффициенты переноса и общий вид тензора напряжений с учётом имеющих место в дисперсной среде реологических особенностей. Достоинства метода преимущественно связаны с простотой изменения программ расчёта несущей фазы двухфазного потока, к недостаткам следует отнести сложность расчёта стохастических процессов и учёта своеобразных эффектов в дисперсных системах, например, когда меняются распределение частиц или пузырьков по размерам, необходимо решать уравнения для отдельных фракций дисперсной фазы.

В третьем методе решается кинетическое уравнение Больцмана для газа частиц (см., напр., [7]) с учётом интеграла столкновений, определяются значения газодинамических функций. Поскольку точность и простота метода оставляет желать лучшего, применяется он достаточно редко.

Четвёртый подход представляет собой расчёт движения множества отдельных частиц, капель пузырьков в несущей их среде. Этот подход очень удобен при малых массовой и объёмной концентрациях дисперсной фазы, т. к. в этом случае есть возможность быстро рассчитать распределение параметров движения дисперсной среды на основе имеющегося расчёта однофазного потока. Отдельного внимания заслуживает так называемый полный Лагранжев подход [8] для численного исследования течений дисперсных сред с пересечениями траекторий частиц и локальными зонами аккумуляции дисперсной фазы, позволяющий рассчитывать стационарные и нестационарные течения без изменения алгоритма, а также поля концентрации частиц в сложных неоднородных и нестационарных потоках на основе расчёта небольшого числа траекторий.

К пятой группе методов следует отнести алгоритмы расчёта процессов с учётом многочисленных эффектов, вызванных взаимодействием отдельных атомов и молекул (см., напр., [9]). Достоинства такого подхода заключаются в возмож-

ности предсказать поведения веществ в условиях, при которых провести эксперименты проблематично, учесть множество физических эффектов. К недостаткам следует отнести значительные ограничения в применении этого метода, которые вызваны большими вычислительными затратами.

На рис. 1 качественно показаны области применимости различных методов исследования и моделирования взаимодействия скоплений жидкости с твёрдым телом, в частности, переохлаждённых метастабильных капель с обтекаемым телом в процессе его обледенения и при противодействии этому явлению при помощи гидро- и льдофобных покрытий.

При взаимодействии частиц аэрозольного потока с твёрдым телом в зависимости от условий реализуются различные режимы. В работе [1] приведено 5 основных режимов обтекания тела потоком газозвеси. В настоящей работе результатов исследования список [1] дополнен другими режимами, конкретизированы условия, при которых рассматриваемые условия реализуются. В табл. 1 представлена схема таких режимов обтекания тела аэрозольным потоком в зависимости от основных безразмерных управляющих параметров: числа Стокса и Кнудсена. Режимы прилипания (адгезии), разрушения (эрозии) частиц и обтекаемого тела имеют место в зависимости от коэффициентов изменения массы и скорости частиц [2]. Следует отметить, что в случае ионизации газа и/или частиц в таблице появятся магнитоплазменные режимы, вызванные сочетанием электромагнитных и газодинамических эффектов.

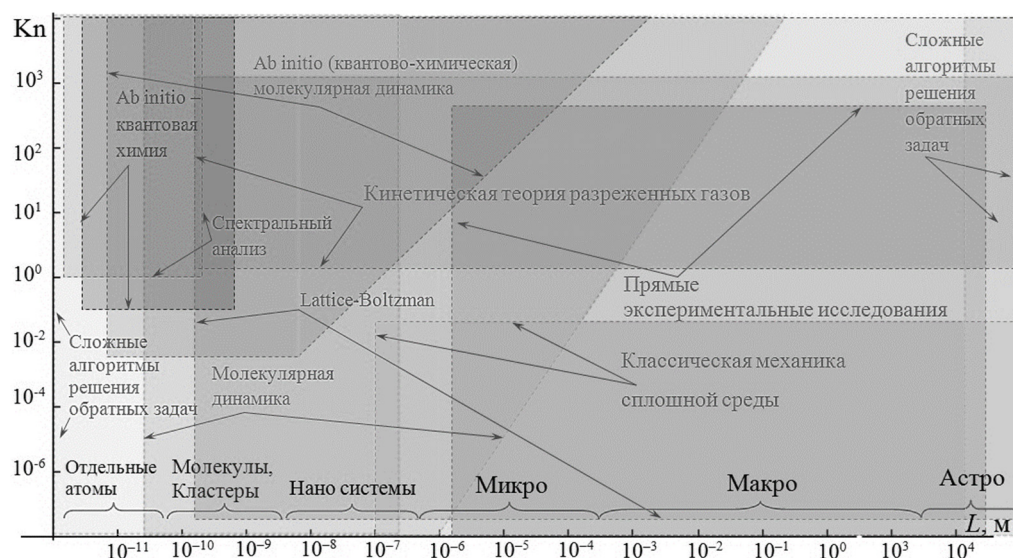


Рис. 1 / Fig. 1. Диаграмма применимости методов исследования и моделирования скоплений жидкости / Diagram of the applicability of methods for studying and modeling fluid accumulations

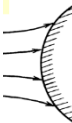
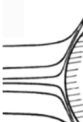
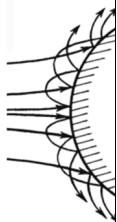
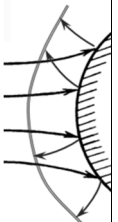
Источник: составлено автором.

3. Классификация режимов взаимодействия дисперсных течений с твёрдым телом

В настоящей работе получены результаты моделирования взаимодействия водно-кристаллического потока с твёрдым телом в широком диапазоне значений основных подпараметров и уровней моделирования [2–4]. При молекулярном моделировании малых капель [3; 5] соответствие поведению значительно более крупных переохлаждённых капель (размеры и, как следствие, инерция которых обеспечивают попадание на поверхность обтекаемого тела) может быть обеспечено в предположении равенства безразмерных критериев подобия, основные из которых числа Вебера и капиллярности. При этом значения скорости удара нанокapлей не будут близки к скорости звука в жидкости, т. к. микрокапли значительно тормозятся вблизи обтекаемого тела и не превышают максимальное значение нормальной компоненты скорости удара о поверхность, которое на основании расчётов [3] аппроксимировано аналитическим выражением.

Таблица 1 / Table 1

Схема режимов взаимодействия с обтекаемым телом монодисперсной примеси в обтекающем потоке /
Scheme of regimes of interaction with a streamlined body of a monodisperse impurity in a streamlined flow

Stk << 1		Stk~1	Stk>>1					
Kn <<1	Kn>0.1	Промежуточные режимы из двух групп случаев	Нет эрозии			Эрозия		
Траектории частиц совпадают с линиями течения несущего потока	Стохастические траектории частиц в окрестностях линий тока газа		Адгезия	Отскок		Разрушение частиц	Разрушение тела	Разрушение тела и частиц
				Без дисперсного экрана	Дисперсный экран			
								

*здесь Stk – число Стокса, рассчитанное по радиусу обтекаемого тела, Кн – число Кнудсена, рассчитанное по размеру частицы.
Источник: составлено автором.

4. Особенности взаимодействия переохлажденных капель двухфазного потока с твёрдым телом

В случае превышения плотности кинетической энергии в области наибольшего значения скорости удара капля радиуса R , массы m с температурой T о поверхность последние превращаются в водно-кристаллическую смесь и, двигаясь навстречу обтекающего твёрдое тело холодного газа, быстро кристаллизуются за

время $t = \frac{(1-\alpha)mL}{2\pi R\lambda(T-T_{fr})Nu}$, которое при радиусе капли 20 мкм и температуре –

10°C оказывается равным $t \approx 0.03$ с – в 30 раз больше характерного газодинамического времени 10^{-3} с. Здесь Nu – число Нуссельта, λ – коэффициент теплопроводности, L – удельная теплота кристаллизации, T_{fr} – температура кристаллизации, α – массовая доля кристаллов льда, которые образуются в переохлаждённой воде после прохождения фронта кристаллизации.

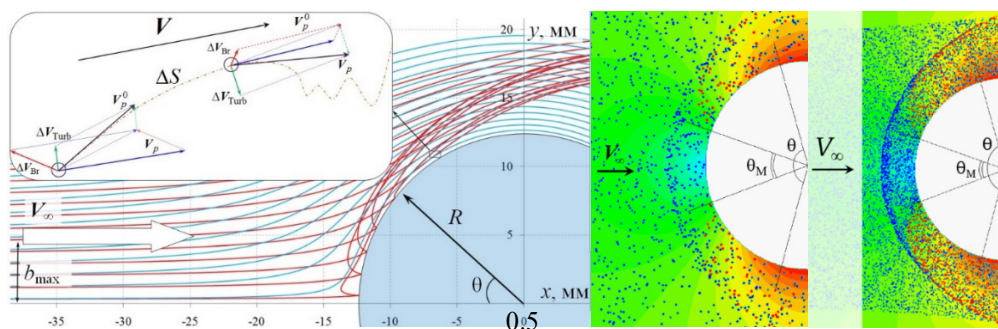


Рис. 2 / Fig. 2. Слева – схема обтекания затупленного тела потоком метастабильных переохлажденных капель. Справа визуализация расчета обтекания поперечного цилиндра радиуса 0.1 м, движущегося со скоростью 10 м/с в потоке воздуха, содержащего переохлажденные метастабильные капли радиуса 70 мкм при температуре –1°C, скорость потока 10 м/с. Кружки размером приблизительно в 25 раз больше размера капель нарисованы вокруг их центров для наглядности: синие – соответствуют положению незакристаллизовавшихся метастабильных капель, имеющих температуру около –1°C, красные – частицы водно-кристаллической смеси, имеющей температуру близкую к 0°C, в которые преобразовались капли в области поверхности характеризующей разностью углов θ и θ_M . / On the left is a diagram of the flow of metastable supercooled droplets around a blunt body. On the right is a visualization of the calculation of the flow around a transverse cylinder with a radius of 0.1 m, moving at a speed of 10 m/s in an air flow containing supercooled metastable drops with a radius of 70 μ m at a temperature of –1°C, a flow velocity of 10 m/s. Circles approximately 25 times larger than the size of the droplets are drawn around their centers for clarity: blue circles correspond to the position of non-crystallized metastable drops with a temperature of about –1°C, red ones correspond to particles of a water-crystalline mixture with a temperature close to 0°C, into which drops were transformed in the surface area characterized by the difference between the angles θ and θ_M .

Источник: составлено автором.

На основании результатов проведённых ранее экспериментов [3] и расчётных исследований показано, что при определённых условиях при ударе о поверхность летательного аппарата переохлаждённые метастабильные капли останутся жидкими не закристаллизовавшись (рис. 2, 3), т. к. их кинетической энергии удара о поверхность недостаточно для преодоления энергетического барьера [3]. В настоящей работе определены условия, при которых переохлаждённые метастабильные капли аэрозольного потока не будут кристаллизироваться в результате удара о поверхность обтекаемого тела (рис. 3, кривые 2). Максимальная скорость удара капель о поверхность располагается посередине между линией растекания и наиболее отдалёнными от оси (или в двумерном случае плоскости) симметрии обтекаемого тела. Отметим, что в случае покрытия поверхности слоем льда переохлаждённые капли при ударе об неё перейдут в водно-кристаллическую смесь независимо от их кинетической энергии.

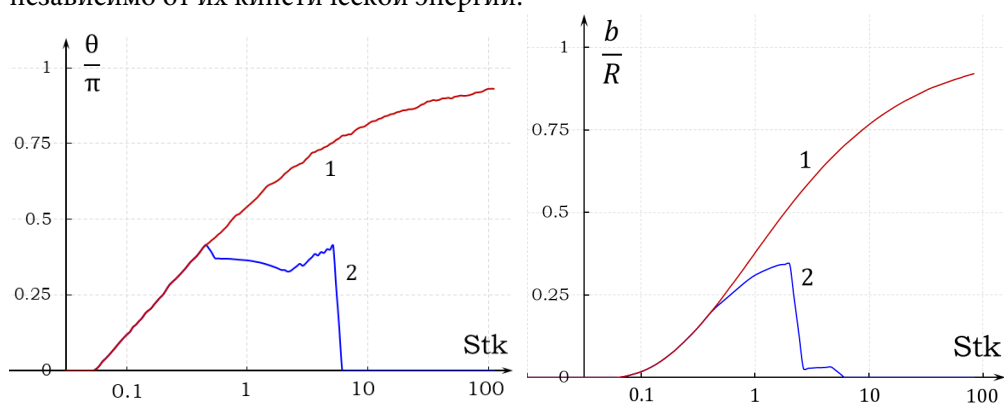


Рис. 3 / Fig. 3. Слева зависимость угла θ , характеризующего область захвата капель цилиндром (кривая 1), и угла θ_M , характеризующего размер области твердого тела вблизи линии растекания, в которой метастабильные переохлажденные капли не кристаллизуются (кривая 2). Справа аналогичные зависимости соответствующих этим предельным углам θ значения прицельных расстояний. Цилиндр радиуса 0.1 м обтекается аэрозольным потоком при температуре -1°C , скорость 10 м/с, размеры капель соответствуют рассмотренным значениям числа Стокса / On the left is the dependence of the angle θ , which characterizes the region where the drops are captured by the cylinder (curve 1), and the angle θ_M , which characterizes the size of the region of the solid body near the spreading line, in which metastable supercooled drops do not crystallize (curve 2). On the right, there are similar dependences of the impact distances corresponding to these limiting angles θ . A cylinder with a radius of 0.1 m is flown around by an aerosol flow at a temperature of -1°C , a speed of 10 m/s, the droplet sizes correspond to the considered values of the Stokes number.

Источник: составлено автором.

5. Заключение

Сформирована классификация режимов обтекания затупленного тела потоком газозвеси. Систематизированы в виде диаграммы области применимости различных методов исследования в зависимости от характерных размеров тела,

капель и числа Кнудсена. Получены зависимость от числа Стокса области на поверхности моделирующего переднюю кромку обтекаемого крыла цилиндра, в которой переохлажденные капли не будут кристаллизоваться при ударе о поверхность. Результаты могут быть использованы при расчетах обледенения и послужить основой в борьбе с этим неблагоприятным явлением.

Статья поступила в редакцию 15 декабря 2021 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tsirkunov Yu. M. Gas-particle flows around bodies – key problems, modeling and numerical analysis // Proceedings of Fourth International Conference on Multiphase Flow (ICMF'01) (New Orleans, USA. May 27 to June 1, 2001), 2001, Paper No. 607, 31 p. (CD-ROM).
2. Амелюшкин И. А., Стасенко А. Л. Моделирование взаимодействия кристаллов льда с поверхностью летательного аппарата: область орошения и коэффициенты восстановления скорости // Инженерно-физический журнал. 2020. Т. 93. № 3. С. 597–605.
3. Модели процессов, сопровождающих кристаллизацию переохлажденных капель / Амелюшкин И. А., Кудров М. А., Морозов А. О., Стасенко А. Л., Щеглов А. С. // Труды Института системного программирования РАН. 2020. Т. 32. № 4. С. 235–244. DOI: 10.15514/ISPRAS-2020-32(4)-17.
4. Амелюшкин И. А., Миллер А. Б., Стасенко А. Л. Оценка периода шероховатости противообледенительных покрытий тела в потоке воздуха с переохлажденными каплями // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. 2021. № 1. С. 54–63. DOI: 10.18384/2310-7251-2021-1-54-63.
5. Amelyushkin I. A., Stasenko A. L. Interaction of supercooled droplets and nonspherical ice crystals with a solid body in a mixed cloud // CEAS Aeronautics Journal. 2018. Vol. 9. Iss. 4. P. 711–720. DOI: 10.1007/s13272-018-0314-3.
6. Моллесон Г. В., Стасенко А. Л. Взаимодействие двухфазно струи и твердого тела с образованием «хаоса» частиц // Теплофизика высоких температур. 2013. Т. 51. № 4. С. 598. DOI: 10.7868/S0040364413040145.
7. Tsirkunov Yu. M., Romanyuk D. A. Computational fluid dynamics / Monte Carlo simulation of dusty flow in a “rotor-stator” set of airfoil cascades // Progress in Propulsion Physics. 2016. Vol. 8. P. 427–444 DOI: 10.1051/eucass/201608427.
8. Осипцов А. Н. Лагранжев подход в механике: преимущества и перспективы // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. 2011. № 4-3. С. 1024–1026.
9. Numerische Simulation in der Moleküldynamik: Numerik, Algorithmen, Parallelisierung, Anwendungen / Griebel M., Caglar A., Zumbusch G., Knapke S. Berlin: Springer, 2004. 492 p.

REFERENCES

1. Tsirkunov Yu. M. Gas-particle flows around bodies – key problems, modeling and numerical analysis. In: Proceedings of Fourth International Conference on Multiphase Flow (ICMF'01) (New Orleans, USA. May 27 to June 1, 2001), 2001, Paper no. 607, 31 p. (CD-ROM).

2. Amelyushkin I. A., Stasenko A. L. [Simulation of the interaction of ice crystals with the surface of a flying vehicle]. In: *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal* [Journal of Engineering Physics and Thermophysics], 2020, vol. 93, no. 3, pp. 597–605.
3. Amelyushkin I. A., Kudrov M. A., Morozov A. O., Stasenko A. L., Shcheglov A. S. [Models of processes accompanying crystallization of supercooled droplets]. In: *Trudy Instituta sistemnogo programmirovaniya RAN* [Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS], 2020, vol. 32, no. 4, pp. 235–244. DOI: 10.15514/ISPRAS-2020-32(4)-17.
4. Amelyushkin I. A., Miller A. B., Stasenko A. L. [Estimation of the roughness period of anti-ice body coatings in air flow with supercooled droplets]. In: *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Fizika-matematika* [Bulletin of the Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics], 2021, no. 1, pp. 54–63. DOI: 10.18384/2310-7251-2021-1-54-63.
5. Amelyushkin I. A., Stasenko A. L. Interaction of supercooled droplets and nonspherical ice crystals with a solid body in a mixed cloud. In: *CEAS Aeronautics Journal*, 2018, vol. 9, iss. 4, pp. 711–720. DOI: 10.1007/s13272-018-0314-3.
6. Molleson G. V., Stasenko A. L. [Interaction of a two-phase jet with a solid body with generation of a “chaos” of particles]. In: *Teplofizika vysokikh temperature* [High Temperature], 2013, vol. 51, no. 4, pp. 598. DOI: 10.7868/S0040364413040145.
7. Tsirkunov Yu. M., Romanyuk D. A. Computational fluid dynamics / Monte Carlo simulation of dusty flow in a “rotor-stator” set of airfoil cascades. In: *Progress in Propulsion Physics*, 2016, vol. 8, pp. 427–444 DOI: 10.1051/eucass/201608427.
8. Osipov A. N. [Lagrangian approach in the mechanics of dispersed media: advantages and prospects]. In: *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo* [Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod], 2011, no. 4-3, pp. 1024–1026.
9. Griebel M., Caglar A., Zumbusch G., Knapke S. Numerische Simulation in der Moleküldynamik: Numerik, Algorithmen, Parallelisierung, Anwendungen. Berlin, Springer, 2004. 492 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Амелюшкин Иван Алексеевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник отделения аэротермодинамики гиперзвуковых летательных аппаратов и объектов ракетно-космической техники Центрального аэрогидродинамического института имени профессора Н. Е. Жуковского; старший научный сотрудник по совместительству, преподаватель Московского физико-технического института (национального исследовательского университета);
e-mail: Amelyushkin_Ivan@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Ivan A. Amelyushkin – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Department of Aerothermodynamics of Hypersonic Aircraft and Objects of Rocket and Space Technology, Central Aerohydrodynamic Institute; Part-time Senior Researcher, Lecturer, Moscow Institute of Physics and Technology;
e-mail: Amelyushkin_Ivan@mail.ru.

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Амелюшкин И. А. Особенности обтекания тела потоком, содержащим переохлаждённые капли // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. 2022. № 1. С. 6–15.

DOI: 10.18384/2310-7251-2022-1-6-15.

FOR CITATION

Amelyushkin I. A. Features of a flow with supercooled drops around a body. In: *Bulletin of the Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics*, 2022, no. 1, pp. 6–15.

DOI: 10.18384/2310-7251-2022-1-6-15.