

КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН И ТРЕНИЕ В ТОНКОМ ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ НА ПРОНИЦАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗАТУПЛЕННОГО КОНУСА МАЛОГО УДЛИНЕНИЯ

В.В. Горский^{1,2}

А.Г. Саввина¹

makonka7@gmail.com

¹ АО «ВПК «НПО машиностроения», г. Реутов, Московская обл.,
Российская Федерация

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Расчет конвективного теплообмена и трения в ламинарно-турбулентном пограничном слое сопряжен с необходимостью численного интегрирования дифференциальных уравнений, дополненных теми или иными полуэмпирическими моделями кажущейся турбулентной вязкости, которые должны быть апробированы на результатах экспериментальных исследований, выполненных в условиях, обеспечивающих моделирование газодинамической картины обтекания тела газовым потоком. К сожалению, в настоящее время отсутствуют литературные данные об исследованиях ламинарно-турбулентного теплообмена на проницаемой поверхности затупленного тела. В этих условиях приходится идти по пути сравнения расчетных данных с результатами экспериментов, проведенных на телах острой формы. В литературных источниках описаны результаты исследований, выполненных для полусферы, в которых используется одна из полуэмпирических моделей кажущейся турбулентной вязкости, апробированная на результатах экспериментов, проведенных на непроницаемой поверхности тела такой формы. При этом удалось получить физически непротиворечивую картину влияния, оказываемого вдувом газа через стенку, на степень блокировки конвективного теплового потока. При отсутствии качественных экспериментальных данных по данному вопросу представляется обоснованным применение на прак-

Ключевые слова

*Конвективный теплообмен,
трение, толщина потери
импульса, пограничный слой*

тике полуэмпирической модели кажущейся турбулентной вязкости для оценки степени блокировки конвективного теплового потока и трения в указанных условиях. Решению аналогичной задачи для боковой поверхности затупленного конуса и посвящена настоящая работа

Поступила 14.07.2021

Принята 23.09.2021

© Автор(ы), 2022

Введение. Используемые для расчета ламинарно-турбулентного теплообмена методики основаны на применении [1] интегральных методов типа метода эффективной длины, тех или иных полуэмпирических моделей расчета кажущейся турбулентной вязкости при численном интегрировании дифференциальных уравнений ламинарно-турбулентного пограничного слоя или уравнений Навье — Стокса.

Кроме того, методики базируются на применении набора констант, подобранных на базе согласования расчетных и экспериментальных данных, а получение последних сопряжено с большими техническими трудностями.

Для затупленного конуса малого удлинения решающее значение имеет качество согласования расчетно-теоретических данных по конвективному теплообмену и трению на его затуплении, где наблюдается ярко выраженное градиентное течение газа. Впервые для непроницаемой поверхности тела такой формы эта задача была решена в [2–4] на базе создания модификации известной алгебраической модели кажущейся турбулентной вязкости Себечи — Смита [5], апробированной на результатах экспериментальных исследований [6, 7], выполненных при экстремально высоких значениях числа Рейнольдса. Дальнейшая модификация этой модели, в рамках которой уже обеспечивается удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных данных на всей непроницаемой поверхности затупленного конуса малого удлинения, предложена в [8].

Однако экспериментальные данные по степени блокировки конвективного теплового потока и трения вдувом газа для тел такой формы в литературных источниках отсутствуют. В свою очередь, все полуэмпирические методы расчета турбулентности апробированы на результатах экспериментальных исследований, выполненных на непроницаемой поверхности модели. Это вызывает определенные сомнения в обоснованности применения таких моделей в задачах, связанных со вдувом газа через поверхность тела.

Единственно возможным путем решения указанной проблемы, по мнению авторов настоящей работы, является проведение численного интегрирования дифференциальных уравнений пограничного слоя с по-

следующим анализом полученных результатов. Для полусферы эта задача решена в [9] с использованием модели расчета кажущейся турбулентной вязкости Себечи — Смита, модифицированной в [3], а приведенные в ней результаты исследований свидетельствовали об их физической непротиворечивости и объяснили основные закономерности изменения функции снижения интенсивности теплообмена вдоль образующей тела. Это, в свою очередь, свидетельствовало об обоснованности использования на практике предложенного в работе оперативного метода для расчета функции блокировки интенсивности конвективного теплообмена и трения, позволяющего существенно повысить точность проведения проектного расчета.

Решению аналогичной задачи для конусов малого удлинения, основанной на использовании модели Себечи — Смита и модифицированной в [3, 8], посвящена настоящая работа.

Метод решения задачи. Рассмотрена задача течения газа на проницаемой поверхности затупленного конуса малого удлинения с различными углами полураствора в рамках численного интегрирования дифференциальных уравнений тонкого ламинарно-турбулентного пограничного слоя. Расчеты проводились для радиуса сферического затупления конуса, равного 0,05 м, с углами полураствора $\theta = 0, 5, 10, 15, 20^\circ$ в широком диапазоне изменения определяющих факторов:

- число Маха в набегающем газовом потоке $M_\infty = 4-25$;
- число Рейнольдса $Re_{\infty,L}$, изменяемое в пределах 10^6-10^8 , рассчитанное по параметрам воздуха в набегающем потоке и характерному размеру тела L , в качестве которого принят радиус полусферы;
- энтальпийный фактор R_h , равный отношению энтальпии газа при температуре стенки к энтальпии торможения набегающего газового потока, изменялся в определенных пределах, нижняя граница которых соответствовала температуре 300 К, а верхняя граница возрастала от 0,1 до 0,4 пропорционально числу Маха;
- скорость вдува газа G_w в пограничный слой через поверхность конуса, измеренная в долях коэффициента теплообмена на этой поверхности в условиях ее непроницаемости, изменялась в диапазоне значений от 0,25 до 1,5.

При этом:

- длина конуса принималась равной 10, 7 и 5 радиусам его сферического затупления соответственно при значениях угла θ , меньших, равных и больших 10° ;

- расчет давления и скорости идеального газа на поверхности тела проводился в рамках численного решения уравнений Эйлера;
- использовалось допущение о термодинамическом равновесии воздуха;
- расчет диффузионного массопереноса выполнялся в рамках применения уравнений Стефана — Максвелла [10];
- в качестве функции межмолекулярной потенциальной энергии использовался потенциал Леннарда — Джонса [10], для расчета переносных свойств газовой смеси — метод Гиршфельдера [10];
- использовались кинетические константы потенциала Леннарда — Джонса, установленные в [11] на базе обеспечения оптимального описания коэффициента динамической вязкости равновесного воздуха, рассчитанного в четвертом приближении теории Чепмена — Энскога;
- численное интегрирование уравнений ламинарно-турбулентного пограничного слоя выполнялось при единичном значении коэффициента перемежаемости;
- расчет турбулентной составляющей в коэффициенте динамической вязкости проводился в рамках алгебраической модели Себечи — Смита [5], модифицированной в [3, 8] для случаев градиентного и безградиентного течений газа.

Результаты. Рассмотрим результаты систематического исследования течения газа на проницаемой поверхности конуса с различными углами полураствора в рамках численного интегрирования дифференциальных уравнений тонкого ламинарно-турбулентного пограничного слоя в широком диапазоне изменения значений параметров течения.

Предварительный анализ результатов проведенных исследований показал, что для многих вариантов расчета функция блокировки теплообмена и трения характеризуется аномальным уменьшением ее значения, имеющим место с увеличением координаты s , отсчитываемой вдоль образующей конуса в калибрах от его радиуса затупления. В качестве примера на рис. 1 приведена аномальная функция блокировки теплообмена $\Xi(s)$ такого рода, соответствующая обтеканию затупленного конуса с нулевым углом полураствора и температурой поверхности 300 К гиперзвуковым потоком воздуха с числом Маха $M = 10$ и давлением торможения, равным 10 МПа. Кривые соответствуют скорости вдува $G_w = 0,5; 1,0; 1,5$.

В то же время в литературе отсутствуют результаты экспериментальных исследований, посвященных рассматриваемому вопросу для затупленных тел. В связи с этим нет никаких оснований для использования на практике полуэмпирических моделей расчета кажущейся турбулентной вязкости, которые апробированы на результатах экспериментальных

исследований, проведенных на непроницаемой поверхности модели. Отсутствие указанных экспериментальных данных не является основанием для утверждения об ошибочности приведенных на рис. 1 результатов расчетно-теоретических исследований.

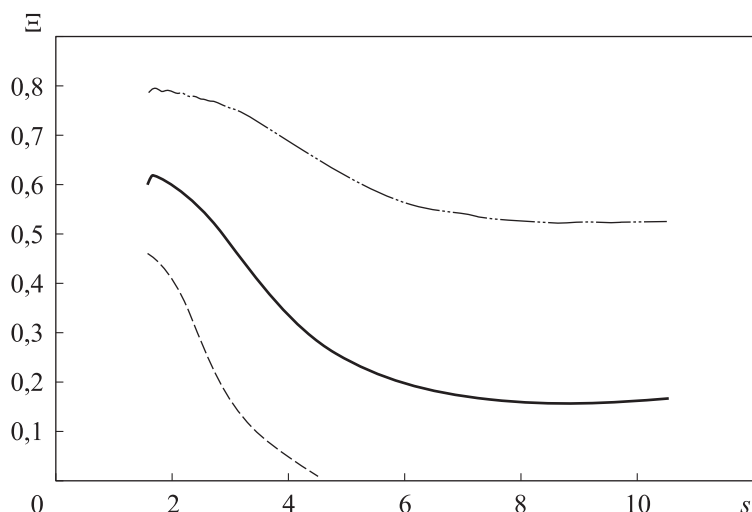


Рис. 1. Зависимость функции блокировки теплообмена на боковой поверхности конуса от координаты s при скорости вдува $G_w = 0,5$ (---), $1,0$ (—), $1,5$ (— · —)

Изучение основных закономерностей, связанных с аномальным характером функции блокировки теплообмена и трения вдувом газа, не входило в решение задачи разработки комплекса оперативных высокоточных методов расчета. В то же время, как это следует из результатов анализа проведенных исследований, в части вариантов расчета из числа проведенных отсутствовало аномальное усиление эффекта блокировки теплообмена и трения вдувом газа во всем рассмотренном диапазоне изменения скорости.

Функции блокировки теплообмена и трения такого рода будем обозначать через $\Xi_{h, \min}$ и $\Xi_{f, \min}$. Аппроксимационные формулы для этих функций получены на базе результатов систематического численного интегрирования дифференциальных уравнений пограничного слоя и имеют вид:

$$\Xi_{h, \min, a} = 1 - \zeta_{1, h} G_w + \zeta_{2, h} G_w^2; \quad (1)$$

$$\Xi_{f, \min, a} = 1 - \zeta_{1, f} G_w + \zeta_{2, f} G_w^2. \quad (2)$$

При этом оптимальные значения аппроксимационных коэффициентов $\zeta_{i, h}$ и $\zeta_{i, f}$ для различных фиксированных значений угла полураствора

конуса, полученные в рамках метода наименьших квадратов с использованием одного из вариантов эвристического метода прямого поиска Хука — Дживса [12], и погрешностей, соответствующих применению формул (1), (2), приведены в таблице.

Значения аппроксимационных коэффициентов, входящих в формулы (1), (2), и погрешностей, соответствующих их применению

θ , град	$\zeta_{1,h}$	$\zeta_{2,h}$	δ_h	σ_h	$\zeta_{1,f}$	$\zeta_{2,f}$	δ_f	σ_f
0	0,501	0,0700	21	10	0,45	0,0427	18	12
5	0,503	0,0655	14	10	0,47	0,0466	19	13
10	0,501	0,06	19	11	0,495	0,0515	26	16
15	0,501	0,0559	21	12	0,502	0,0467	30	17
20	0,503	0,0548	19	12	0,533	0,0620	30	18

Результаты экспериментальных исследований, которые выполнены на острых моделях разной формы при умеренных значениях числа Маха, приведены в [13]. Сводные данные по зависимости функции блокировки теплообмена от скорости вдува газа, обобщенные в [14], приведены в [15]. При малых значениях скорости вдува приведенные данные характеризуются значительным разбросом, однако в целом они удовлетворительно описываются формулой Кулика [16]:

$$\Xi_h = \sqrt{1 - \left(\frac{G_w}{2}\right)^2} - \frac{G_w}{2}. \quad (3)$$

В связи с этим целесообразно сравнить результаты расчетных исследований по функции блокировки теплообмена $\Xi_{h,\min}$, полученные для боковых поверхностей затупленных конусов с различными углами полураствора, с аналогичными данными расчетов, выполненных по формуле (3). Результаты сравнения приведены на рис. 2.

Из рис. 2 следует однозначный вывод о непротиворечивости результатов выполненных расчетных исследований, полученных для затупленных конусов, результатам экспериментов, проведенных для тел острой формы, в совокупности с тем обстоятельством, что на непроницаемой поверхности затупленного и острого конусов интенсивность теплообмена стремится к выравниванию по мере увеличения значения координаты s [1]. В свою очередь, это свидетельствует об обоснованном использовании на практике аппроксимационных функций (1) и (2) для расчета функций блокировки теплообмена и трения вдувом газа.

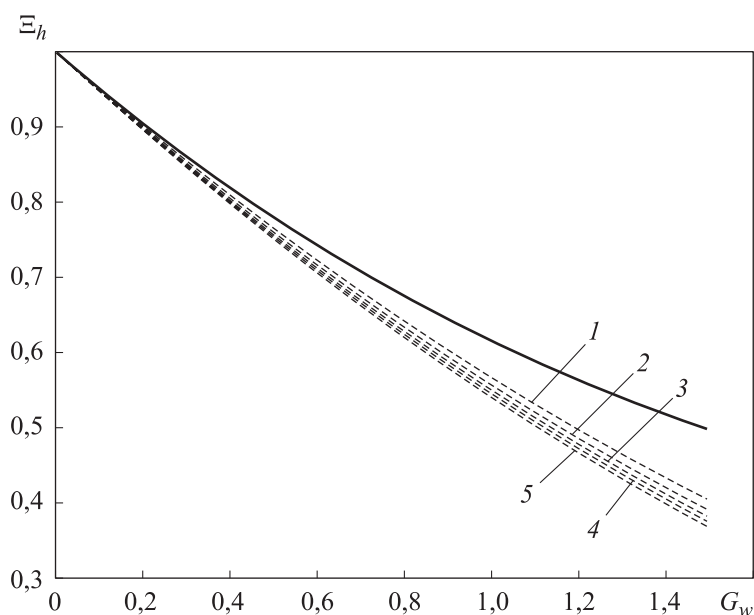


Рис. 2. Сопоставление результатов расчета по аппроксимационным формулам (3) (—) и (1) (----) и экспериментальных данных по функции блокировки теплообмена:
 $\theta = 0$ (1); 5° (2); 10° (3); $15,5^\circ$ (4); 20° (5)

Выводы. Установлена возможность аномального изменения функции блокировки интенсивности теплообмена и трения вдувом газа при использовании моделей расчета кажущейся турбулентной вязкости, которая апробирована на результатах экспериментальных исследований, проведенных на непроницаемой поверхности модели.

Обоснована неправомерность использования на практике результатов расчетных исследований, характеризующихся аномальным видом функции блокировки теплообмена и трения.

Впервые предложен подход к учету влияния, оказываемого вдувом газа на теплообмен и трение в ламинарно-турбулентном пограничном слое на полусфере, основанный на результатах расчетно-теоретических исследований, в которых не наблюдается аномальный характер изменения функции блокировки. Обоснована возможность использования этого подхода при проведении практических исследований.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Землянский Б.А., ред. Конвективный теплообмен летательных аппаратов. М., ФИЗМАТЛИТ, 2014.

- [2] Горский В.В., Пугач М.А. Ламинарно-турбулентный теплообмен на поверхности полусферы, обтекаемой сверхзвуковым потоком воздуха. *Ученые записки ЦАГИ*, 2014, т. 45, № 6, с. 36–42.
- [3] Горский В.В. Методика численного решения уравнений ламинарно-турбулентного пограничного слоя на проницаемой стенке затупленного тела вращения. *Космонавтика и ракетостроение*, 2017, № 3, с. 90–98.
- [4] Горский В.В. Теоретические основы расчета абляционной тепловой защиты. М., Научный мир, 2015.
- [5] Cebeci T., Smith A.M.O. Analysis of turbulent boundary layers. New York, Academic Press, 1974.
- [6] Уидхопф Дж.Ф., Холл Р. Измерение теплопередачи на затупленном конусе под углом атаки при переходном и турбулентном режиме течения. *Ракетная техника и космонавтика*, 1972, т. 10, № 10, с. 71–79.
- [7] Widhopf G.F., Hall R. Laminar, transitional and turbulent heat transfer measurement on a yawed blunt conical nosetip. *AIAA J.*, 1972, vol. 10, no. 10.
DOI: <https://doi.org/10.2514/3.50376>
- [8] Горский В.В., Локтионова А.Г. Модифицированная алгебраическая модель турбулентной вязкости Себечи — Смита для всей поверхности затупленного конуса. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2020, № 4, с. 28–41.
DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3941-2020-4-28-41>
- [9] Горский В.В., Локтионова А.Г. Моделирование теплообмена и трения в ламинарно-турбулентном пограничном слое над поверхностью полусферы. *Математическое моделирование и численные методы*, 2019, № 2, с. 51–67.
- [10] Гиршфельдер Дж., Кертис Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей. М., ИЛ, 1961.
- [11] Горский В.В., Федоров С.Н. Об одном подходе к расчету вязкости диссоциированных газовых смесей, образованных из кислорода, азота и углерода. *Инженерно-физический журнал*, 2007, т. 80, № 5, с. 97–101.
- [12] Горский В.В., Пугач М.А. Оценка влияния вдува газа на конвективный теплообмен в ламинарном и турбулентном пограничных слоях. *Ученые записки ЦАГИ*, 2016, т. 47, № 4, с. 34–43.
- [13] Фогароли Р.П., Сейда А.Р. Измерения теплообмена и поверхностного трения на пористом конусе при вдувании воздуха в турбулентный пограничный слой при больших числах Маха потока. *Ракетная техника и космонавтика*, 1966, т. 4, № 6, с. 197–199.
- [14] Горский В.В., Локтионова А.Г. Методика расчета степени блокировки теплообмена в ламинарно-турбулентном пограничном слое на поверхности полусферы вдувом газа. *Космонавтика и ракетостроение*, 2018, № 5, с. 72–78.
- [15] Романенко П.Н. Гидродинамика и теплообмен в пограничном слое. М., Энергия, 1974.

[16] Culick F.E.C. The compressible turbulent boundary layer with surface mass transfer. Technical report TR-454. Cambridge, Massachusetts Institute of Technology Naval Supersonic Lab., 1960.

Горский Валерий Владимирович (1936–2022) — д-р техн. наук, профессор, работал в АО «ВПК «НПО машиностроения» (Российская Федерация, 143966, Московская обл., г. Реутов, ул. Гагарина, д. 33); работал на кафедре «Вычислительная математика и математическая физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Саввина Анастасия Геннадьевна — инженер АО «ВПК «НПО машиностроения» (Российская Федерация, 143966, Московская обл., г. Реутов, ул. Гагарина, д. 33).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Горский В.В., Саввина А.Г. Конвективный теплообмен и трение в тонком ламинарно-турбулентном пограничном слое на проницаемой поверхности затупленного конуса малого удлинения. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2022, № 4 (143), с. 33–43.

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2022-4-33-43>

**CONVECTIVE HEAT TRANSFER AND FRICTION
IN A THIN LAMINAR-TURBULENT BOUNDARY LAYER
ON THE PERMEABLE SURFACE OF A BLUNTED CONE
OF SMALL ELONGATION**

V.V. Gorskiy^{1,2}

A.G. Savvina¹

makonka7@gmail.com

¹JSC “MIC “NPO Mashinostroyenia”, Reutov, Moscow Region,
Russian Federation

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

Solving the problem of calculating convective heat transfer and friction in the laminar-turbulent boundary layer involves the need for numerical integration of differential equations, supplemented by those or other semi-empirical models of apparent turbulent viscosity, which should be validated on the results of experimental studies, carried out in conditions, providing simulation of the gas dynamic picture of body flowing by a gas stream. Unfortunately, at present, there are no literature data on studies

Keywords

*Convective heat transfer,
friction, momentum loss
thickness, boundary layer*

of laminar-turbulent heat exchange on the permeable surface of a blunted body, and under these conditions, one has to go by the way of comparing the calculated data with the results of experiments carried out on sharp bodies. Literature sources describe the results of studies carried out for a hemisphere, in which one of the semi-empirical models of apparent turbulent viscosity is used, tested on the results of experiments carried out on the impermeable surface of such shaped body. In this case, it was possible to obtain a physically consistent picture of the influence exerted by blowing gas through the wall on the degree of blocking of the convective heat flow. In the absence of qualitative experimental data on this issue, it seems reasonable to apply in practice the considered semi-empirical model of apparent turbulent viscosity to estimate the degree of blocking of convective heat flow and friction under the specified conditions. This article is devoted to the solution of a similar problem for the lateral surface of a blunted cone

Received 14.07.2021

Accepted 23.09.2021

© Author(s), 2022

REFERENCES

- [1] Zemlyanskiy B.A., ed. *Konvektivnyy teploobmen letatel'nykh apparatov* [Convective heat transfer of aircraft]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2014.
- [2] Gorskiy V.V., Pugach M.A. Laminar-turbulent heat transfer on hemisphere surface exposed to supersonic air flow. *Uchenye zapiski TsAGI*, 2014, vol. 45, no. 6, pp. 36–42 (in Russ.).
- [3] Gorskiy V.V. Method of numerical solution of two-dimensional laminar-turbulence boundary layer equations on permeable wall of blunt rotation body. *Kosmonavtika i raketostroenie* [Cosmonautics and Rocket Engineering], 2017, no. 3, pp. 90–98 (in Russ.).
- [4] Gorskiy V.V. *Teoreticheskie osnovy rascheta ablyatsionnoy teplovoy zashchity* [Theoretical basis for calculating ablative heat protection]. Moscow, Nauchnyy mir Publ., 2015.
- [5] Cebeci T., Smith A.M.O. *Analysis of turbulent boundary layers*. New York, Academic Press, 1974.
- [6] Uidkhopf Dzh.F., Khol R. Measurement of heat transfer on the blunted cone at the attack angle in transient and bypass flow state. *Raketnaya tekhnika i kosmonavtika*, 1972, vol. 10, no. 10, pp. 71–79 (in Russ.).
- [7] Widhopf G.F., Hall R. Laminar, transitional and turbulent heat transfer measurement on a yawed blunt conical nosetip. *AIAA J.*, 1972, vol. 10, no. 10. DOI: <https://doi.org/10.2514/3.50376>
- [8] Gorskiy V.V., Loktionova A.G. Modified algebraical Cebeci — Smith turbulent viscosity model for the entire surface of a blunted cone. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2020, no. 4 (133), pp. 28–41 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2020-4-28-41>

- [9] Gorskiy V.V., Loktionova A.G. Heat exchange and friction in a thin air laminar-turbulent boundary layer over a hemisphere surface. *Matematicheskoe modelirovanie i chislennye metody* [Mathematical Modeling and Computational Methods], 2019, no. 2, pp. 51–67 (in Russ.).
- [10] Hirschfelder J.O., Curtiss Ch.F., Bird R.B. Molecular theory of gases and liquids. Wiley, Chapman and Hall, 1954.
- [11] Gorskiy V.V., Fedorov S.N. An approach to calculation of the viscosity of dissociated gas mixtures formed from oxygen, nitrogen, and carbon. *J. Eng. Phys. Thermophys.*, 2007, vol. 80, no. 5, pp. 948–953. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10891-007-0126-5>
- [12] Gorskiy V.V., Pugach M.A. Estimation of the gas blowing effect on convective heat transfer in laminar and turbulent boundary layers. *TsAGI Sc. J.*, 2016, vol. 47, no. 4, pp. 397–408. DOI: <https://doi.org/10.1615/TsAGISciJ.2016018425>
- [13] Fogaroli R.P., Seyda A.R. Measuring heat transfer and surface friction on a porous cone at air injection into boundary layer at large Mach numbers of the flow. *Raketnaya tekhnika i kosmonavtika*, 1966, vol. 4, no. 6, pp. 197–199 (in Russ.).
- [14] Gorskiy V.V., Loktionova A.G. The methods of calculation of heat transfer blocking degree in laminar-turbulent boundary layer on the surface of blunt cone after blow of gas. *Kosmonavtika i raketostroenie* [Cosmonautics and Rocket Engineering], 2018, no. 5, pp. 72–78 (in Russ.).
- [15] Romanenko P.N. *Gidrodinamika i teploobmen v pogranichnom sloe* [Hydrodynamics and heat transfer in boundary layer]. Moscow, Energiya Publ., 1974.
- [16] Culick F.E.C. The compressible turbulent boundary layer with surface mass transfer. Technical report TR-454. Cambridge, Massachusetts Institute of Technology Naval Supersonic Lab., 1960.

Gorskiy V.V. (1936–2022) — Dr. Sc. (Eng.), Professor, worked at JSC “MIC “NPO Mashinostroyeniya” (Gagarina ul. 33, Reutov, Moscow Region, 143966 Russian Federation); worked at Department of Computational Mathematics and Mathematical Physics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Savvina A.G. — Engineer, JSC “MIC “NPO Mashinostroyeniya” (Gagarina ul. 33, Reutov, Moscow Region, 143966 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Gorskiy V.V., Savvina A.G. Convective heat transfer and friction in a thin laminar-turbulent boundary layer on the permeable surface of a blunted cone of small elongation. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2022, no. 4 (143), pp. 33–43 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2022-4-33-43>