

Оценка точности инженерных методов расчета конвективного теплообмена в критической точке сферы по результатам исследований

© В.В. Горский^{1, 2}, А.А. Оленичева^{1, 2}

¹ОАО «ВПК «НПО машиностроения», Московская область, г. Реутов, 143966, Россия

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

В статье приведены результаты систематических исследований инженерных методов расчета конвективного теплообмена и трения в критической точке сферы на базе численного решения уравнений пограничного слоя. Установлено, что погрешность известных формул существенно выше, чем указано в литературных источниках. Предложена система соотношений, характеризующаяся повышенной точностью расчета теплообмена и трения.

Ключевые слова: теплообмен, критическая точка, численные методы, пограничный слой.

Введение. Расчетно-теоретические исследования тепломассопереноса и трения выполнены в широком диапазоне изменения определяющих факторов: числа Маха M_∞ в набегающем воздушном потоке, давления торможения p_0 этого потока и энтальпийного фактора R_h — отношения энтальпии воздуха при температуре так называемой стенки к энтальпии торможения воздушного потока. В данном случае стенка — поверхность тела, обтекаемая набегающим на него воздушным потоком.

Физико-математическая постановка задачи. Исследования проведены, во-первых, в предположении, что газ совершенный, и, во-вторых, для многокомпонентной воздушной смеси при предельных скоростях протекания химических реакций в пограничном слое. В последнем случае расчет диффузионного тепломассопереноса выполнен в рамках уравнений Стефана — Максвелла.

В процессе проведения исследований принимали:

состав воздушной смеси ограничен набором таких веществ, как O, O₂, N, N₂, NO, Ag, образованных из химических элементов O, N, Ag;

в нормальных условиях воздух характеризуется молярной концентрацией следующих химических веществ [1]: $\kappa_{O_2} = 0,2095$, $\kappa_{N_2} = 0,7808$,

$\kappa_{Ag} = 0,0097$.

При этом расчеты выполнены:

в предположении, что газ совершенный;

для воздушной смеси, находящейся в состоянии термодинамического равновесия;

в предположении, что течение воздушной смеси в пограничном слое «заморожено»;

для абсолютно каталитической стенки;

если не оговорено особо, в области изменения определяющих параметров: $M_\infty \in [2, 25]$, $p_0 \in [0, 001, 10]$, $R_h \in [R_{h, \min}, R_{h, \max}]$;

с применением изложенной в работе [2] методики расчета переносных свойств газовой смеси, основанной на современных расчетно-теоретических данных;

с использованием уточненных данных для параметрам идеального газа, набегающего на стенку, полученных методом сплайновой аппроксимации [3];

Отметим, что давление торможения измерено в мегапаскалях, энтальпийные факторы $R_{h, \min}$ и $R_{h, \max}$ соответствуют температуре стенки, равной примерно 300 К, и температуре кипения атомарного углерода соответственно.

Тепломассоперенос и трение в тонком пограничном слое на непроницаемой стенке в окрестности критической точки сферы. Как отмечалось ранее, систематические исследования тепломассопереноса и трения выполнены в различных постановках. Число вариантов расчетов, полученных в рамках каждой постановки, составляло 356.

Анализ результатов проведенных численных исследований по влиянию методики решения уравнений пограничного слоя на тепломассоперенос и трение позволяет сформулировать следующие выводы:

в тепловом потоке, рассчитанном для «замороженного» и термодинамически равновесного течения газа в пограничном слое, максимальное и среднеквадратическое значения различаются не более чем на 10 и 3 % соответственно;

в тепловом потоке, рассчитанном для совершенного газа и термодинамически равновесного течения газа в пограничном слое, максимальное и среднеквадратическое значения различаются не более чем на 13 и 7 % соответственно; это свидетельствует об обоснованности предположения о том, что газ совершенный.

Одна из основных задач, решенных в рамках выполненных исследований, — построение приближенных аналитических зависимостей, описывающих с повышенной точностью результаты численных расчетов теплообмена и трения.

В связи с этим необходимо отметить, что тестирование инженерных методов расчета конвективного теплообмена в критической точке сферы, проводившееся в основном в начале 60-х годов прошлого столетия, базировалось на результатах соответствующих экспериментальных исследований (чаще всего на результатах экспериментов, приведенных в работе [4]). Поскольку отсутствовали надежные дан-

ные по переносным свойствам многокомпонентных воздушных смесей, исследователи были вынуждены использовать для тестирования инженерных методов расчета теплообмена результаты экспериментальных исследований, несмотря на их значительный разброс. В настоящее время ситуация изменилась кардинальным образом. Это обусловлено тем, что современные численные методы решения уравнений пограничного слоя (типа рассмотренных в настоящей работе) и методы численного решения уравнений Навье — Стокса (см., например, работу [5]) позволяют получать достоверную информацию о конвективном теплообмене на поверхностях сложной формы, не говоря уже о теплообмене в окрестности критической точки сферы.

При обработке результатов численных расчетов применяли критерии теплообмена и трения в виде

$$Cr_{h,n,0} = \frac{q_{w,n,0}}{h_{00}(1-R_h)\rho_\infty V_\infty} \sqrt{Re_{\infty, R_{sph}}};$$

$$Cr_{f,n,0} = \frac{\tau_{w,n,0}}{u_e \rho_\infty V_\infty} \sqrt{Re_{\infty, R_{sph}}}.$$

Здесь $Cr_{h,n,0}$, $Cr_{f,n,0}$ — критерии теплообмена и трения на непроницаемой стенке в окрестности критической точки сферы; $q_{w,n,0}$, $\tau_{w,n,0}$ — удельный тепловой поток и напряжение трения на непроницаемой стенке в окрестности критической точки сферы; h_{00} , u_e — энтальпия торможения набегающего воздушного потока и скорость на внешней границе пограничного слоя; ρ_∞ , V_∞ — плотность и скорость в набегающем воздушном потоке; $Re_{\infty, R_{sph}}$ — число Рейнольдса, рассчитанное с помощью параметров набегающего воздушного потока и радиуса сферы R_{sph} .

Построение оптимальных аппроксимационных зависимостей для расчета критериев теплообмена и трения, базирующееся на результатах систематических численных исследований, проводили в два этапа. На первом использовали степенные функции

$$Cr_{h,n,0} = \zeta_{11,h} M_\infty^{\zeta_{21,h}}; \quad (1)$$

$$Cr_{f,n,0} = \zeta_{11,f} M_\infty^{\zeta_{21,f}}. \quad (2)$$

В табл. 1 приведены оптимальные значения аппроксимационных коэффициентов ζ , входящих в эти формулы, которые найдены в соответствии с методом наименьших квадратов одним из вариантов ме-

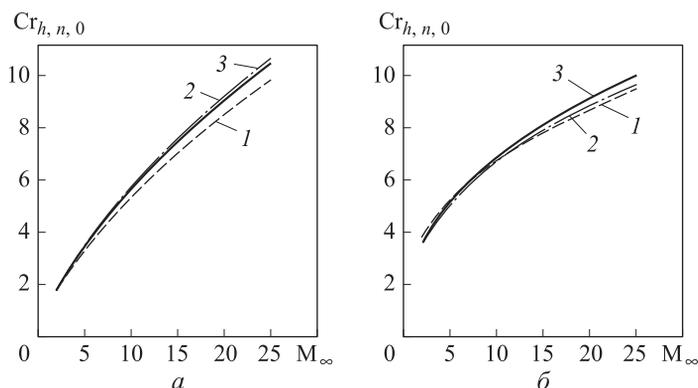
года Хука — Дживса [6], а графический вид функций (1) и (2) изображен на рисунке.

Таблица 1

Значения аппроксимационных коэффициентов, входящих в формулы (1), (2), и погрешностей этих формул

Параметр	Метод расчета		
	Термохимически равновесный пограничный слой	«Замороженный» пограничный слой	Совершенный газ
$\zeta_{11,h}$	1,16272	1,13103	1,10087
$\zeta_{21,h}$	0,68399	0,69652	0,68251
$\delta_{\max,h}, \%$	13,28	11,29	8,73
$\sigma_h, \%$	3,43	3,10	1,70
$\zeta_{11,f}$	2,65912	2,70956	2,94185
$\zeta_{21,f}$	0,410691	0,393489	0,363153
$\delta_{\max,f}, \%$	63,42	64,47	67,65
$\sigma_f, \%$	18,93	20,11	22,13

Примечание. δ_{\max} и σ — максимальные и среднеквадратические относительные погрешности вычисления.



Оптимальные аппроксимационные зависимости, построенные по формулам (1) и (2) для критерия теплообмена (а) и критерия трения (б):

- — термохимически равновесный пограничный слой;
- — «замороженный» пограничный слой;
- — совершенный газ

Как следует из анализа данных, приведенных в табл. 1, погрешность вычисления напряжения трения по формуле (2) является недо-

пустимо высокой. Впервые на недопустимость использования формул типа (2) при расчете напряжения трения отмечено в работе [7], выполненной для совершенного газа. Там же указано, что причина этого заключается в пренебрежении влиянием, которое оказывает на напряжение трения энтальпийный фактор в области его значений, превышающих единицу, при малых значениях числа Маха в набегающем воздушном потоке.

Кроме того, в работе [7] показано, что погрешность приближенного расчета теплообмена и трения можно существенно снизить, если вместо формул (1) и (2) использовать следующие соотношения:

$$Cr_{h,n,0} = \zeta_{12,h} M_{\infty}^{\zeta_{22,h}} + \zeta_{23,h} R_h M_{\infty}^{\zeta_{24,h}} ; \quad (3)$$

$$Cr_{f,n,0} = \zeta_{12,f} M_{\infty}^{\zeta_{22,f}} + \zeta_{23,f} R_h M_{\infty}^{\zeta_{24,f}} . \quad (4)$$

Результаты решения оптимизационной задачи определения аппроксимационных коэффициентов, входящих в формулы (3), (4), приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения аппроксимационных коэффициентов, входящих в формулы (3), (4), и погрешностей этих формул

Параметр	Метод расчета					
	Термохимически равновесный пограничный слой		«Замороженный» пограничный слой		Совершенный газ	
	$R_{hf} < 1$	$R_{hf} > 1$	$R_{hf} < 1$	$R_{hf} > 1$	$R_{hf} < 1$	$R_{hf} > 1$
$\zeta_{12,h}$	1,10310	1,05030	1,08347	1,18103	1,08835	1,08445
$\zeta_{22,h}$	0,70257	0,72856	0,70879	0,62578	0,69316	0,67635
$\zeta_{32,h}$	0,00431	0,01479	0,02324	0,00134	-0,01117	0,00920
$\zeta_{42,h}$	1,08794	0,60237	1,14015	2,39899	1,31525	0,15000
$\delta_{\max,h}, \%$	7,19	5,55	8,63	4,24	2,67	1,95
$\sigma_h, \%$	2,34	2,44	2,70	1,43	0,65	0,60
$\zeta_{12,f}$	1,09098	1,75954	1,29097	1,70267	1,08420	1,66917
$\zeta_{22,f}$	0,69721	0,55008	0,61086	0,57695	0,68191	0,53212
$\zeta_{32,f}$	0,40641	0,15758	0,13012	0,14543	0,42080	0,17954
$\zeta_{42,f}$	0,70822	0,81832	1,26025	0,87844	0,72241	0,96739
$\delta_{\max,f}, \%$	5,49	12,72	8,34	13,49	3,25	8,35
$\sigma_f, \%$	1,50	4,53	2,07	4,37	0,46	2,66

Как отмечалось ранее, все опубликованные в литературе инженерные формулы для расчета теплообмена тестировались в основном по результатам экспериментальных исследований, характеризующихся относительно высокой погрешностью. В связи с этим интересным оказалось оценить точность этих формул в тех же условиях, что и формулы (3).

Объектом настоящего анализа являлись следующие широко используемые на практике формулы для расчета конвективного теплообмена в критической точке сферы, обтекаемой воздушным потоком: упрощенный вариант формулы Фэя — Риддела [8]

$$q_{w,n,0} = 0,76Pr^{-0,6} \left(\frac{\rho_w \mu_w}{\rho_e \mu_e} \right)^{0,1} \sqrt{\rho_e \mu_e u_{e,s}} h_{00} (1 - R_h); \quad (5)$$

формула Фэя — Риддела [8] для расчета теплообмена в термохимически равновесном воздушном пограничном слое

$$q_{w,n,0} = 0,76Pr^{-0,6} \left(\frac{\rho_w \mu_w}{\rho_e \mu_e} \right)^{0,1} \sqrt{\rho_e \mu_e u_{e,s}} \left[1 + (Le^{0,52} - 1) \frac{h_D}{h_e} \right] h_{00} (1 - R_h); \quad (6)$$

формула метода эффективной длины [5] для расчета теплообмена в термохимически равновесном воздушном пограничном слое

$$q_{w,n,0} = 0,76Pr^{-2/3} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} R_h \right)^{-0,15} \sqrt{\rho_e \mu_e u_{e,s}} h_{00} (1 - R_h); \quad (7)$$

формула для расчета теплообмена в термохимически равновесном воздушном пограничном слое [5]

$$q_{w,n,0} = 1,05 \left(\frac{V_\infty}{1000} \right)^{1,08} \sqrt{\frac{\rho_\infty}{9,806 R_{sph}}} h_{00} (1 - R_h). \quad (8)$$

Здесь Pr — число Прандтля; Le — число Льюиса; ρ, μ — плотность и динамическая вязкость воздуха; $u_{e,s}$ — производная скорости газа на внешней границе пограничного слоя по координате s , отсчитываемой вдоль образующей сферы; h_D — теплота диссоциации молекул кислорода и азота:

$$h_D = \left(h_{O,w} - h_{O_2,w} \right) \left(C_{O,e} - C_{O,w} \right) + \left(h_{N,w} - h_{N_2,w} \right) \left(C_{N,e} - C_{N_2,w} \right),$$

где C_i, h_i — массовая концентрация и энтальпия i -го вещества.

Индексы w, e относятся соответственно к стенке и внешней границе пограничного слоя.

Формула (6) предложена для случая $R_h < 1$ и дает принципиально неправильные результаты при нарушении этого условия, поэтому ис-

пользовали ее модификацию, в которой вместо параметра h_{00} применяли максимальные значения из набора $h_{00}, h_{00}R_h$.

Результаты расчетов, выполненных по формулам (5) – (8), зависят от подхода, применяемого для расчета свойств воздуха. В связи с этим согласно рекомендациям, предложенным в работе [5]:

свойства воздуха, согласно уравнениям (6) – (8), рассчитывали по формулам:

$$\mu = 0,927 \cdot 10^{-8} \frac{P}{\rho h^{0,3}}, \quad \rho = F_\rho(p_0, h),$$

где $F_\rho(p_0, h)$ — аппроксимационная зависимость [9] для расчета плотности воздуха, находящегося в состоянии термодинамического равновесия;

для чисел Прандтля и Льюиса использовали их значения, равные 0,71 и 1,4 соответственно.

Ниже приведены результаты тестирования формул (5) – (8) для всех вариантов расчета:

Формула	(5)	(6)	(7)	(8)
$\delta_{h, \max}, \%$	25,66	30,94	43,00	27,51
$\sigma, \%$	14,64	13,43	16,26	11,54

Результаты тестирования формул (5) – (8) для вариантов расчета, ограниченных снизу значением числа Маха, равным 6:

Формула	(5)	(6)	(7)	(8)
$\delta_{h, \max}, \%$	22,43	25,09	28,09	18,12
$\sigma, \%$	16,14	13,09	14,78	10,68

Из анализа полученных данных следует:

все опубликованные в литературе аналитические формулы для расчета теплообмена характеризуются примерно одинаковым уровнем погрешности вычисления;

погрешность приведенных в литературе данных существенно возрастает при увеличении энтальпийного фактора в диапазоне его изменения, превышающем единицу;

использование метода эффективной длины допустимо только для гиперзвукового режима обтекания полусферы;

использование предложенного в работе [7] подхода к построению инженерных формул для расчета теплообмена позволяет снизить погрешность этого расчета примерно в 4 раза.

Литературные данные по инженерным методам расчета напряжения трения в окрестности критической точки сферы практически от-

существуют. В этой связи можно сослаться только на работу [10], в которой приведена формула

$$\text{Cr}_{f,n,0} = 1,7\text{Cr}_{h,n,0}\text{Pr}^{2/3}. \quad (9)$$

Как отмечалось ранее, в случае пренебрежения зависимостью напряжения трения от энтальпийного фактора возможно появление недопустимо больших ошибок при расчете трения (см. табл. 1). Поэтому проводить анализ точности формулы (9) нецелесообразно, а единственно возможным способом получения надежных инженерных оценок напряжения трения в окрестности критической точки сферы является использование формулы (4).

Выводы:

1) установлено, что погрешность известных формул по конвективному теплообмену в окрестности критической точки сферы существенно выше, чем указано в многочисленных литературных источниках;

2) получена система аппроксимационных соотношений, позволяющая по сравнению с известными формулами существенно (примерно в 4 раза) снизить погрешность инженерного расчета конвективного теплообмена;

3) впервые установлена существенная зависимость напряжения трения на стенке от температурного фактора и предложена система аппроксимационных соотношений, характеризующаяся погрешностью не более 14 %, что приемлемо для большинства практических приложений.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Предводителей А.С., Ступоченко Е.В., Плешанов А.С. и др. *Таблицы термодинамических функций воздуха (для температур от 200 до 6000 К и давлений от 0,00001 до 100 атм)* / Предводителей А.С., ред. Москва, Вычислительный центр АН СССР, 1962, 268 с.
- [2] 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.
- [3] Горский В.В. Метод сплайновой аппроксимации. *Журнал вычислительной математики и вычислительной физики РАН*, 2007, т. 47, № 6, с. 939–943.
- [4] Роуз П., Старк У. *Измерения теплообмена в лобовой точке в диссоциированном воздухе*. В кн.: *Проблемы движения головной части ракет дальнего действия*. Москва, Изд-во иностранной литературы. 1959, с. 277.
- [5] Землянский Б.А., Лунев В.В., Власов В.И. и др. *Руководство для конструкторов. Конвективный теплообмен изделий РКТ*. Землянский Б.А., ред. Королёв, ЦНИИмаш, 2010.
- [6] Аоки М. *Введение в методы оптимизации. Основы и приложения нелинейного программирования*. Москва, Наука, 1977.
- [7] Ватолина Е.Г., Горский В.В., Горская Н.А, Оленичева А.А. Метод сквозного счета для решения уравнений пограничного слоя при произ-

- вольной интенсивности вдува газа через поверхность тела. *Инженерно-физический журнал*, 2011, т. 84, № 2, с. 348.
- [8] Фэй Дж.А., Ридделл Ф.К. *Теоретический анализ теплообмена в лобовой точке, омываемой диссоциированным воздухом. В кн.: Проблемы движения головной части ракет дальнего действия*. Москва, Изд-во иностранной литературы, 1959, с. 217.
- [9] Синченко С.Г. Аппроксимация термодинамических функций воздуха. *Журнал вычислительной математики и вычислительной физики*, 1968, т. 8, № 4, с. 917.
- [10] Пасконов В. М. Полежаев Ю. В. Нестационарное плавление вязкого материала в окрестности точки торможения. Росляков Г.С. и Чудов Л.А., ред. *Численные методы в газовой динамике*. Сб. работ вычислительного центра МГУ. Москва, МГУ, 1963, с. 123–134.

Статья поступила в редакцию 03.10.2014.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Горский В.В., Оленичева А.А. Оценка точности инженерных методов расчета конвективного теплообмена в критической точке сферы по результатам исследований. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2014, вып. 9.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/mathmodel/technic/1243.html>

Горский Валерий Владимирович родился в 1939 г., окончил Московский авиационный институт имени Серго Орджоникидзе в 1963 г., главный научный сотрудник ОАО «ВПК «НПО машиностроения». Д-р техн. наук, профессор кафедры «Вычислительная математика и математическая физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ. Область научных интересов: абляционная тепловая защита, высокотемпературный тепломассоперенос, численные методы решения уравнений математической физики. E-mail: gorskknat@yandex.ru

Оленичева Анна Александровна родилась в 1979 г., окончила Московский энергетический институт в 2002 г. Старший научный сотрудник ОАО «ВПК «НПО машиностроения». Автор 10 научных работ. Область научных интересов: тепломассообмен.

Estimated accuracy of the analysis of convective heat transfer at the critical point of the sphere based on the research results

© Gorskiy V.V.^{1,2}, Olenicheva A.A.^{1,2}

¹JSC "MIC "NPO Mashinostroyeniya", Moscow region, Reutov-town, 143966, Russia

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The paper presents the results of systematic analysis of convective heat transfer and friction at the critical point of the sphere on the basis of the numerical solution of boundary layer equations. It is found that the error in known formulae is significantly higher than indicated in the literature. The system of relations characterized by an increased accuracy in the calculation of heat transfer and friction is offered.

Key words: *heat transfer, critical point, numerical methods, boundary layer*

REFERENCES

- [1] Predvoditelev A.S., Stupochenko E.V., Pleshanov A.S. *Tablitsy termodinamicheskikh funktsiy vozdukha (dlya temperature ot 200 do 6000 K i davleniya ot 0,00001 do 100 atm.)* [Tables of Air Thermodynamic Functions (for Temperatures between 200 and 6000 K and Pressures from 0.00001 to 100 atm.)]. Moscow, Vychislitelnyi Tsentr AN SSSR Publ., 1962, 268 p.
- [2] Gorskiy V.V., Fedorov S.N. *Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal – Journal of Engineering Thermophysics*, 2007, vol. 80, no. 5, pp. 97–101.
- [3] Gorskiy V.V. *Zhurnal vychislitelnoy matematiki i vychislitelnoy fiziki RAN – Journal of Computational Mathematics and Computational Physics RAS*, 2007, vol. 47, no. 6, pp. 939–943.
- [4] Rouz P., Stark W. *Izmereniya teploobmena v lobovoy tochke v dissotsirovanom vozdukh*e [Measurements of Heat Transfer in the Stagnation Point in Dissociated Air]. In: *Problemy dvizheniya golovnoy chasti raket dalnego deistviya* [Problems of Long Haul Missile Head Movement]. Moscow, Inostrannaya Literatura Publ., 1959, p. 277. [in Russian].
- [5] Zemlyanskiy B.A., Lunev V.V., Vlasov V.I., et al. *Rukovodstvo dlya konstruktorov. Konvektivnyi obmen izdeliy RKT* [Design guide. Convective Heat Transfer in Rocketry Products]. Korolev, TsNIIImash Publ., 2010.
- [6] Aoki M. *Vvedenie v metody optimizatsii. Osnovy i prilozheniya nelineynogo programmirovaniya* [Introduction to Optimization Techniques. Fundamentals and Applications of Nonlinear Programming]. Moscow, Nauka Publ., 1977. [in Russian].
- [7] Vatolina E.G., Gorskiy V.V., Gorskaya N.A., Olenicheva A.A. *Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal – Journal of Engineering Thermophysics*, 2011, vol. 84, no. 2, p. 348.
- [8] Fey J. A., Riddell F.K. *Teoreticheskiy analiz teploobmena v lobovoy tochke, omyvaemoy dissotsirovannym vozdukhom* [Theoretical Analysis of Heat Transfer in the Stagnation Point Washed by Dissociated Air]. In: *Problemy dvizheniya golovnoy chasti raket dalnego deistviya* [Problems of Long Haul Missile Head Movement]. Moscow, Inostrannaya Literatura Publ., 1959, p. 217. [in Russian].

- [9] Sinchenko S.G. *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i vychislitel'noy fiziki – Journal of Computational Mathematics and Computational Physics*, 1968, vol. 8, no. 4, p. 917.
- [10] Paskonov V.M., Polezhaev Yu.V., Nestatsionarnoe plavlenie vyazkogo materiala v okrestnosti tochki tormozheniya. *Chislennyye metody v gazovoy dinamike. Sbornik rabot vychislitel'nogo tsentra MGU* [Unsteady Melting Viscous Material in the Vicinity of the Stagnation Point. Numerical methods in Gas Dynamics. Collected Works of Moscow State University Computing Center]. Roslyakov G.S., Chudov L.A., eds. Moscow, MGU Publ., 1963, pp. 123–134.

Gorskiy V.V. (b.1939) graduated from Moscow Aviation Institute named after Sergo Ordzhonikidze in 1963. Senior staff scientist at the JSC (open joint-stock company) "MIC "NPO Mashinostroyenia". Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department "Computational Mathematics and Mathematical Physics" at Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 133 publications. Scientific interests: heat and mass transfer, ablation heat protection, high temperature heat-mass transfer, numerical methods of solving equations of mathematical physics. e-mail: gorsknat@yandex.ru

Olenicheva A.A. (b. 1979) graduated from Moscow Power Engineering Institute in 2002. Senior Scientist at the JSC (open joint-stock company) "MIC "NPO Mashinostroyenia". Author of 10 publications. Scientific interests: heat and mass transfer.