Heat Flux Measurements by Sensors Based on Anisotropic Thermoelements in a Gasdynamic Experiment on Shock Tubes

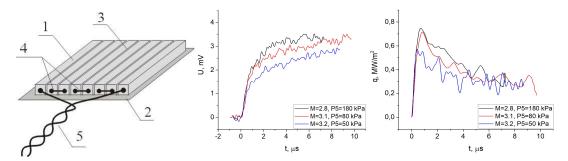
P.A. Popov, V.A. Sakharov, T.A. Lapushkina, S.A. Poniaev, N.A. Monakhov

Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russia pavel.popov@mail.ioffe.ru

Abstract

The results of heat flux measurements during shock wave reflection from the shock tube end and with an external supersonic gas flow around the model are presented. Sensors based on anisotropic thermoelements and a thin-film resistance sensor were used. The data obtained demonstrate their applicability in gas-dynamic experiments over a wide range of characteristic times.

Keywords: shock tube, heat flux, probe, measurements.



Schematic representation of Gradient Heat Flux Sensor (GHFS) (from the left). Typical signals of GHFS based on anisotropic thermoelements with reflection of a shock wave (from the center). Heat flux at the initial phase of shock wave reflection with different Mach numbers (from the right)

УДК533.6.071.3

Измерение тепловых потоков датчиками на анизотропных термоэлементах в газодинамическом эксперименте на ударных трубах

П.А. Попов, В.А. Сахаров, Т.А. Лапушкина, С.А. Поняев, Н.А. Монахов

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Россия, Санкт-Петербург, 194021, ул. Политехническая, 26 pavel.popov@mail.ioffe.ru

Аннотация

Представлены результаты измерения теплового потока с помощью датчиков на анизотропных термоэлементах и тонкопленочного датчика сопротивления при отражении ударной волны от торца ударной трубы и при внешнем обтекании модели сверхзвуковым потоком газа. Полученные данные демонстрируют их применимость в газодинамических экспериментах в широком диапазоне характерных времен.

Ключевые слова: ударные трубы, тепловой поток, датчик, измерения

1. Введение

Тепловой поток к поверхности тела, обтекаемого высокоэнтальпийным потоком газа, является одной из важнейших регистрируемых величин в газодинамическом эксперименте. Традиционно, для этого используются тонкопленочные датчики сопротивления и коаксиальные термопары. В ФТИ им. А.Ф. Иоффе для измерения теплового потока используется иной тип датчика, чувствительный элемент которого представляет собой батарею анизотропных термоэлементов из висмута. В настоящей работе, обобщен опыт тепловых измерений с помощью датчиков такого типа на ударных трубах в газодинамических процессах с различными характерными временами. Представленные результаты могут быть использованы в качестве валидационных данных при тестировании расчетных схем [1–3].

2. Экспериментальные установки

Эксперименты проводились на Малой и Большой ударных трубах ФТИ им. А.Ф. Иоффе отличающихся геометрией каналов и диапазоном достижимых газодинамических параметров. [4, 5]. Камера высокого давления Малой ударной трубы имеет длину 1.0 m, канал низкого давления 4.3 m, внутренний диаметр 50 mm (рис. 1, *a*).





b

Рис. 1. Внешний вид камеры низкого давления Малой ударной трубы (a) и торец с установленными тепловыми датчиками (b)

Максимальное давление в камере высокого давления может достигать 50 atm. На данной установке проводились измерения теплового потока при отражении ударной волны от торца трубы (рис. 1, b).

Общая длина Большой ударной трубы составляет 16 m, камеры высокого давления 3 m, ее внутренний диаметр 100 mm. Максимальное давление может достигать 500 atm (рис. 2, a). На этой установке проводились исследования теплообмена при внешнем обтекании моделей (рис. 2, b).

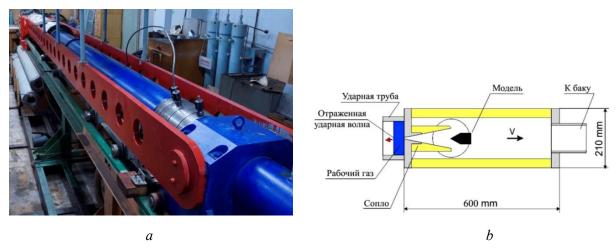


Рис. 2. Камера высокого давления (а) и схема рабочей камеры с соплом (b) Большой ударной трубы

3. Тепловые датчики

Измерения теплового потока были выполнены с помощью двух различных типов датчиков. В качестве основного использовался датчик на анизотропных термоэлементах из висмута. Тонкопленочный датчик сопротивления применялся только в качестве контрольного в экспериментах при отражении ударной волны. Одновременное измерение теплового потока с помощью двух датчиков с различным принципом действия позволяет повысить достоверность полученных результатов.

Датчики на анизотропных термоэлементах могут применяться для измерения теплового потока как в стационарных тепловых режимах так и при импульсном нагреве [6]. Они обладают малым временем отклика ~ 10 ns [4] и хорошо себя зарекомендовали в экспериментах на ударных трубах [8–10]. Конструктивно, датчик представляет собой батарею соединенных последовательно анизотропных термоэлементов (1) из монокристалла висмута, закреплённых на подложке из слюды (2) и разделённых друг от друга полосками лавсана (3) (рис. 3, a). Торцы соседних термоэлементов соединены пайкой (4). К крайним термоэлементам припаяны провода (5) для подключения к осциллографу.

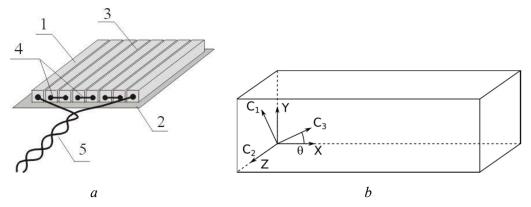


Рис. 3. Конструкция датчика на анизотропных термоэлементах (а) и его внешний вид (b)

Анизотропный термоэлемент представляет собой параллелепипед из висмута, вырезанный под некоторым углом θ к кристаллографическим осям C_1, C_3 (рис. 3, b). Это приводит к появлению внедиагональных элементов тензора термоэдс. При нагреве термоэлемента и появлении градиента температуры, возникают продольная и поперечная составляющие вектора термоэлектрического поля. Генерируемое напряжение снимается с контактов, расположенных на боковых гранях [11].

Тонкопленочный датчик сопротивления является одним из наиболее часто используемых средств измерения импульсных тепловых потоков. Используемый датчик МТГТ представляет собой цилиндр из диоксида циркония диаметром 2.3 mm и высотой 3.3 mm, на рабочей поверхности которого нанесена тонкая пленка из никеля с платиновыми выводами (рис. 4).



Рис. 4. Внешний вид вставки с тонкопленочным датчиком сопротивления

Датчик подключается к источнику питания, который обеспечивает протекание постоянного электрического тока = 7 mA. Боковые поверхности цилиндра теплоизолированы для создания одномерного потока тепла от рабочей к тыльной поверхности. Максимальное время регистрации ≈ 10 ms ограничено началом заметного нагрева тыльной поверхности цилиндра, когда нарушается приближение полуограниченного пространства. Датчики данного типа обладают быстродействием ≈ 1 µs [12]. Принцип действия датчика основан на регистрации температурной зависимости электрического сопротивления пленки. При нагреве рабочей поверхности датчика, в силу малой толщины пленки, ее температура совпадает с температурой поверхности цилиндра. Далее, по ней рассчитывается проходящий тепловой поток.

4. Обработка сигнала тепловых датчиков

Обработка результатов тепловых измерений с помощью датчика на анизотропных термоэлементах проводилась согласно методике, предложенной в работе [13]. Распределение температуры в двухслойной структуре термоэлемент—подложка рассчитывалось на основании одномерного нестационарного уравнения теплопроводности

$$C\rho \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) \tag{1}$$

с граничным условием, связывающим изменение температуры рабочей поверхности датчика $T_h(t)$ с электрическим сигналом U(t), зарегистрированным в эксперименте

$$T_h^{i+1}(t) = \frac{h}{k \, \lambda \, n l w} U(t) + T_0^i(t), \tag{2}$$

где T_0 — температура тыльной поверхности термоэлемента; k — стационарный калибровочный коэффициент датчика; n — количество термоэлементов в чувствительном элементе датчика; l и w — длина и толщина термоэлементов. Далее, по известному распределению температуры рассчитывался тепловой поток $q_h(t)$, проходящий через рабочую поверхность датчика.

Обработка сигнала тонкопленочного датчика проводилась с помощью подхода, предложенного в работе [14]

$$q(t) = \frac{2\sqrt{\rho C \lambda}}{\sqrt{\pi}} \left[\sum_{i=1}^{N} \frac{T_h(t_i) - T_h(t_{i-1})}{\sqrt{t_n - t_i} + \sqrt{t_n - t_{i-1}}} \right], \tag{3}$$

где $\sqrt{\rho C \lambda}$ — тепловая активность диоксида циркония; T_h — температура рабочей поверхности, которая связана с напряжением на выводах датчика следующим соотношением

$$\Delta T_h(t) = \frac{\Delta U(t)}{\alpha I R_0},\tag{4}$$

где ΔU — зарегистрированное в эксперименте изменение напряжения на датчике; α — коэффициент температурной зависимости электрического сопротивления пленки; I — сила тока; R_0 — сопротивление при комнатной температуре.

5. Отражение ударной волны

Данные эксперименты были проведены на Малой ударной трубе (рис. 5). Заподлицо с внутренней поверхностью камеры низкого давления на расстоянии 58 mm друг от друга установлены пьезоэлектрические датчики давления *D*1 и *D*2 регистрирующие момент прохождения ударной волны.

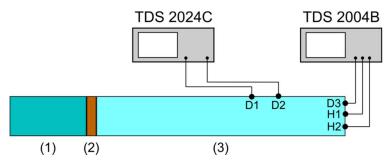


Рис. 5. Схема экспериментальной установки. (1) и (2) — камера высокого и низкого давления; (3) — блок диафрагм; D1 - D3 — датчики давления; H1 — датчик на анизотропных термоэлементах; H2 — тонкопленочный датчик сопротивления

По измеренному времени прохождения ударной волной расстояния между датчиками рассчитывалась ее скорость. В торце была установлена заглушка из непроводящего материала, на которой располагались датчик давления D3, тепловой датчик на анизотропных термоэлементах H1 и тонкопленочный датчик сопротивления H2. Размеры датчика H1 составляли 4×7 mm, высота термоэлементов 0.25 mm, ширина термоэлементов 0.4 mm, количество термоэлементов -10, вольт-ваттный коэффициент k=10 mV/W. Электрические сигналы датчиков D1 и D2 регистрировались с шагом 0.2 μ s, а датчиков D3, H1 и H2 с шагом D30 по D31 и D32 регистрировались с шагом D32 из, а датчиков D33 и D34 и D35 гельность регистрации составляла D36 из.

В качестве толкающего и рабочего газа использовался азот. Перед разрывом диафрагмы регистрировалось давление в камере высокого давления P_1 и камере низкого давления P_4 . По известному числу Маха и давлению в камере низкого давления определялись параметры газа за падающей и отраженной ударной волной. Запуск осциллографа регистрирующего сигналы тепловых датчиков H1 и H2 осуществлялся от датчика давления D3.

Было проведено 3 серии экспериментов, в которых изменялось давление в камере низкого и высокого давления. В табл. 1 приведены начальные параметры, а также параметры газа за отраженной ударной волной, рассчитанные по идеальной теории.

Таблица 1

Начальные параметры и параметры газа за отраженной ударной волной

Режим	Число Маха	P_1 , atm	P_4 , atm	P_5 , atm	T_5 , K
1	2.85	0.0372	30	1.66	1196
2	2.96	0.0167	23	0.83	1266
3	3.07	0.0078	13	0.43	1336

Основная особенность таких экспериментов состоит в необходимости регистрации тепловых потоков с характерным временем ~ 1 µs при малом соотношении сигнал/шум в силу слабого нагрева чувствительного элемента датчиков. На рис. 6, a показан типичный сигнал теплового датчика на анизотропных термоэлементах, зарегистрированный в данных экспериментах. Видно, что среднее значение не превышает 4 mV, а амплитуда шумов достигает 1 mV. Такое низкое отношение сигнал/шум требует фильтрации электрического сигнала датчика с сохранением всех особенностей поведения кривой, поскольку рассматриваемый процесс является нестационарным. В данном случае сигнал был подвергнут фурье-фильтрации с границей среза 5 MHz. На рис. 6, b показаны электрические сигналы датчика, подготовленные для расчета теплового потока. Заметные колебания температуры поверхности, пропорциональные электрическому сигналу приводят к существенным колебаниям рассчитанного теплового потока. По этой причине необходимо уделять особое внимание подготовке исходного электрического сигнала при низком соотношении сигнал/шум.

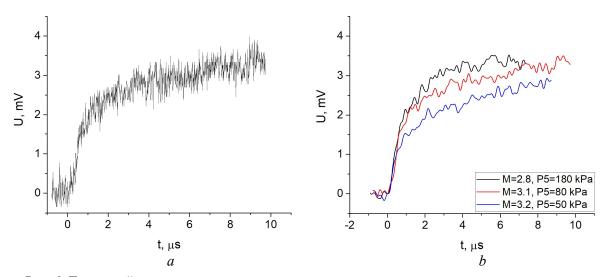


Рис. 6. Типичный сигнал теплового датчика на анизотропных термоэлементах при отражении ударной волны (a), а также сигналы, подготовленные для расчета теплового потока (b)

На рис. 7, a показано рассчитанное по приведенной выше методике изменение температуры рабочей поверхности термоэлементов $T_h(t)$ при отражении ударной волны с различными числами Маха. Видно, что ее нагрев не превышает 0.4 K, следовательно, при этом изменение температуры тыльной поверхности пренебрежимо мало. По этой причине для

расчета теплового потока по сигналу датчика (рис. 7, 6) было достаточно одной итерации при решении уравнения теплопроводности (1) с граничным условием (2).

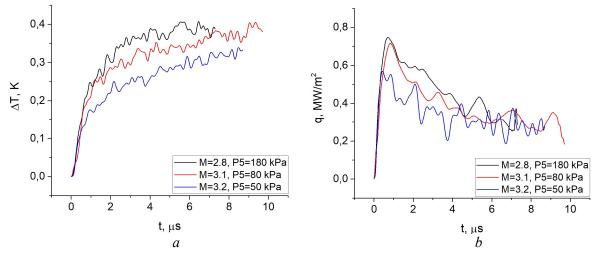


Рис. 7. Рассчитанное изменение температуры рабочей поверхности датчика на анизотропных термоэлементах (a) и теплового потока (b)

На рис. 8 показано изменение температуры рабочей поверхности (a) тонкопленочного датчика сопротивления и рассчитанный по нему тепловой поток (b).

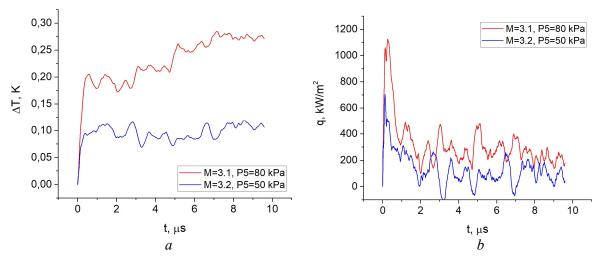


Рис. 8. Рассчитанное изменение температуры рабочей поверхности тонкопленочного датчика сопротивления (a) и теплового потока (b)

6. Внешнее обтекание модели конус-цилиндр

Данные эксперименты проводились на Большой ударной трубе. Модели представляли собой комбинацию конуса с углом раскрытия 60° и цилиндрической части диаметром 34 mm и длиной 33 mm. Модели устанавливалась в рабочей камере, отделенной от торца ударной трубы пластиковой диафрагмой, закрывающей вход в плоское сверхзвуковое сопло, находящееся в рабочей камере. Ширина камеры составляла 75 mm, критическое сечение сопла 10 mm, выходное сечение 100 mm. Модель с датчиками размещалась в выходном сечением сопла (см. рис. 2, δ).

В табл. 2 приведены начальные данные, параметры за отраженной ударной волной, рассчитанные идеальной теории и параметры потока, рассчитанные по одномерной модели. В первой серии экспериментов использовалась модель из плексигласа с 6 датчиками на анизотропных термоэлементах. В качестве рабочего газа использовался азот, число Маха на срезе сопла составляло M=4. Во второй серии экспериментов использовалась металлическая модель с 2 датчиками, в качестве рабочего газа использовался аргон, а число Маха M=5.

 Таблица 2

 Параметры газа в канале низкого давления и на срезе сопла

Рабочий газ	Камера низкого давления								
	Начальные условия		Условия за отраженной УВ			Параметры на срезе сопла			
	P, mBar	M	P, kPa	ρ , kg/m ³	<i>T</i> , K	P, kPa	ρ , kg/m ³	T, K	
Азот	112	4.04	1258	1.962	2189	8.29	0.054	521	
Аргон	47	4.32	543	0.664	3972	2.052	0.024	423	

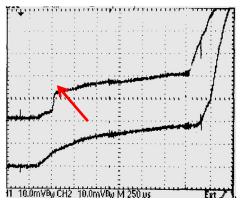
На рис. 9 показан внешний вид моделей с установленными вдоль образующей тепловыми датчиками размером $2.2 \text{ mm} \times 2.2 \text{ mm}$ и толщиной анизотропных термоэлементов 0.2 mm. Вольт-ваттный коэффициент используемых датчиков лежал в диапазоне $k=12 \div 15 \text{ mV/W}$.





Рис. 9. Пластиковая модель с 6 тепловыми датчиками (a) и металлическая модель с 2 тепловыми датчиками (b)

В ходе экспериментов было установлено, что в случае модели из плексигласа возникают спонтанные помехи в электрическом сигнале датчика (рис. 10).



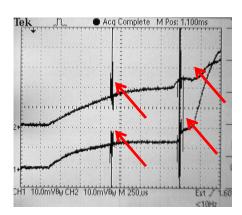


Рис. 10. Типичные осциллограммы сигнала тепловых датчиков, установленных на конической поверхности модели, искаженные импульсными помехами

При установке датчиков на металлическую заземленную модель таких особенностей не наблюдалось. Проведенный анализ показал, что данное явление является следствием накопления на модели заряда статического электричества, возникающего при обтекании модели потоком газа. Причиной возникновения этого заряда могут быть мелкие фрагменты пластиковой диафрагмы, перекрывающей в начальный момент вход в сверхзвуковое сопло. В процессе истечения эти фрагменты электризуются и при соприкосновении с моделью передают

часть заряда на поверхность модели. В некоторых случаях происходит стекание заряда по измерительным цепям теплового датчика, вызывая появление импульсных наводок. В ходе исследований было обнаружено, что наиболее часто этому влиянию подвержена коническая поверхность модели.

На рис. 11 показаны электрические сигналы датчиков, подготовленные для расчета теплового потока. Видно, что в этом случае, соотношение сигнал/шум значительно выше, чем при отражении ударной волны.

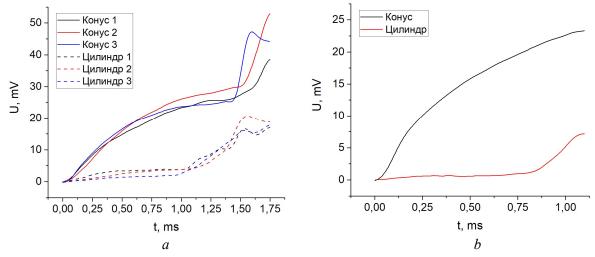


Рис. 11. Электрические сигналы датчиков на пластиковой (a) и металлической (b) модели

На рис. 12 показаны тепловые потоки, рассчитанные по электрическому сигналу датчиков. Вертикальными пунктирными линиями показаны временные границы стационарного обтекания модели.

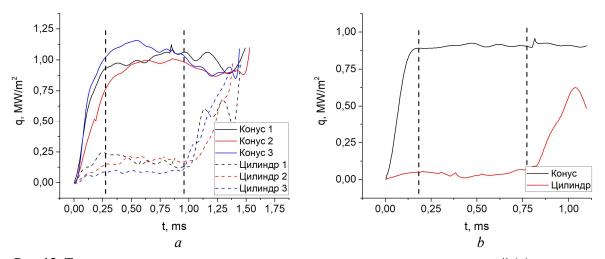


Рис. 12. Тепловые потоки, рассчитанные по сигналам датчиков на пластиковой (a) и металлической (b) модели

6. Заключение

Представлены результаты измерения теплового потока с помощью датчиков на анизотропных термоэлементах при отражении ударной волны от торца ударной трубы и при внешнем обтекании модели сверхзвуковым потоком газа. Согласованность полученных результатов измерений теплового потока с измерениями, проведенными с помощью тонкопленочного датчика, демонстрируют корректность используемой методики обработки электрического сигнала. Накопленный опыт применения тепловых датчиков данного типа показывает их применимость в газодинамических экспериментах в широком диапазоне характерных времен.

Литература

- 1. Панасенко А. В. Влияние релаксационных эффектов на формирование теплового потока в стенке при отражении от нее вязкой ударной волны//Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2021. Т. 22, вып. 1. http://chemphys.edu.ru/issues/2021-22-1/articles/921/
- 2. Суржиков С. Т., Шувалов М. П. Анализ радиационно-конвективного нагрева четырех типов спускаемых космических аппаратов //Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2014. Т. 15, вып. 4. http://chemphys.edu.ru/issues/2014-15-4/articles/237/
- 3. Александров С. В., Здор А. Г., Киреев А. Ю., Чернов С. В., Юмашев В. Л. Особенности неравновесного гиперзвукового течения воздуха в окрестности сферического затупления //Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2019. Т. 20, вып. 1. http://chemphys.edu.ru/issues/2019-20-1/articles/803/
- 4. Igra, O., Seiler, F. Experimental Methods of Shock Wave Research (Springer International Publishing) 2016.
- 5. Масленников В.Г., Сахаров В.А. Двухдиафрагменная ударная труба Физико-технического института // Журнал техн. физики. 1997. Т. 67, № 11. С. 88–95.
- 6. Sapozhnikov S.Z., Mityakov, V.Yu., Mityakov A.V. Heatmetry. The Science and Practice of Heat Flux Measurement. Springer. 2020.
- 7. Bobashev, S.V., Mende, N. P., Sakharov, V.A., Sapozhnikov, S.Z., Mityakov, V.Yu., Mityakov, A.V., Wie, D.V. 2005. 43rd AIAA Aerosp. Sci. Meeting and Exhibit (Reno).
- 8. Bobashev, S.V., Mende, N.P., Sakharov, V.A., Wie, D.V. 2004. 42nd AIAA Aerosp. Sci. Meeting (Reno).
- 9. Bobashev, S.V., Golovachov, Yu.P., Chernyshev, A.S., Kurbatov, G.A., Mende, N.P., Sakharov, V.A., Schmidt, A.A., Wie, D.V. 2008. 46th AIAA Aerosp. Sci. Meeting (Reno).
- 10. Bobashev, S.V., Mende, N.P., Ponjaev, S.A., Popov, P.A., Sakharov, V.A., Sapozhnikov, S.Z., Mityakov, V.Yu., Mityakov, A.V., Wie, D.V. 2009. 47th AIAA Aerosp. Sci. Meeting (Orlando).
- 11. Rowe D.M. Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano. 2006. CRC Press.
- 12. Schultz, D.L., Jones, T.V.: Heat-Transfer Measurements in Short-Duration Hypersonic Facilities. AGARDograph No. 165, AGARD-AG-165. 1973.
- 13. Попов П.А., Бобашев С.В., Резников Б.И., Сахаров В.А. Метод расчета нестационарного теплового потока по сигналу датчика на основе анизотропных термоэлементов из монокристалла висмута // Письма в ЖТФ. 2018. Т. 44. № 8. С. 3–10.
- 14. Cook, W.J., Felderman, E.J. Reduction of data from thin-film heat-transfer gages A concise numerical technique. AIAA Journal. Vol. 4, No. 3, 1966, pp. 561–562.

References

- 1. Panasenko, A. V., "The Relaxation Effects Influence on the Formation of a Heat Flux in a Wall when a Viscous Shock Wave is Reflected from it," *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, Vol. 22, No. 1, 2021. http://chemphys.edu.ru/issues/2021-22-1/articles/921/
- 2. Surzhikov, S.T., Shuvalov, M. P., "Estimation of Radiation-Convection Heating of Four Types of Reentry Spacecrafts," *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, Vol. 15, No. 4, 2014. http://chemphys.edu.ru/issues/2014-15-4/articles/237/
- 3. Alexandrov, S. V., Zdor, A. G., Kireev, A. Yu., Chernov, S. V., Yumashev, V. L., "Non-Equilibrium High Speed Air Flow over Spherical Blunt Bodies," *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, Vol. 20, No. 1, 2019. http://chemphys.edu.ru/issues/2019-20-1/articles/803/
- 4. Igra, O., Seiler, F. *Experimental Methods of Shock Wave Research*, Springer International Publishing, 2016.
- 5. Maslennikov, V. G., Saharov, V. A., "Dvuhdiafragmennaja udarnaja truba Fiziko-tehnicheskogo instituta," *Zhurnal tehn. Fiziki*, Vol. 67, No. 11, 1997, pp. 88–95.

- 6. Sapozhnikov, S. Z., Mityakov, V. Yu., Mityakov, A. V. Heatmetry. The Science and Practice of Heat Flux Measurement, Springer, 2020.
- 7. Bobashev, S. V., Mende, N. P., Sakharov, V. A., Sapozhnikov, S. Z., Mityakov, V. Yu., Mityakov, A. V., Wie, D. V., "Application of gradient heat flux sensor in shock tube experiments," 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting&Exhibit, Reno, NV., AIAA Paper 2005-787, Jan. 2005.
- 8. Bobashev, S. V., Mende, N. P., Sakharov, V. A., Wie, D. V., "MHD control of the separation phenomenon in a supersonic xenon plasma flow II," *42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting&Exhibit, Reno, NV.*, AIAA Paper 2004-515, Jan. 2004.
- 9. Bobashev, S. V., Golovachov, Yu. P., Chernyshev, A. S., Kurbatov, G. A., Mende, N. P., Sakharov, V. A., Schmidt, A. A., Wie, D. V., "Supersonic Flow about Wedge: MHD Impact on Flow Structure and Heat Flux," *46th AIAA Aerospace Sciences Meeting&Exhibit Reno, NV.*, AIAA Paper 2008-1094, Jan. 2008.
- 10. Bobashev, S. V., Mende, N. P., Ponjaev, S. A., Popov, P. A., Sakharov, V. A., Sapozhnikov, S. Z., Mityakov, V. Yu., Mityakov, A. V., Wie, D. V., "Influence of a Magnetic Field on the Thermal Process near an Aerodynamic Object," 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Orlando, AIAA Paper 2009-1041, Jan. 2009.
- 11. Rowe, D. M. Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano, CRC Press, 2006.
- 12. Schultz, D. L., Jones, T. V. "Heat-Transfer Measurements in Short-Duration Hypersonic Facilities," *AGARDograph* No. 165, AGARD-AG-165. 1973.
- 13. Popov, P. A., Bobashev, S. V., Reznikov, B. I., Saharov, V. A., "Metod rascheta nestacionarnogo teplovogo potoka po signalu datchika na osnove anizotropnyh termojelementov iz mono-kristalla vismuta," *Pis'ma v ZhTF*. Vol. 44, No. 8, 2018, pp. 3–10.
- 14. Cook, W. J., Felderman, E. J., "Reduction of data from thin-film heat-transfer gages A concise numerical technique," *AIAA Journal*, Vol. 4, No. 3, 1966, pp. 561–562.

Статья поступила в редакцию 29 января 2021 г.