

Calculation of Shock Wave Formation in a Shock Tube with a Different Method of Initial Gas Outflow

A.V. Panasenko

*Ishlinskyi Institute for Problems in Mechanics Russian Academy of Sciences (IPMech RAS),
Moscow, 119526, Russia*

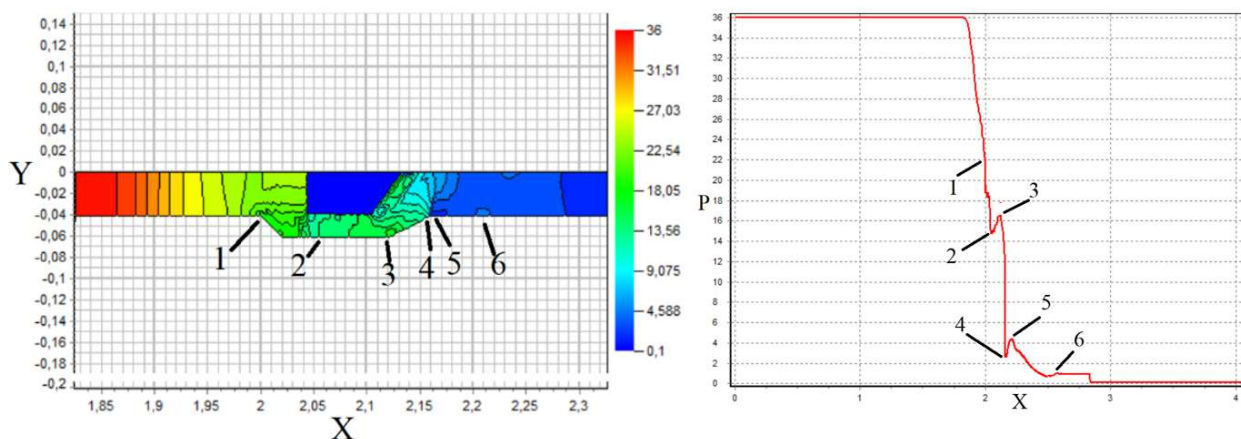
akpanas@mail.ru

Abstract

The results of calculations of the gas flow during the formation of a shock wave in a shock tube (ST) with a different method of setting the initial gas flow from a high-pressure chamber are presented.

Keywords: aerogasdynamics, shock wave, valve.

Shock tubes are widely used in the experimental study of gas flows, in which its high-enthalpy properties are important. It is known that at the initial stage of the shock wave movement in the shock tube, the main factor determining the deviations of the flow characteristics from those predicted by the ideal theory [1] is the non-instantaneous opening of the diaphragm separating the high and low pressure chambers. The opening of the diaphragm leads to a non-one-dimensional gas flow, which later forms a shock wave in the shock tube [2]. Considering that the rupture of the diaphragm is largely accidental, it can come off, hit and damage both the internal walls of the installation sections and expensive measuring instruments located inside. To eliminate such disadvantages associated with the use of a diaphragm, a high-speed pneumatic valve with an electromagnetic start in the shock tube was developed [3].



At the time of 0.0007317 s, the pressure distribution at the lower boundary of the calculated grid is given and the pressure pattern at is shown. From the comparison of these graphs, it can be seen that the pressure drop beyond the valve boundary to m is caused by a rarefaction wave. The subsequent pressure drop occurs due to the fracture of the wall of the ST (1) with its rise due to the deceleration of the flow on the lower wall of the ST in the section (2–3), followed by its fall due to the expansion of the flow in the section on the top of the ST (3–4). After the fracture of the ST surface, the pressure rises in the section (5–6), followed by its constant value beyond the point (6) with an exit to the propagating shock wave.

УДК 533.6.011

Расчет формирования ударной волны в ударной трубе при различном способе начального истечения газа

А. В. Панасенко

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук
Россия, Москва, 119526, проспект Вернадского, д. 101-1*

akpanas@mail.ru

Аннотация

Приведены результаты расчетов течения газа при формировании ударной волны в ударной трубе при различном способе задания начального течения газа из области высокого давления.

Ключевые слова: аэрогазодинамика, ударная труба, клапан.

1. Введение

Ударные трубы (УТ) широко используются при экспериментальном исследовании течений газа, при которых важны его высокочастотные свойства. Известно, что на начальном участке движения ударной волны в ударной трубе основным фактором, определяющим отклонения характеристик течения от предсказанных по идеальной теории [1, 2] является немгновенность раскрытия диафрагмы, отделяющей камеры высокого и низкого давлений. Раскрытие диафрагмы приводит к не одномерному течению газа, которое в дальнейшем формирует ударную волну в ударной трубе [3]. В работе [4] приведены расчетные данные, позволяющие их использовать для решения тестовых задач в измерительной секции гиперзвуковой ударной аэродинамической трубы.

Раскрытие диафрагмы в значительной степени носит случайный характер и может повреждать как внутренние стенки секций установки, так и дорогостоящие средства измерения, расположенные внутри. Для устранения подобных недостатков, связанных с использованием диафрагмы, был разработан быстродействующий пневматический клапан с электромагнитным запуском в ударной трубе [5, 6]. В [7] рассмотрены проблемы использования диафрагмы на установках типа ударных труб, где требуется обеспечение мгновенного устранения перегородки между секциями и описан принцип функционирования быстродействующего клапана.

2. Постановка задачи и методы расчета

Расчеты проведены для трех вариантов задания начального течения газа из области высокого давления:

- при раскрытии диафрагмы без учета ее фрагментов в канале УТ;
 - при открытии быстродействующего пневматического клапана без учета его движения;
 - при открытии быстродействующего пневматического клапана с учетом его движения.
- Расчетная сетка имеет одностороннюю осесимметричную структуру.

Схема модели клапана показана на рис. 1 с геометрическими размерами, приведенными в мм [5, 6]. Клапан обладает осевой симметрией.

Расчет проведен в правосторонней декартовой системе координат при $z \geq 0$, осью ОХ вдоль линии симметрии и осью ОУ, направленной вертикально вверх. При расчете с учетом движения клапана он занимает положение, показанное на рис. 1 пунктиром. При остановке клапана он занимает положение, показанное сплошной линией. При этом газ движется в канале между границей клапана и стенкой УТ.

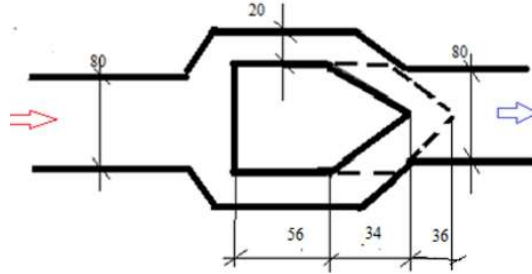


Рис. 1. Схема клапана

При проведении расчетов использовалась система уравнений Эйлера, описывающая нестационарные течения газа, записанная в декартовой прямоугольной системе координат в интегральной форме [8].

Расчеты проведены на основе модифицированной разностной схемы типа Мак-Кормака [9]. Модификация разностной схемы заключалась в последовательном применении на шаге интегрирования ее шаблона в прямом и зеркальном отображении с соответствующей переписью ее формул. Такая модификация позволяет построить более симметричный по результатам интегрирования шаблон разностной схемы.

Дополнительная монотонизация решения обеспечивалась введением оператора сглаживания [10]

$$f_i^* = f_i^* + \frac{1}{\Delta\Omega_i} (\Phi_{i+1/2} - \Phi_{i-1/2}), \quad \Phi_i = \begin{cases} \Phi_{i+1/2}, & \text{если } [\delta p_{i+1/2} \delta p_{i-1/2} \cup \delta p_{i+1/2} \delta p_{i+3/2}], \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

$$\Phi_{i+1/2} = \delta f_{i+1/2}^n \cdot \psi(\Delta\Omega_i, \Delta\Omega_{i+1}), \quad \delta f_{i+1/2} = f_{i+1} - f_i, \quad \psi(a, b) = \frac{2}{(1/\Delta\Omega_i) + (1/\Delta\Omega_{i+1})},$$

где f – значение параметра в ячейке; Ω – объем ячейки.

В качестве начальных условий задавались параметры, соответствующие одному из опубликованных экспериментов [11].

В качестве граничных условий использовались условия непротекания газа через твердую поверхность, которые реализовывалось аналогично разностной схеме С.К. Годунова [12]. На свободной границе при $z = 0$ задавалось условие отсутствия потока через границу.

Движение клапана проводилось в неподвижной системе координат в течении 0.001 с [5] с постоянной скоростью 36 м/с, задаваемой в ячейках, прилегающих к поршню, с пересчетом и переинтерполяцией их границ под поршнем, за и перед ним.

3. Результаты расчетов

Расчеты проведены для условий, взятых из [11]. В области высокого давления: плотность 36 кг/м³, давление 36 атм. В области низкого давления: плотность 0.1 кг/м³, давление 0.1 атм. На приведенных ниже рисунках при $z = 0$ принято задание: расстояния в м, времени в секундах, скорости в м/с, давление в атм, плотность в кг/м³.

Использованная в расчетах геометрия расчетной сетки строилась с помощью одноблочных структурированных гексаэдральных ячеек.

На рис. 2 в сечении $z = 0$, $x = 0$ приведены расчетные распределения давления по длине УТ при мгновенном раскрытии диафрагмы для двух моментов времени с координатами ударной волны, приведенных на рисунках. На основе этих данных в табл. 1 приведено сравнение результатов данного расчета с экспериментальными данными из [11].

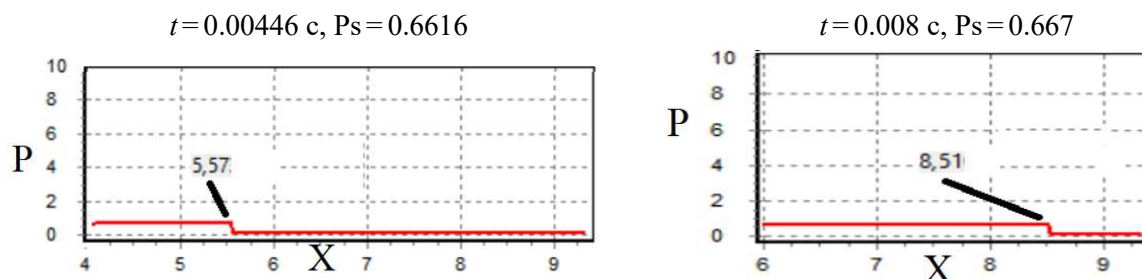


Рис. 2. Распределения давления по длине УТ при раскрытии диафрагмы

Таблица 1

Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными

	Давление, атм	Скорость газа, м/с
Эксперимент	0.65	803
Расчет	0.667	830.5

Из сравнения расчетных и экспериментальных данных видно их хорошее соответствие.

На рис. 3 показана расчетная сетка в начальный момент времени перед истечением газа через клапан в сечениях $z = 0$ и $x = 0$. Зеленым цветом показана нерасчетная область клапана. Вне клапана расчетная сетка аналогична, показанной на рис. 3. Начальные распределения плотности и давления соответствуют градации параметров рисунков.

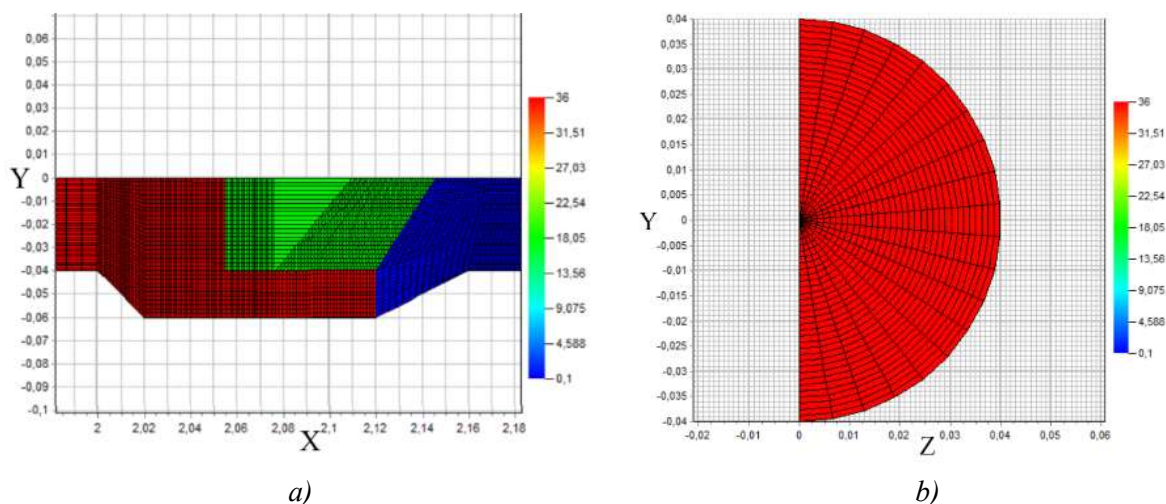


Рис. 3. Расчетная сетка около клапана в начальный момент времени. а) $Z = 0$; б) $X = 0$

На рис. 4, 5 приведены результаты расчета начала движения ударной волны для неподвижного клапана.

Как видно из рис. 4, на участке течения газа из области высокого давления клапан имеет несимметричную структуру. В результате на начальных временах возникает возмущенное течение газа. На рис. 5 показан момент времени, когда образовался фронт ударной волны, отошедший от области возмущенного течения газа.

Из рассмотрения положения ударной волны на рис. 4, 5 можно определить скорость ударной волны $V_s = 1089$ м/с. Скорость и давление во фронте ударной волны выше экспериментальных значений, приведенных в табл. 1 за счет влияния возмущений, возникших в начальные моменты времени.

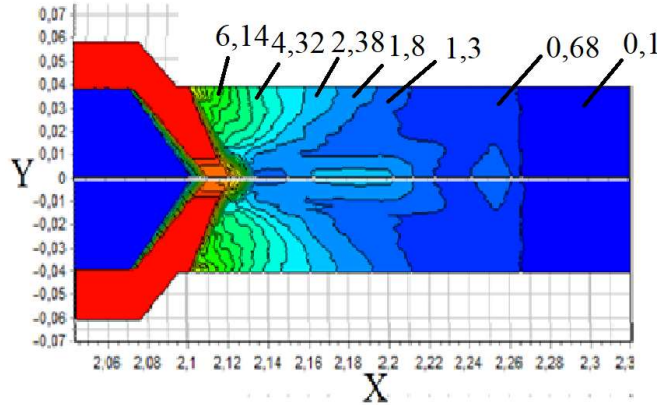


Рис. 4. Изолинии давления, $t = 0.0002$ с

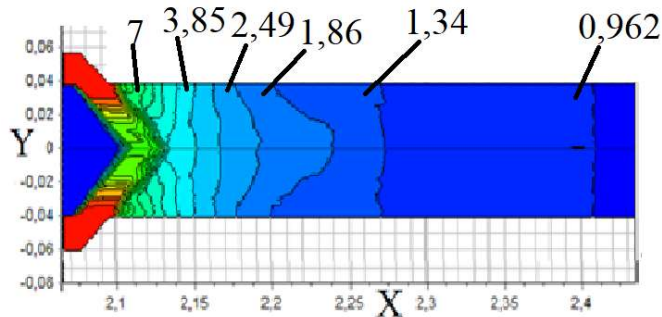


Рис. 5. Изолинии давления, $t = 0.000358$ с

На рис. 6–10 приведены результаты расчета для движущегося клапана. На рис. 6, 7 видно влияние начальных возмущений на формирование ударной волны. Скорость ударной волны 959 м/с. Как и в случае неподвижного клапана, скорость и давление во фронте ударной волны выше экспериментальных значений, приведенных в табл. 1 за счет влияния возмущений, возникших в начальные моменты времени.

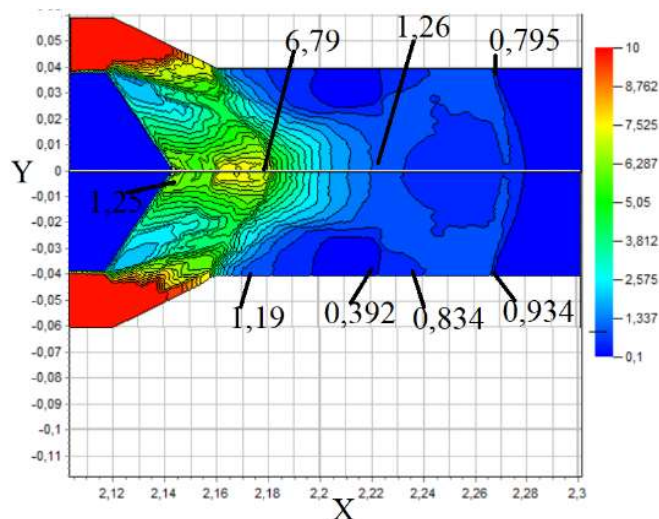


Рис. 6. Изолинии давления, $t = 0.000159$ с

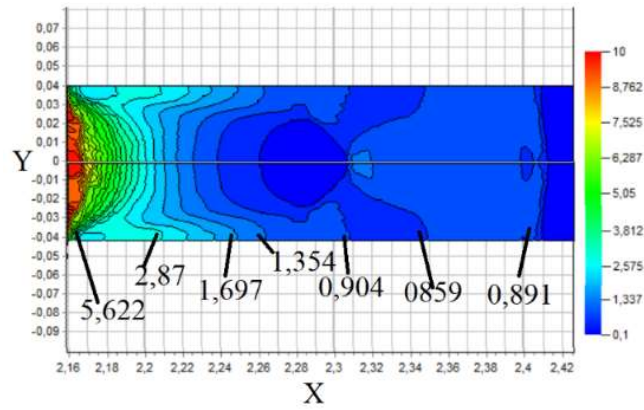


Рис. 7. Изолинии давления, $t=0.000297$ с

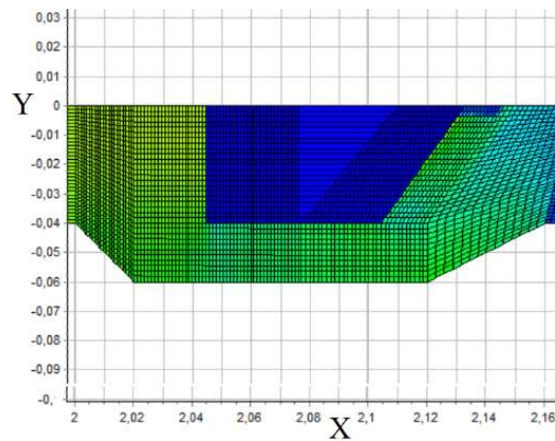


Рис. 8. Расчетная сетка около клапана в момент времени $t=0.0007317$ с

Из сравнения положения клапана на рис. 3 и 8 видно его смещение.

На рис. 9, 10 на момент времени 0.0007317 с приведено распределение давления на нижней границе расчетной сетки и показана картина давления при $z = 0$. Из сравнения этих графиков видно, что падение давления за границей клапана до $x = 2$ м вызвано волной разрежения. Последующее падение давления происходит за счет излома стенки УТ (1) с его подъемом за счет торможения потока на нижней стенке УТ на участке (2–3), с последующим его падением за счет расширения потока на участке поверхности УТ (3–4). За изломом поверхности УТ происходит подъем давления на участке (5–6) с последующее его постоянным значением за точкой (6) с выходом на распространяющуюся ударную волну.

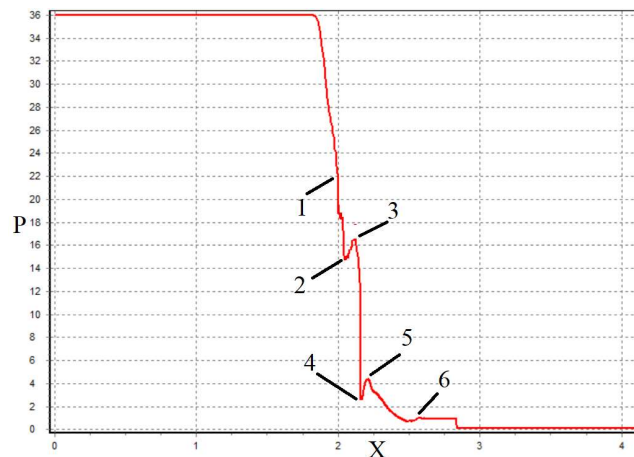


Рис. 9. Распределения давления по длине УТ на нижней границе расчетной сетки

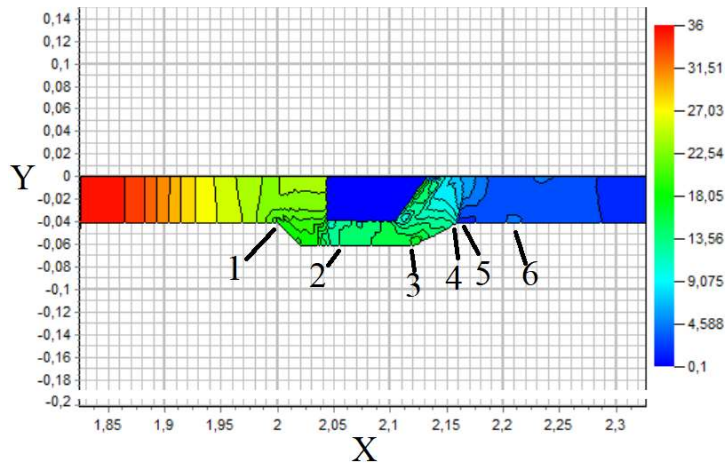


Рис. 10. Поле давления

4. Заключение

Основным отличием при запуске ударной волны в трубе при наличии клапана в отличие от использования диафрагмы является довольно продолжительное формирование однородных параметров течения за бегущей ударной волной с последующим их выходом на экспериментальные значения.

Расчеты выполнены с использованием средств государственного бюджета (№ АААА-А20-120011690135-5) на суперкомпьютере МСЦ РАН.

Литература

1. Гласс И. Паттерсон Г.Н. Теоретические и экспериментальные исследования потока в ударной трубе. В сб.: «Ударные трубы» под ред. Х.А. Рахматулина и С.С. Семенова. Изд-во иностр. лит., М., 1962, С. 138–189.
2. Баженова Т.В., Гвоздева Л.Г. Нестационарные взаимодействия ударных волн. М: Наука, 1977. 274 с.
3. Дунцова Ж.С., Ершов И.В., Киреев В.Т., Рузавин Е.И. Расчет движения ударной волны и параметров потока при немгновенном открытии диафрагмы в ударной трубе//Изв. АН СССР, МЖГ, 1969, № 2, С. 120–128.
4. Суржиков С.Т. Расчетные исходные данные для решения тестовых задач в измерительной секции гиперзвуковой ударной аэродинамической трубы ГУАТ лаборатории РадГД ИПМех РАН//Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2021. Т. 22, вып. 1. <http://chemphys.edu.ru/issues/2021-22-1/articles/931/>
5. Исаков С.Н., Исаков И.Н., Юркин С.В. Патент РФ №2066656 «Пусковая установка».
6. Носова Е.В., Пискунов В.А., Носов В.В. Расчет на прочность запорного колпака быстродействующего пневматического клапана//материалы III Международной научно-практической конференции «Современное машиностроение: Наука и образование», июнь 2013 г.
7. Котов М.А. О некоторых особенностях использования быстродействующего конического клапана//Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2019. Т. 20, вып. 3. <http://chemphys.edu.ru/issues/2019-20-3/articles/802/>
8. Андерсон Д., Тоннехилл Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. М.: Мир, Т. 1, 2, 1990.
9. Mac-Cormack R.W. The effect of viscosity in hypervelocity impact cratering // 4th Aerodynamic Testing Conference, AIAA Paper 1969-354, April 1969. <https://doi.org/10.2514/6.1969-354>
10. Жмакин А.И., Фурсенко А.А. Об одной монотонной разностной схеме сквозного счета // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1980. Т. 20. № 4. С. 1021–1031.

11. Котов М.А., Рулева Л.Б., Козлов П.В., Суржииков С.Т. Предварительные экспериментальные исследования обтекания моделей в гиперзвуковой ударной аэродинамической трубе // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2013. Т.14, вып. 2. <http://chemphys.edu.ru/issues/2013-14-2/articles/394/>
12. Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я., Крайко А.Н., Прокопов Г.П. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. 400 с.

References

1. Glass, I., Patterson, G. N., *Teoreticheskoe i jeksperimental'noe issledovanie potokov v udarnoj trube* (A Theoretical and Experimental Study of Shock Tube Flows), V sb.: «Udarnye trubyy» pod red. H. A. Rahmatulina i S. S. Semenova. Izd-vo inostr. lit., M., 1962, pp. 138–189.
2. Bazhenova, T. V., Gvozdeva, L. G., *Nestacionarnye vzaimodejstvija udarnyh voln* (Unsteady shockwave interactions), M: Nauka, 1977, 274 p.
3. Duncova, Zh. S., Ersho, I. V., Kireev, V. T., Ruzavin, E. I., “Raschet dvizhenija udarnoj volny i parametrov potoka pri nemgnovennom otkrytii diafragmy v udarnoj trube,” *Izv. AN SSSR, MZhG*, No. 2, 1969, pp. 120–128.
4. Surzhikov, S. T., @Calculated initial data for solving test problems in the measuring section of the hypersonic shock wind tunnel (HSWT) of the RadGDLaboratory of IPMech RAS,” *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, Vol. 22, No. 1, 2021. <http://chemphys.edu.ru/issues/2021-22-1/articles/931/>
5. Isakov, S. N., Isakov, I. N., Jurkin, S. V., Patent RF No. 2066656 «Puskovaja ustanovka».
6. Nosova, E. V., Piskunov, V. A., Nosov, V. V., “Raschet na prochnost' zapornogo kolpaka bystrodejstvujushhego pnevmaticheskogo klapana,” *Materialy III Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Sovremennoe mashinostroenie: Nauka i obrazovanie»*, June, 2013.
7. Kotov, M. A., “On some features of the use of high-speed conical valve for the incident shock wave formation in shock tubes,” *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, Vol. 20, No. 3, 2019. <http://chemphys.edu.ru/issues/2019-20-3/articles/802/>
8. Anderson, D. A., Tannehill, J. C., Pletcher, R. H., *Vychislitel'naja gidromehanika i teploobmen* (Computational fluid mechanics and heat transfer), M.: Mir, Vol. 1, 2, 1990.
9. Mac-Cormak, R. W., “The effect of viscosity in hypervelocity impact cratering,” *4th Aerodynamic Testing Conference*, AIAA Paper 1969-354, April 1969. <https://doi.org/10.2514/6.1969-354>
10. Zhmakin, A. I., Fursenko, A. A., “Ob odnoj monotonnoj raznostnoj sheme skvoznogo scheta,” *Zh. vychisl. matem. i matem. fiz.*, Vol. 20, No. 4, 1980, pp. 1021–1031.
11. Kotov, M. A., Ruleva, L. B., Kozlov, P. V., Surzhikov, S. T., “Early experimental results of streamlines for flying objects models in hypersonic shock aerodynamic tube,” *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, Vol. 14, No. 2, 2013. <http://chemphys.edu.ru/issues/2013-14-2/articles/394/>
12. Godunov, S. K., Zabrodin, A. V., Ivanov, M. Ja., Krajko, A. N., Prokopov, G. P., *Chislennoe reshenie mnogomernyh zadach gazovoj dinamiki* (Numerical solution of multidimensional gas dynamics problems), M.: Nauka, 1976, 400 p.

Статья поступила в редакцию 2 марта 2022 г.