

Experimental Studies of Shock Wave Formation in a Diaphragmless Shock Tube

L. B. Ruleva, S. I. Solodovnikov

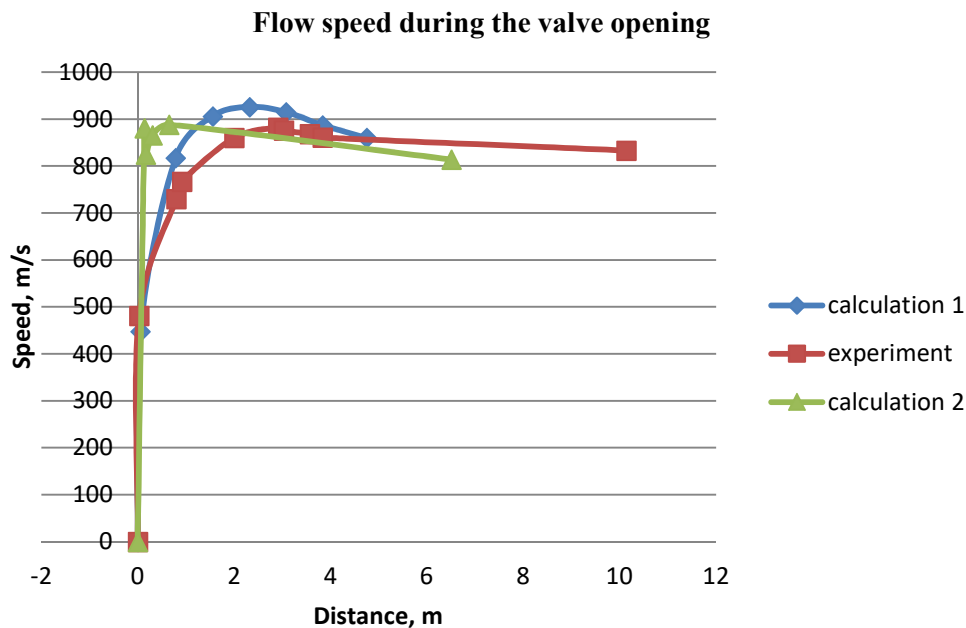
*Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS,
Moscow, 119526, Russia*

ruleva@ipmnet.ru

Abstract

Shockwave processes in a shock tube containing a high-speed low-inertia electromagnetic pneumatic valve have been experimentally investigated. Graphs of pressure sensor signals in the shock tube channel are given. The dependence of the valve opening time on the pressure in the blocks of high and low gas density is shown. A physical simulation of the valve operation at the initial moments of its opening with the formation of a shock wave is carried out.

Keywords: shock wave, electromagnetic valve, experiment.



Comparison of mathematical and physical modeling during valve opening

УДК 533.6.071.3

Экспериментальные исследования формирования ударной волны в бездиафрагменной ударной трубе

Л. Б. Рулева, С. И. Солодовников

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,
Россия, Москва, 119526, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1*

ruleva@ipmnet.ru

Аннотация

Экспериментально исследованы ударно-волновые процессы в ударной трубе, содержащей быстродействующий малоинерционный электромагнитный пневматический клапан. Приведены графики сигналов датчиков давления в канале ударной трубы. Показана зависимость времени раскрытия клапана от давлений в камерах высокой и низкой плотности газа. Поведено физическое моделирование работы клапана в начальные моменты его вскрытия с образованием ударной волны.

Ключевые слова: ударная волна, электромагнитный клапан, эксперимент.

1. Введение

Ударные трубы используются как для изучения физико-химической кинетики сильных ударных волн, так и в составе аэродинамических установок для образования пробки высоко-температурного газа высокого давления на входе в сопло. Газодинамические параметры потоков за соплом зависят от давлений и скоростей ударной волны в ударной трубе, формирование которой при использовании быстродействующего электромагнитного пневматического клапана [1, 2] экспериментально исследовалось в данной работе.

Применение в ударных трубах быстродействующего электромагнитного пневматического клапана [1–5] позволило отказаться от разрушаемых диафрагм между камерами с высокой и низкой плотностями газа. Преимущество такого решения заключается в простоте обслуживания экспериментального оборудования, без изготовления и установки металлических диафрагм, отсутствия осколков диафрагм, разрушающих датчики давления, встроенных в стенку ударной трубы. Повторяемость параметров лучше, чем у обычной ударной трубы диафрагменного типа, поэтому бездиафрагменные ударные трубы используются, например, в [5] в качестве основного измерительного стандарта для динамической калибровки давления.

Клапан хорошо держит высокое давление и вскрывается по желанию экспериментатора посылком электрического сигнала на электромагнит клапана. Требование к быстродействию срабатывания клапана является одним из основных и определяется скоростью протекающих процессов. Время раскрытия клапана, отвечающего вышеперечисленным требованиям, измеряется единицами миллисекунд и производится российской фирмой ООО «НПП «ИСТА» [1, 2]. Одна из моделей клапана, КБ80–50, используется в ударной трубе, входящей в состав лабораторной установки «Гиперзвуковая ударная аэродинамическая труба» (ГУАТ).

Конструкция электромагнитного клапана в работе [4] отличается от используемой в ГУАТ. В ней представлен перекрывающий каналы подпружиненный поршень, который, в начальный момент, заполнялся переменным давлением P_p и закрывал выход канала высокого давления. При срабатывании растягивающего пружины поршня воздуха происходило

сжатие пружин, перемещение поршня и истечение испытательного потока. Исследование [4] показало отсутствие корреляции между давлением внутри пневматического поршня (P_p) и числом Маха при срабатывании клапана, слабую зависимость соотношений давлений ($P_4/P_1 = 60 \div 150$) и начального давления в поршне P_p , а также большей скорости срабатывания при большем давлении P_p . Время срабатывания данного клапана составляло около 90 мс.

В работе [3] показан принцип работы быстродействующего, с инерцией не более 7 мс, клапана [1, 2], его гарантированные прочностные характеристики для установок сильных ударных волн.

Появление бездиафрагменных ударных труб требует теоретического, численного и экспериментального обоснования их работы. Начальное течение в ударной трубе при срабатывании клапана отличается от мгновенного классического произвольного разрыва [6–8], при котором раскрытие происходит на полный диаметр трубы.

Математическое моделирование работы клапана в начальные моменты его вскрытия и образование ударной волны изложены в работе [9]. Описаны возникновения возмущений начального потока и его ускоренное начальное движение. Скорость ударной волны в работе рассчитывалась на невозмущенном участке.

Экспериментальные исследования в ГУАТ посвящены физическому моделированию образования начального скоростного течения при вскрытии клапана КБ80–50.

2. Экспериментальная установка

Экспериментальные исследования в ударной трубе ГУАТ базируются на математическом моделировании ее работы [10]. Среди возможных реализуемых режимов выделена область тестовых задач. Один из которых, $(P_4/P_1) = 36/0.1$, был в экспериментах дополнен не тестовым режимом: $(P_4/P_1) = 2/1$ для сравнения времени реакции датчиков давления.

Регистрация давлений ударной волны осуществлялась высокочастотными сертифицированными датчиками давления серии РСВ 113В24 (диаметр 5 мм, частота 500 кГц), блоками аналого-цифровых преобразователей (АЦП), 14 бит/10 МГц, модели L-CARD E20–10, а регистрация, визуализация и обработка аналоговых сигналов программами PowerGraph.

Ударная труба ГУАТ не содержит встроенных внутри канала датчиков давления рядом с клапаном. Поэтому, для отсечки времени прохода ударной волны на близких к клапану дистанциях, на внешней поверхности трубы был установлен акустический цилиндрический датчик ПЭУ 14 (диаметр – 14 мм, частота – 100 кГц). Амплитуда давлений таким датчиком не измерялась. Одновременность реакций датчиков давлений встроенного внутри в стенку трубы и закрепленного снаружи была проверена размещением их в одной плоскости сечения канала ударной трубы. Например, на расстоянии 40 калибров, когда фронт ударной волны сформировался и может быть зарегистрирован внутренним и наружным датчиками.

Схема экспериментальной установки ГУАТ, ударная труба которой, диаметром внутреннего канала 0.08 м, оснащена электромагнитным пневматическим клапаном [1, 2] КБ80–50, приведена на рис. 1.

Здесь цифрами 1–5 обозначены места внедрения в стенку ударной трубы датчиков давления РСВ 113В24. На рис. 1. ударная труба отсоединена от аэродинамического блока заглушкой, в которую встроен датчик давления № 5.

Фото ГУАТ показано на рис. 2 с ракурса торца камеры высокого давления, в котором расположен датчик давления № 1.

Камера высокого давления наполняется газом из баллона. Встроенный клапан КБ80–50 ограничивает возможность экспериментально реализуемого режима перепада давлений между камерами высокого и низкого давлений в диапазоне: $(P_4/P_1) = 5 \times (1 \div 10^4)$ отн. ед. Работу клапана КБ80–50 можно приближенно представить схемой на рис. 3 из работы [3].

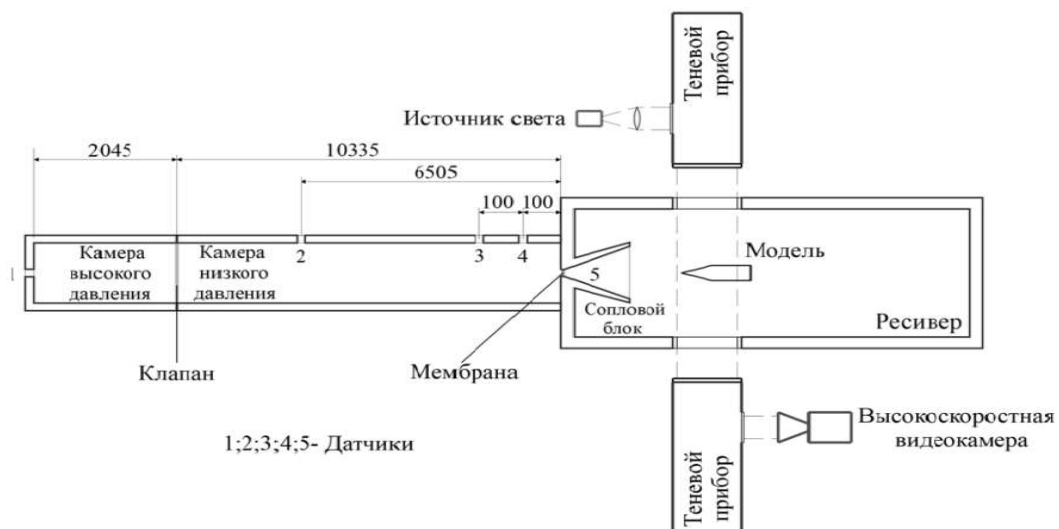


Рис. 1. Схема ГУАТ

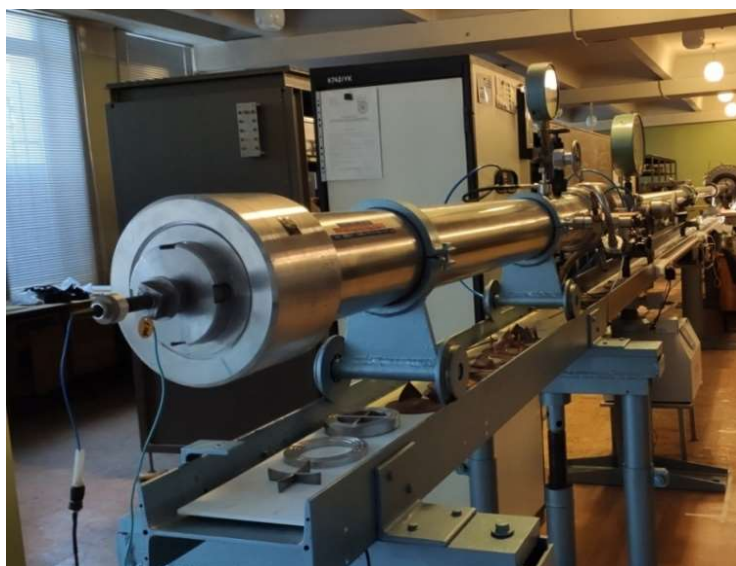


Рис. 2. Фото ГУАТ

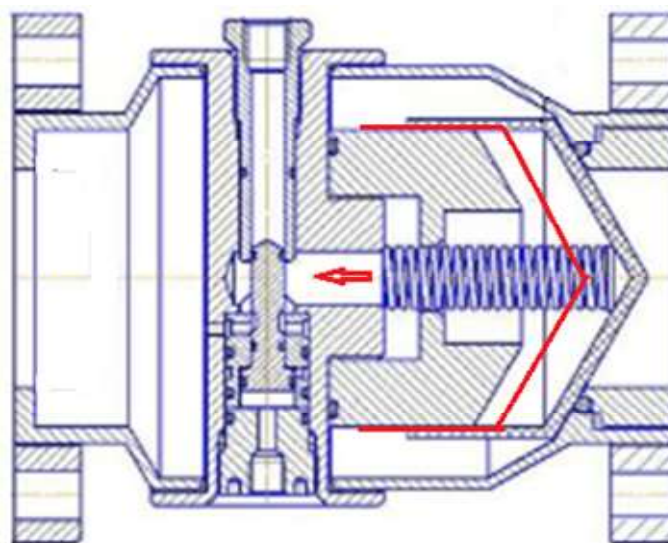


Рис. 3. Схема клапана

Положение втянутого колпака клапана на рис. 3 показывает проток при открытии клапана. Истечение газа из камеры высокого давления в клапане происходит не по диаметру 80 мм, а по кольцу, шириной 25 мм, примыкающего к стенке трубы. Возможно, ширина кольца различная для разных клапанов. Приведенные размеры клапана характерны для клапана ГУАТ. Линии тока истекающего потока сначала направлены по кольцу, затем по центральному телу – образующей конуса. Плавный переход истечений от щелевого кольцевого к полному диаметру трубы дает расширение и ускорение потока аналогично диффузорному. Это подтверждено математическим моделированием процессов истечений через клапан в работе [9].

4. Результаты экспериментов

Отражением процесса раскрытия клапана являются графики датчика давления № 1 в торце камеры высокого давления, а также датчика № 2, размещенного на расстоянии 40 калибров от клапана, приведенные на рис. 4.

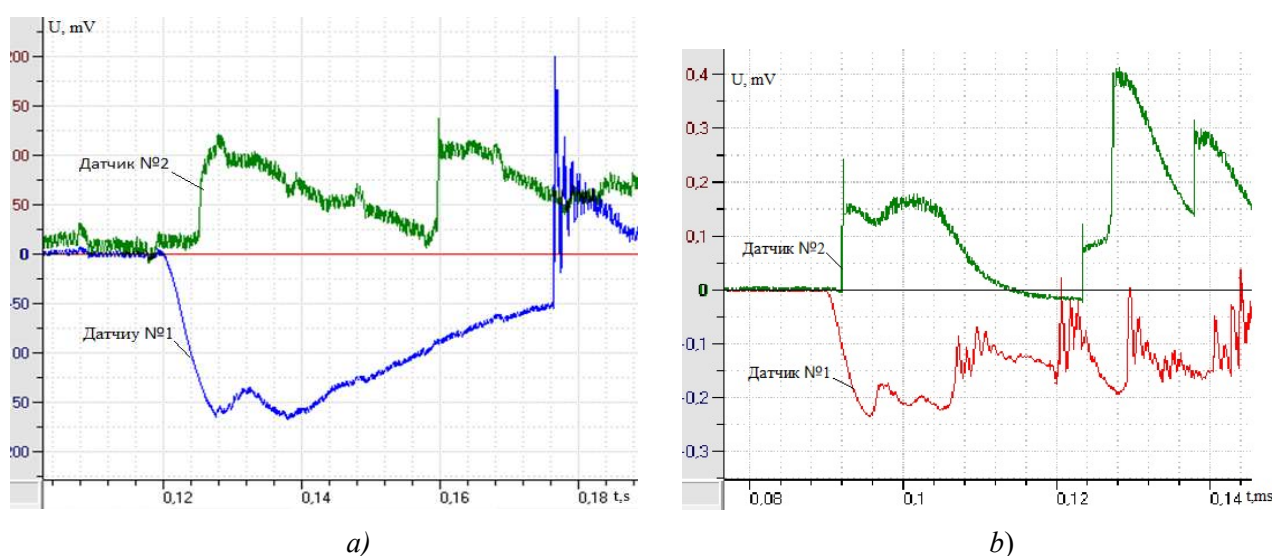


Рис. 4. Графики датчиков давлений № 1 и № 2:
 а) $P_4 = 2 \times 10^5$ Па, $P_1 = 10^5$ Па; б) $P_4 = 3 \times 10^6$ Па, $P_1 = 10^5$ Па

Моменты раскрытия клапана на датчике № 1 показаны для малых соотношений P_4/P_1 (рис. 4, а). Наклонный фронт от наполненной до опустошенной камеры высокого давления в течение 7 мс, соответствует паспортным данным клапана. Далее плоский участок в течение 12.5 мс соответствует вееру разрежения, а подъем давления в течение 38 мс заканчивается всплеском давления, превышающим начальное, что обусловлено влиянием отраженной от торца канала низкого давления нагретой пробкой ударной волны (график датчика № 2 рис. 4, а). При повышении соотношении P_4/P_1 (рис. 4, б) давление возвратной ударной волны больше в 2.7 раз, а время короче на 5 мс, чем на рис. 4, а. Этот режим вызывал вибрацию подвижного элемента клапана ГУАТ.

На рис. 5. приведены скорости ударной волны (УВ) в ударной трубе (УТ) между датчиками № 2–№ 3 (цифра 0), № 3–№ 4 (цифра 1), № 4–№ 5 (цифра 2), при разных соотношениях P_4/P_1 . Скорость УВ в конце канала УТ замедляется, что свидетельствует о наличии пограничного слоя, в соответствии с теорией [6–8].

В табл. 1 показано, что при увеличении P_4/P_1 увеличивается скорость ударной волны, время переднего фронта сигнала датчика № 1 уменьшается, время реакции между датчиками № 1 и № 2 сокращается.

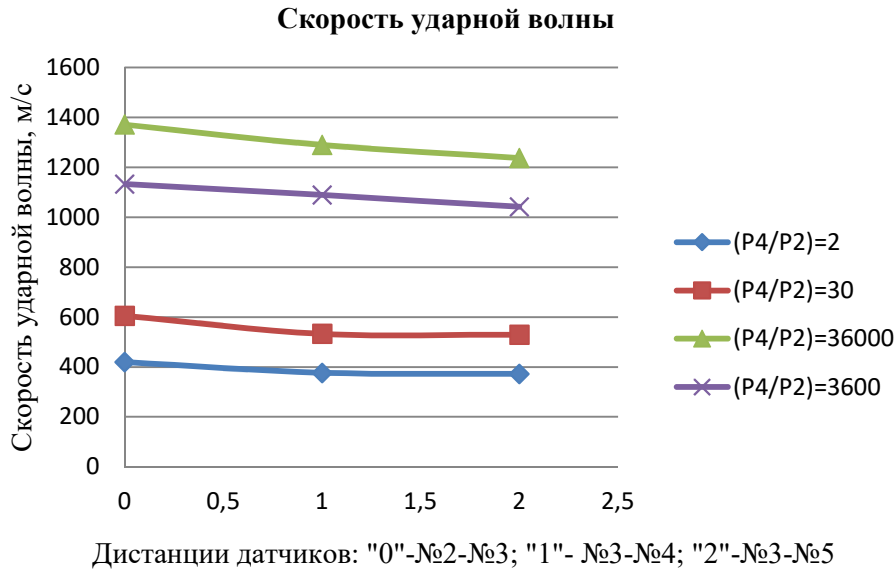


Рис. 5. Скорость ударной волны в ударной трубе

Таблица 1

Сигналы датчиков в заданных режимах

P_4/P_1 , отн. ед	Фронт датчика № 1, мс	Время. Датчики № 1–№ 2, мс	Скорость УВ. Датчики № 2–№ 5, мс
2	7.00	5.72	400
30	5.50	2.6	596
3600	5.20	-1.2	1111
36000	5.04	-1.72	1400

Отрицательные цифры в последних строках свидетельствуют о том, что, при больших перепадах давлений $P_4/P_1 = 36000$, скорость УВ на расстоянии 3 м от клапана опережает волну разрежения на расстоянии 1.9 м от клапана на 1.72 мс, при $P_4/P_1 = 3600$, опережает на 1.2 мс, как показано на рис. 6.



Рис. 6. Графики датчиков давлений № 1 и № 2 при $P_4 = 3.6 \times 10^6$ Па, $P_1 = 10^2$ Па

Открытие клапана осуществляется подачей импульса на электромагнит, в результате действия которого срабатывает растягивающий пружины воздух. На рис. 6 приведен пример эксперимента, в котором открытие клапана осуществлялось вручную, путем нажатия кнопки запуска, поэтому за время 97.6 мс клапан находился в открытом состоянии. За это время ударная волна несколько раз отразилась от торцов УТ. Дополнительная информация, которую можно получить из рис. 6, свидетельствует о высокой частоте регистрации процессов: 2.5 МГц и шаге 0.4 мкс.

Для экспериментального определения времени срабатывания клапана на наружной поверхности клапана был установлен акустический датчик, как показано на рис. 7 (место крепление – синяя изолента).

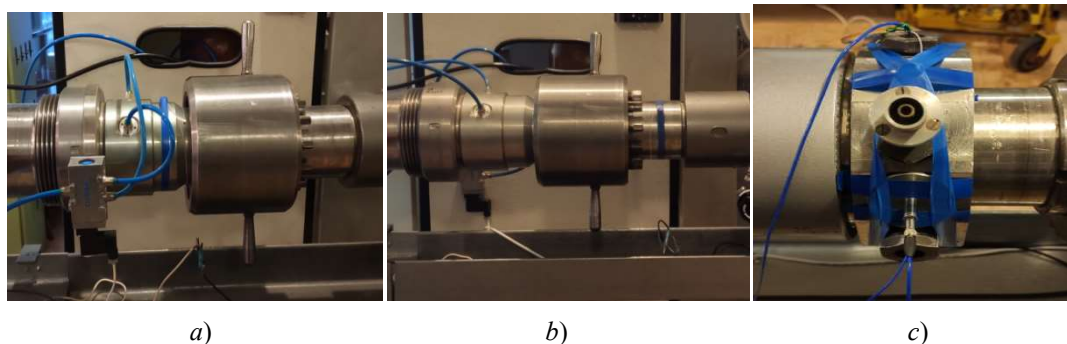


Рис. 7. Акустический датчик закреплен на внешней поверхности клапана

На переднем плане изображен электромагнит, жестко связанный с УТ. Поэтому первая реакция акустического датчика с большой амплитудой оказалась отражением работы электромагнита, а не клапана. Вторичная реакция связана с процессом открытия клапана. Задержка времени за счет электромагнита составила 50 мс, что соответствует паспортным данным клапана. Поэтому крепление электромагнита было удалено от установки ГУАТ, а интенсивность влияния электромагнита была снижена.

При закреплении акустического датчика в одной плоскости с датчиком № 2, на расстоянии 3830 мм от клапана, передние фронты их сигналом показали согласие (рис. 8) в режиме $(P_4/P_1) = 36/0.1$ атм, поэтому в дальнейшем использовали его для определения времени прохождения ударной волны в УТ.

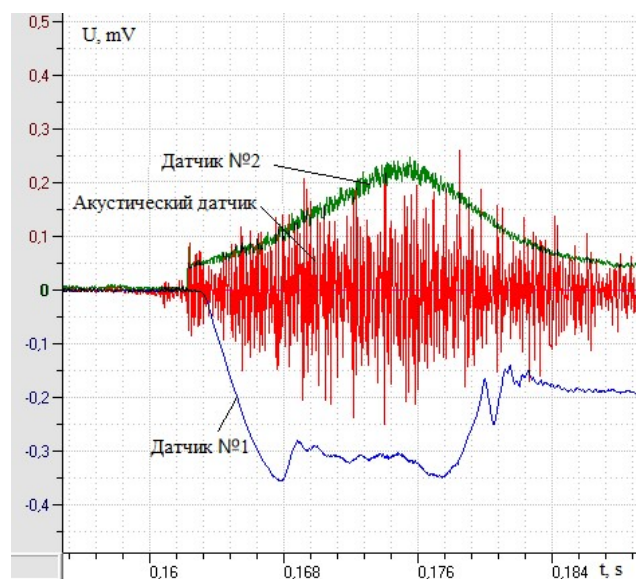


Рис. 8. Сигналы датчика № 2 и акустического датчика в одной плоскости ударной трубы

Результаты измерения начального момента формирования ударной волны приведены в табл. 2.

Таблица 2

Время прохождения потока на дистанциях от клапана при $P_4/P_1 = 360$

Дистанция, мм	-1070.00	0	260.00	800.00	920.00	3830.00
Время, мс	2.98	0	0.54	1.24	1.40	4.70

Здесь «0» – начало истечения из клапана. Знак минус указывает на дистанции от клапана в сторону камеры высокого давления.

График сравнения скорости ударной волны на расстояниях, от открывающегося клапана экспериментально полученных на ГУАТ и при расчетах [9, 11] показан на рис. 8.

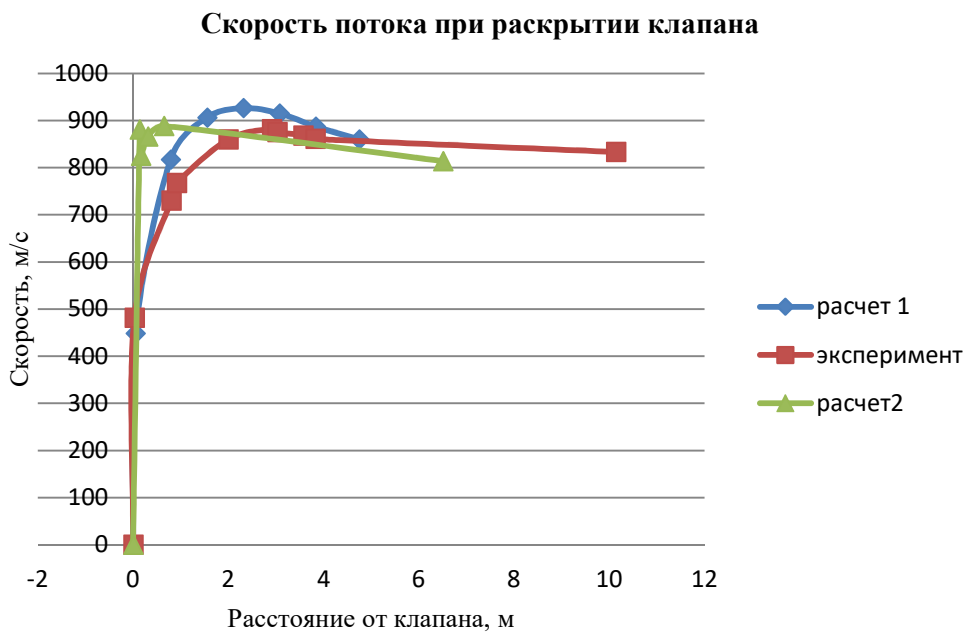


Рис. 8. Сравнение математического и физического моделирования при раскрытии клапана

Графики рис. 8 «расчет 1» и «расчет 2» соответствуют постоянной и дискретной формам раскрытия клапана [9, 11], соответственно. Установившееся течение газа со сформировавшимся фронтом ударной волны наблюдается в месте установки датчика № 2 ГУАТ около 4 м от клапана. Здесь наблюдается наибольшее согласие всех форм моделирования процессов.

4. Заключение

Экспериментально исследованы временные характеристики образования ударной волны на начальных моментах раскрытия клапана. Показано, что конструкция клапана способствует ускоренной начальной эвакуации газа из области с высокой плотности в область с низкой плотностью газа. Скорость течения достигает максимумов на расстоянии около 3 м от клапана и составляет около 900 м/с при режиме $P_4/P_1 = 360$. Быстродействие клапана меньше паспортного при больших перепадах давлений, а, значит, и более высоких скоростях ударной волны.

Благодарности и ссылки на гранты

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 22-11-00062.

Литература

1. Исаков С.Н., Исаков И.Н., Юркин С.В. Патент РФ № 2066656 «Пусковая установка».
2. Патент US 2013/0215927 Device for measuring a heat flux. Aug. 22, 2013.
3. Носова Е.В., Пискунов В.А., Носов В.В. Расчет на прочность запорного колпака быстродействующего пневматического клапана//Современное машиностроение. Наука и образование. 2013. № 3.
4. Nishiyama M., Taguchi M. and Kashitani M. Fundamental Study on Operational Parameters of Diaphragmless Shock Tube//MATEC Web of Conferences 151, 02004 (2018) *ACMAE* 2017. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201815102004>.
5. Amer E., Wozniak M., Jönsson G. and Arrhén F. Evaluation of Shock Tube Retrofitted with Fast-Opening Valve for Dynamic Pressure Calibration//*Sensors* 2021, 21, 4470. <https://doi.org/10.3390/s21134470> <https://www.mdpi.com/journal/sensors/>
6. Райзер Ю.П. Введение в гидрогазодинамику и теорию ударных волн для физиков. Долгопрудный: Интеллект, 2011. 432 с. ISBN 978-5-91559-084-6
7. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. — 3-е изд., исправл. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. — 656 с. — ISBN 978-5-9221-0938-3.
8. Баженова Т.В., Гвоздева Л.Г. Нестационарные взаимодействия ударных волн. М: Наука. 1977. 274 с.
9. Панасенко А. В. Расчет формирования ударной волны в ударной трубе при различном способе начального истечения газа//Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2022. Т. 23, вып. 1. <http://chemphys.edu.ru/issues/2022-23-1/articles/981/>. <http://doi.org/10.33257/PhChGD.23.1.981>
10. Суржигов С.Т. Расчетные исходные данные для решения тестовых задач в рабочей зоне 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/930/>. <http://doi.org/10.33257/PhChGD.22.1.930>
11. Panasenko A.V. et al. Increasing hypersonic aerodynamic shock tube working time duration 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 927 012082.

Reference

1. Isakov, S. N., Isakov, I. N., Yurkin, S. V. RF Patent No. 2066656 "Launcher".
2. Patent US 2013/0215927 Device for measuring a heat flow. August 22, 2013.
3. Nosova, E. V., Piskunov, V. A., Nosov, V. V., "Raschet na prochnost' zapornogo kolpaka bystrodeystvujushhego pnevmaticheskogo klapana," *Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie*, No. 3, 2013.
4. Nishiyama, M., Taguchi, M., and Kashitani, M., "Fundamental Study on Operational Parameters of Diaphragmless Shock Tube," MATEC Web of Conferences Vol. 151, 02004, (2018) *ACMAE*, 2017. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201815102004>
5. Amer, E., Wozniak, M., Jönsson, G., and Arrhén, F., "Evaluation of Shock Tube Retrofitted with Fast-Opening Valve for Dynamic Pressure Calibration," *Sensors*, Vol. 21, No. 13, 4470, 2021. <https://doi.org/10.3390/s21134470> <https://www.mdpi.com/journal/sensors/>
6. Raiser, Yu. P., *Vvedenie v gidrogazodinamiku i teoriju udarnyh voln dlja fizikov* (Introduction to fluid dynamics and shock wave theory for physicists) Dolgoprudnyj: Intellekt, 2011, 432 p. ISBN 978-5-91559-084-6

7. Zeldovich, Ya. B., Raiser, Yu. P., *Fizika udarnyh voln i vysokotemperaturnyh gidrodinamicheskikh javlenij* (Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena), 3rd ed., corrected. M.: FIZMATLIT, 2008, 656 p. ISBN 978-5-9221-0938-3
8. Bazhenova, T. V., Gvozdeva, L. G., *Nestacionarnye vzaimodejstviya udarnyh voln* (Unsteady interactions of shock waves), M: Nauka, 1977, 274 p.
9. Panasenko, A. V., “Calculation of shock wave formation in a shock tube with a different method of initial gas outflow,” *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, Vol. 23, No. 1, 2022. <http://chemphys.edu.ru/issues/2022-23-1/articles/981/>. <http://doi.org/10.33257/PhChGD.23.1.981>
10. Surzhikov, S. T., “Calculated initial data for solving test problems in the working area of the hypersonic shock wind tunnel HAST of the RadGD Laboratory of the IPMech RAS,” *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, Vol. 22, No. 1. 2021. <http://chemphys.edu.ru/issues/2021-22-1/articles/930/>. <http://doi.org/10.33257/PhChGD.22.1.930>
11. Panasenko, A. V., et al., “Increasing hypersonic aerodynamic shock tube working time duration,” *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, Vol. 927 012082, 2020.

Статья поступила в редакцию 3 августа 2022 г.