

DOI: 10.18721/JPM.12413
УДК 532.529:532.59:534.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ СО СЛОЕМ ПРОНИЦАЕМОГО МАТЕРИАЛА

С.В. Булович¹, А.В. Масюкевич²

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация;

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург,
Российская Федерация

В работе экспериментально исследовано взаимодействие ударной волны с гранулированным слоем сферических частиц в атмосферной ударной трубе. Между пористым слоем и торцевой стенкой трубы располагалась приторцевая область чистого газа. Были рассмотрены две постановки задачи. В первом варианте структура и положение пористого слоя предполагались неизменными. Во втором – гранулированный слой разрушался под действием падающей ударной волны и превращался в подвижное облако частиц. Для обоих вариантов получены и проанализированы волновые структуры, которые возникают как перед пористым слоем гранулированных частиц, так и в приторцевой области между гранулированным слоем и торцевой стенкой ударной трубы. Исходная информация была получена при помощи измерительно-регистрирующей аппаратуры, которая включала пьезоэлектрические датчики давления и многоканальную плату АЦП для сбора информации.

Ключевые слова: ударная волна, проницаемый слой материала, нестационарная фильтрация газа, волновая структура

Ссылка при цитировании: Булович С.В., Масюкевич А.В. Экспериментальное исследование взаимодействия ударной волны со слоем проницаемого материала // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2019. Т. 12. № 4. С. 135–144. DOI: 10.18721/JPM.12413

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

THE INTERACTION OF A SHOCK WAVE WITH A PERMEABLE LAYER: AN EXPERIMENTAL STUDY

S.V. Bulovich¹, A.V. Masiukevich²

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation;

²The Ioffe Institute of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation

In the paper, the interaction of a shock wave with a granular layer of spherical particles has been experimentally studied in an atmospheric shock tube. A near-edge space of pure gas was located between the porous layer and the tube's end wall. Two problem statements were considered. In the first embodiment, the structure and position of the porous layer remained unchanged. In the second one, the granular layer was destroyed under the action of the incident shock wave and turned into a mobile cloud of particles. For both variants, wave structures

that occurred both in front of the porous layer of granular particles and in the gap between the granular layer and the end wall of the shock tube were derived and analyzed. The initial information was obtained by measuring and recording equipment, which included piezoelectric pressure sensors and a multichannel ADC board for data collection.

Keywords: shock wave, permeable material layer, nonstationary gas filtration, wave structure

Citation: Bulovich S.V., Masiukevich A.V., The interaction of a shock wave with a permeable layer: an experimental study, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 12 (4) (2019) 135–144. DOI: 10.18721/JPM.12413

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение

При рассмотрении нестационарных процессов в виде ударных волн или импульсных струй одним из важных прикладных аспектов является определение аэродинамических нагрузок на поверхность. Сложность задачи возрастает многократно при допущении о газопроницаемости преграды. Последняя может представлять собой перфорированные элементы, решетки, пакеты из плетеных сеток, губчатые структуры, слои гранулированных сред и т. п. При распространении волн через подобные преграды, как правило, уменьшается их амплитуда и происходит трансформация волновых профилей. При интенсивных воздействиях преграда может испытывать деформации, в том числе и необратимые. Интерес исследователей к каркасным преградам, допускающим значительные деформации, обусловлен тем, что при определенных обстоятельствах усиливается эффект динамического воздействия на преграду [1, 2]. Не менее важен и предельный случай, когда, например, при использовании сыпучих сред происходит разрушение конструкции пористого слоя и возникает двухфазное течение [3, 4].

Для такого типа задач важна первичная информация, получаемая в ходе экспериментальных исследований. Она позволяет охарактеризовать основной круг явлений и обнаружить важные закономерности. На основе экспериментальных данных возможно уточнение существующих и построение новых математических моделей, обладающих различной полнотой описания процессов.

Многофакторное изучение нестационарной фильтрации началось в 50-е годы XX века и достаточно полно систематизировано, например в монографии [5]. Для разрушаемых каркасов узловые вопросы механики гетерогенных сред представлены в трудах [6, 7]. Обратим внимание на

экспериментальные работы, пополняющие банк данных по гранулированным течениям. В частности, обобщение экспериментальных исследований в работах [8, 9] привело к модификации модели, основанной на силе Стокса. Адекватный учет влияния сжимаемости среды и общего нестационарного характера протекания рассматриваемого явления выполнено в работе [10].

Репрезентативными признаны работы [3, 4], в которых проведено исследование в широком диапазоне изменения геометрических факторов и режимных параметров течения. Работы [11, 12] послужили основой для создания законов, описывающих прохождение ударных волн через слои из «густой смеси» и учитывающих тот или иной механизм столкновения частиц [13 – 15]. В дополнение к изложенному, обратим внимание на работы [16, 17], где при помощи датчиков, расположенных непосредственно в пористом слое, изучалось изменение давления как отдельно газа, так и давление в смеси газ – частицы. Показано, что амплитуда давления проходящей волны зависит от ряда параметров, передающих различные свойства пористого слоя: протяженность (глубина), диаметр и форма элементов, теплофизические характеристики материала (плотность, теплоемкость и т. п.), возможность уплотнения и переупорядочивания элементов структуры.

Фокус современных исследований в этой сфере смещен в область численного моделирования [18, 19]. Его развитие ведется в двух направлениях. С одной стороны, уточняется полнота описания и детализация рассматриваемых процессов, с другой – создаются новые и совершенствуются существующие алгоритмы численного интегрирования дифференциальных уравнений для рассматриваемого круга задач.

Из краткого анализа литературы по за-



тронутой тематике можно сделать вывод об отсутствии работ по прямому сравнению режимов течения для удерживаемого и разрушаемого пористых слоев в идентичных условиях. Отсутствуют работы по исследованию влияния расположения пористых слоев (удерживаемого и разрушаемого) относительно непроницаемой поверхности на мгновенные и интегральные характеристики ослабления динамического воздействия на нее.

Предметом настоящего исследования является взаимодействие ударной волны со слоем сыпучего (гранулированного) материала в двух постановках задачи.

В первом варианте слой остается неподвижным и сохраняется каркасная структура пористого слоя; во втором варианте, при разрушении структуры пористого слоя, происходит формирование подвижного облака частиц. В последнем (втором) случае определенную роль играет размер области, свободной от гранул между пористым слоем и непроницаемой стенкой; ее величина может оказывать разнонаправленное влияние на интегральные характеристики [1]. При этом важным фактором становится импульс, сообщаемый облаку частиц, и последующее ударно-волновое взаимодействие этого облака с «газовой подушкой», которая существует в виде области с чистым газом.

Экспериментальный стенд и метод исследования

Эксперименты проводились в атмосферной ударной трубе диаметром 55 мм, расположенной горизонтально. Отличительной особенностью этой трубы является исходный уровень давления воздуха в камере высокого давления, который совпадает с давлением окружающей среды. Схема ударной трубы, расположение отверстий под датчики давления, приведены на рис. 1 (линейные размеры в миллиметрах). Для

контроля однородности в окружном направлении рассматриваемых процессов и получаемых результатов датчики давления G1 и G2 были расположены в одном и том же сечении трубы, один напротив другого.

В эксперименте были использованы электрические пьезодатчики давления с постоянной времени 10^{-4} с. Сигнал с датчиков усиливался с помощью катодных повторителей и поступал на плату АЦП, которая работала в режиме мультиплексора с частотой дискретизации 100 кГц на канал. Для обеспечения во всех опытах одного и того же режима течения газа в ударной трубе, из камеры низкого давления (LPC – low pressure chamber) откачивался воздух до значения давления, ниже атмосферного в 10 раз. Диафрагма, отделяющая камеру высокого давления (HPC – high pressure chamber) от вакуумируемой части ударной трубы, разрушалась механическим пробойником. Для выбранного отношения давлений в камерах ударной трубы число Маха ударной волны имело значение, равное 1,7.

Для создания пористого слоя использовались частицы полиуретана правильной сферической формы. Плотность материала составляла 200 кг/м^3 . Размер частиц не был унифицирован и лежал в диапазоне от 2 до 3 мм. Толщина гранулированного слоя равнялась 30 мм. Для рассматриваемой серии экспериментов в ударной трубе гранулированный слой располагался на равном удалении от датчиков G3 и G4.

Для расположения и удержания сыпучего материала в горизонтально расположенной установке, были разработаны контейнеры различного типа, в зависимости от нужного функционала. Для создания неразрушаемого гранулированного слоя, удерживающий его контейнер состоял из тонкостенной металлической опоры цилиндрической формы и двух сеток, закрывающих ее торцевые части. Для создания разрушаемого гранулированного слоя, одна из сеток заменялась

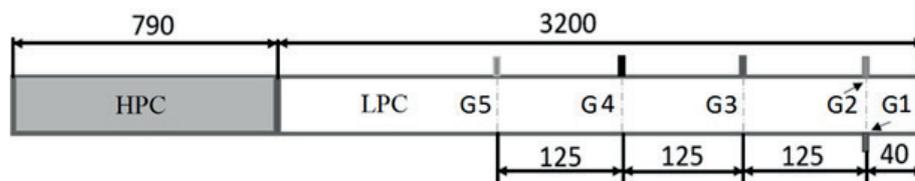


Рис. 1. Схема экспериментальной ударной трубы:

G1 – G5 – датчики давления; HPC, LPC – камеры высокого и низкого давления соответственно; линейные размеры даны в мм

папиросной бумагой, которая легко разрушалась под действием ударной волны. Продольный размер контейнера составлял 30 мм. Сетка была выполнена из текстильной ткани и имела размер ячеек примерно $0,5 \times 0,5$ мм. Влияние сетки и папиросной бумаги на волновую структуру исследовалось отдельно. Были проведены опыты в «пустой» трубе и в трубе с пустыми контейнерами, без гранулированного слоя. Установлено, что влияние контейнера с двумя сетками не превышает 15 %, что является малым возмущением при условии их использования для удержания гранулированных материалов (см. раздел ниже).

Следует отметить, что приводимые ниже иллюстрации, относящиеся к «пустой» трубе, трубе с пустым контейнером и различные варианты с гранулированным слоем отражают не среднее значение по серии

экспериментов, а один из вариантов первичной информации от сигналов, полученных с датчиков G1 – G5. При этом в каждой серии экспериментов регистрировалась полная воспроизводимость наблюдаемых закономерностей и получена необходимая повторяемость результатов.

Эксперименты без гранулированного слоя

Здесь и далее на графиках иллюстраций все давления представлены в относительных величинах. В качестве числа для нормирования функции было выбрано значение начального уровня давления в камере низкого давления. Отсчет времени начинался с момента порогового отклонения сигнала в датчике G5 от его начального уровня, т. е. при регистрации датчиком падающей ударной волны.

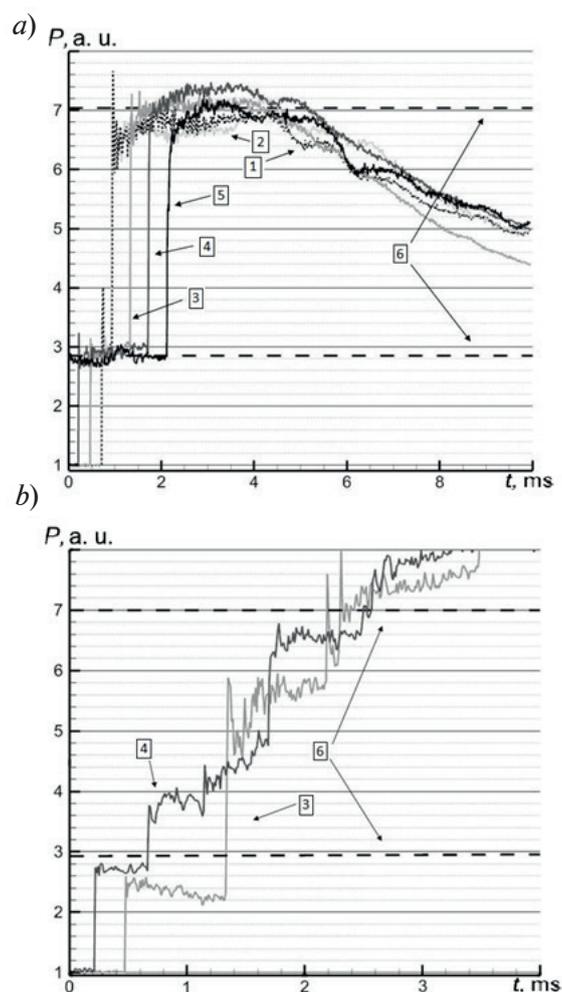


Рис. 2. Графики изменения давления во времени в точках мониторинга в ударной трубе низкого давления без контейнера (а) и в той же трубе с помещенным в нее пустым контейнером (б): 1 – 5 – номера датчиков, 6 – аналитические решения



На рис. 2,а представлены изменения давления во времени для датчиков G1 – G5 в «пустой» камере низкого давления без контейнера и гранулированного слоя. За рассматриваемый интервал времени каждый из датчиков регистрирует две ударные волны: волну сжатия и волну разрежения. В частности, два скачкообразных изменения давления на уровень 30 кПа и далее на уровень 70 кПа соответствуют регистрации падающей ударной волны и ударной волны, отраженной от торца камеры низкого давления. Наблюдаемое снижение давления, начиная с четвертой миллисекунды, соответствует регистрации волны разрежения. Предшествующее ей плавное повышение давления выше уровня 70 кПа соответствует волне сжатия, которая возникла при взаимодействии отраженной ударной волны с фрагментами контактной поверхности.

Использование термина «контактная поверхность» требует разъяснения. В рамках упрощенного описания структуры течения газа в ударной трубе, контактную поверхность представляют в виде плоскости, которая разделяет газы высокого и низкого давления в начальный и последующие моменты времени. Однако при поступлении воздуха в камеру низкого давления конечные скорости разрушения диафрагмы приводят к возникновению интенсивного течения газа как в осевом, так и радиальном направлениях. Это вызывает не только искривление фронта, где наблюдается скачок плотности и температуры, но и частичное перемешивание воздуха из разных камер ударной трубы. В этой ситуации взаимодействие отраженной ударной волны происходит фактически с областью из фрагментов контактной поверхности.

Давление газа за падающей и отраженной ударными волнами (показания датчиков G1 – G5) хорошо согласуется с давлением, которое было рассчитано при помощи аналитической зависимости. Вычисления были проведены на основании элементарной теории ударной трубы, опирающейся на решение задачи Римана о распаде произвольного разрыва [20]. Заметим, что для данной постановки задачи, когда течение газа априорно обладает свойствами осевой симметрии, расхождение показаний датчиков G1 и G2 демонстрирует уровень погрешности единичного измерения.

На рис. 2,б представлены изменения давления во времени для датчиков G3 и G4

при установке в трубу пустого контейнера. Интерпретация этих результатов вызывает некоторые затруднения, поскольку волновая структура формируется не только от взаимодействия ударной волны с торцом камеры низкого давления и контактной поверхностью, но и от влияния двух сеток, порождающих многократные отражения волн внутри пустого контейнера. Однако по-прежнему можно идентифицировать уровень давления в падающей ударной волне и в волне, отраженной от торца LPC. В качестве реперных значений выступают соответствующие уровни давления в «пустой» трубе. Об ослаблении падающей волны, вызванном конструктивными элементами контейнера, можно судить по данным на первой миллисекунде; из сопоставления значений функций ко второй миллисекунде, когда датчики G3 и G4 регистрируют отраженную от торца камеры низкого давления ударную волну, влияние двух сеток на давление можно определить величиной, не превышающей 15 % от измеряемой величины.

Эксперименты с неподвижным гранулированным слоем

На рис. 3 представлены изменения давления во времени для датчиков G3 и G4, расположенных по разные стороны гранулированного слоя, остающегося неподвижным в процессе данного эксперимента. Для датчика G4 первый подъем давления до уровня 30 кПа соответствует падающей ударной волне. При взаимодействии с гранулированным слоем возникают отраженная и проходящая ударные волны. По сравнению с вариантом отражения от торца трубы, амплитуда отраженной ударной волны от поверхности гранулированного слоя ниже и регистрируется датчиком G4 на уровне 60 – 65 кПа. Как и в трубе без гранулированного слоя, отраженная ударная волна взаимодействует с элементами контактной поверхности. Для рассматриваемого положения гранулированного слоя возникает многократное отражение волны сжатия как от контактной поверхности, так и от поверхности гранулированного слоя, что приводит к повышению давления до более высокого уровня (80 кПа). Последующее снижение значения давления на датчике G4 вызвано прохождением волны разрежения.

Датчик G3 расположен в области между

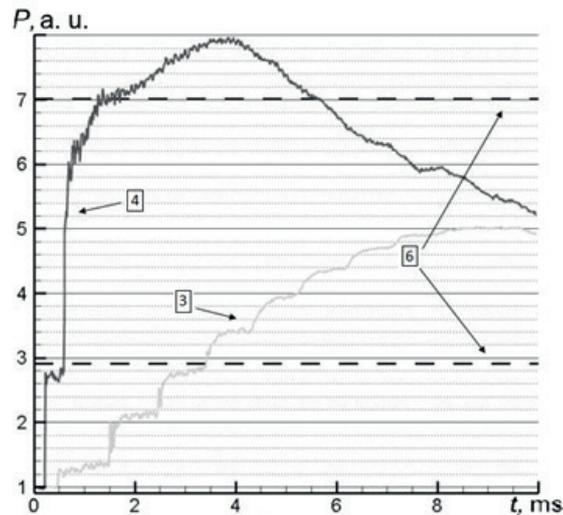


Рис. 3. Графики изменения давления во времени на датчиках G3 и G4 для варианта с неразрушаемым гранулированным слоем:
3, 4 – номера датчиков, 6 – аналитическое решение

пористым слоем и торцом камеры низкого давления. По показаниям датчика G3 можно судить об образовании волновой структуры в виде бегущей волны с многократным отражением как от поверхности гранулированного слоя, так и торца камеры низкого давления. Об этом свидетельствует ступенчатая структура зависимости давления от времени. С течением времени интенсивность ударной волны затухает. Рост давления связан с непрерывным поступлением газа в приторцевую область через гранулированный слой. Механизм поступления газа основан на явлении фильтрации, т. е. массовый расход газа есть функция от

перепада давления на толщине гранулированного слоя. При выравнивании давлений по разные стороны гранулированного слоя и последующей инверсии градиента давления, возникает «обратная фильтрация газа», т. е. газ в гранулированном слое меняет направление течения и движется в сторону от торца камеры низкого давления.

Эксперименты с разрушаемым гранулированным слоем

На рис. 4 представлены изменения давления во времени для датчиков G3 и G4, расположенных в начальный момент по разные стороны от гранулированного слоя.

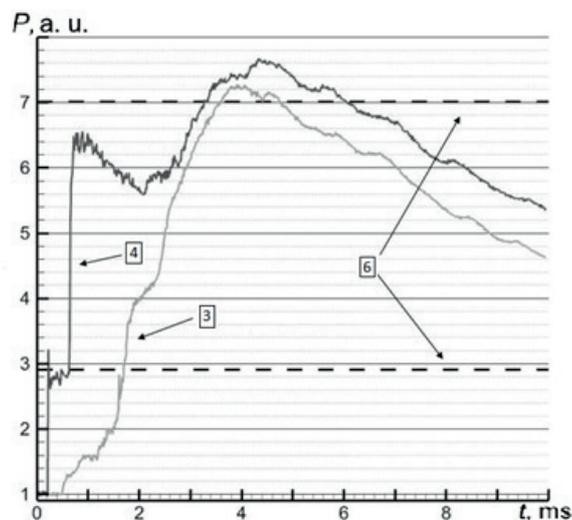


Рис. 4. График изменения давления во времени на датчиках G3 и G4 для варианта с разрушаемым гранулированным слоем:
3, 4 – номера датчиков, 6 – аналитическое решение



Укажем на важные аспекты, которые разъясняют поведение кривых, приведенных на этом рисунке. В результате взаимодействия с падающей ударной волной гранулированный слой разрушается и превращается в облако частиц. Можно выделить две стадии разгона частиц в облаке:

«мгновенную», связанную с фронтом ударной волны, когда частица получает импульс за счет прохождения ударной волны мимо частицы сферической формы;

«медленную», которая связана с разной скоростью движения частицы и окружающей среды, т. е. в первую очередь с силой Стокса.

Скорость движения границ подвижного пористого слоя различна, т. е. облако не только смещается в сторону торца камеры низкого давления, но и увеличивается в размерах. В результате увеличения размеров облака проницаемость подвижного пористого слоя увеличивается. До тех пор, пока облако существенно не увеличилось в размерах от границ пористого слоя, по-прежнему возможно отражение ударных волн или волн разрежения.

Датчик G4, находящийся перед гранулированным слоем, регистрирует несколько процессов. На начальных стадиях сценарий с регистрацией датчиком G4 падающей и отраженной ударных волн полностью совпадает со случаем неразрушаемого гранулированного слоя. В следующие моменты времени датчик G4 регистрирует волну разрежения. Интенсивность волны разрежения обусловлена двумя процессами.

Во-первых, происходит увеличение массы газа, проходящей через гранулированный слой. Во-вторых, смещение границы пористого слоя порождает волну разрежения как за движущимся поршнем.

По показаниям датчика G3 можно судить о закономерностях изменения давления в приторцевой области. Для варианта с разрушением гранулированного слоя этот процесс происходит более интенсивно. Во-первых, за счет увеличения проницаемости гранулированного слоя, большее количество газа поступает в приторцевую область. Во-вторых, сам размер приторцевой области с чистым газом уменьшается из-за смещения облака частиц. В данном случае граница пористого слоя действует как вдвигаемый в область поршень. После второй миллисекунды на графике зависимости давления от времени наблюдается пологий линейный участок. В этот момент времени датчик G3 находится в облаке частиц, т. е. в области двухфазного течения. После двух с половиной миллисекунд оба датчика — G3 и G4 находятся по одну сторону от облака частиц и их показания выравниваются.

На рис. 5 для двух рассмотренных вариантов гранулированного слоя представлено изменение давления во времени на датчике G2, как наиболее близко расположенного к торцевой поверхности трубы.

Обратим внимание на наблюдаемые волновые закономерности. Как следует из поведения функций, в первые моменты вре-

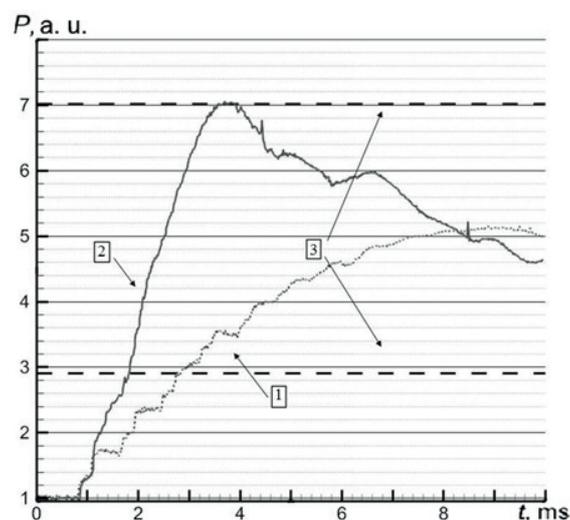


Рис. 5. График изменения давления во времени на датчике G2 для обоих вариантов гранулированного слоя:

1, 2 — неразрушаемый и разрушаемый слои, соответственно; 3 — аналитическое решение

мени давление в приторцевой области растет по одной и той же закономерности. Это свидетельствует о том, что до тех пор, пока гранулы не обрели определенного уровня скорости, законы фильтрации для удерживаемого и разрушаемого гранулированного слоев мало различимы. Последующее расхождение в поведении давления на торце трубы, как отмечалось выше, связано с тем, что для разрушаемого гранулированного слоя, помимо увеличения давления за счет процесса нестационарной фильтрации, газ в приторцевой области испытывает сжатие облаком частиц. Если переходить к интегральным оценкам, то в обоих случаях, по сравнению с «пустой» трубой, наблюдается уменьшение импульса воздействия на торцевую поверхность ударной трубы, а в случае неразрушаемого гранулированного слоя

– и снижение абсолютного уровня давления.

Заключение

В работе выполнены эксперименты по исследованию взаимодействия ударной волны с гранулированным слоем. Установлены закономерности нестационарной фильтрации газа через разрушаемые и сохраняющие свою структуру гранулированные слои. Получены зависимости динамического воздействия проходящей ударной волны на непроницаемую поверхность для двух рассмотренных вариантов пористого слоя.

Работа выполнялась в рамках проекта 3.3314.2017/4.6 государственного задания Министерства образования и науки РФ на период 2017 – 2019 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kitagawa K., Takayama K.** Attenuation of shock waves propagating in polyurethane foams // *Shock Waves*. 2006. Vol. 15. No. 6. Pp. 437–445.
2. **Seitz W.M., Skews B.W.** Effect of compressible foam properties on pressure amplification during shock wave impact // *Shock Waves*. 2006. Vol. 15. No. 3–4. Pp. 177–197.
3. **Boiko V.M., Kiselev V.P., Kiselev S.P., Papyrin A.N., Poplavsky S.V., Fomin V.M.** Shock wave interaction with a cloud of particles // *Shock Waves*. 1997. Vol. 7. No. 5. Pp. 275–285.
4. **Rogue X., Rodriguez G., Haas J.F., Saurel R.** Experimental and numerical investigation of the shock-induced fluidization of a particles bed // *Shock Waves*. 1998. Vol. 8. No. 1. Pp. 29–45.
5. **Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М.** Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа. М.: «Недра», 1972. 288 с.
6. **Нигматулин Р.И.** Динамика многофазных сред. Ч. I. М.: Наука, 1987. 464 с.
7. **Нигматулин Р.И.** Динамика многофазных сред. Ч. II. М.: Наука, 1987. 360 с.
8. **Britan A., Elperin T., Igra O., Jiang J.P.** Acceleration of a sphere behind planar shock waves // *Experiments in Fluids*. 1995. Vol. 20. No. 2. Pp. 84–90.
9. **Sun M., Saito T., Takayama K., Tanno H.** Unsteady drag on a sphere by shock wave loading // *Shock Waves*. 2004. Vol. 14. No. 1–2. Pp. 3–9.
10. **Parmar M., Haselbacher A., Balachandar S.** Modeling of the unsteady force for shock-particle interaction // *Shock Waves*. 2009. Vol. 19. No. 4. Pp. 317–329.
11. **Wagner J.L., Beresh S.J., Kearney S.P., Trott W.M., Castaneda J.N., Pruett B.O., Baer M.R.** A multiphase shock tube for shock wave interactions with dense particle fields // *Experiments in Fluids*. 2012. Vol. 52. No. 6. Pp. 1507–1515.
12. **Ling Y., Wagner J.L., Beresh S.J., Kearney S.P., Balachandar S.** Interaction of a planar shock wave with a dense particle curtain: Modeling and experiments // *Physics of Fluids*. 2012. Vol. 24. No. 1. P. 113301.
13. **Regele J.D., Rabinovitch J., Colonius T., Blanquart G.** Unsteady effects in dense, high speed, particle laden flows // *International Journal of Multiphase Flow*. 2014. Vol. 61. May. Pp. 1–13.
14. **Liu H., Guo Y., Lin W.** Simulation of shock-powder interaction using kinetic theory of granular flow // *Powder Technology*. 2015. Vol. 273. March. Pp. 133–144.
15. **Houim R.W., Oran E.S.** A multiphase model for compressible granular-gaseous flows: Formulation and initial tests // *J. Fluid Mech.* 2016. Vol. 789. 25 February. Pp. 166–220.
16. **Ben-Dor G., Britan A., Elperin T., Igra O., Jiang J.P.** Experimental investigation of the interaction between weak shock waves and granular layers // *Experiments in Fluids*. 1997. Vol. 22. No. 6. Pp. 432–443.
17. **Ben-Dor G., Britan A., Elperin T., Igra O., Jiang J.P.** Mechanism of compressive stress formation during weak shock waves impact with granular materials // *Experiments in Fluids*. 1997. Vol. 22. No. 6. Pp. 507–518.

18. **Zhu F., Chou C.C., Yang K.H.** Shock enhancement effect of lightweight composite structures and materials // Composites. Part B: Engineering. 2011. Vol. 42. No. 5. Pp. 1202–1211.

19. **Уткин П.С.** Некоторые вычислительные аспекты моделирования взаимодействия

ударной волны с облаком частиц в рамках двухжидкостной модели // Горение и взрыв. 2017. Т. 10. № 3. С. 53–57.

20. **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.

Статья поступила в редакцию 17.09.2019, принята к публикации 05.11.2019.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БУЛОВИЧ Сергей Валерьевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Гидроаэродинамика, горение и теплообмен» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
bulovic@yandex.ru

МАСЮКЕВИЧ Алексей Владимирович – инженер Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

194021, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26
79313165906@yandex.ru

REFERENCES

1. **Kitagawa K., Takayama K.**, Attenuation of shock waves propagating in polyurethane foams, Shock Waves. 15 (6) (2006) 437–445.

2. **Seitz W.M., Skews B.W.**, Effect of compressible foam properties on pressure amplification during shock wave impact, Shock Waves. 15 (3–4) (2006) 177–197.

3. **Boiko V.M., Kiselev V.P., Kiselev S.P., et al.**, Shock wave interaction with a cloud of particles, Shock Waves. 7 (5) (1997) 275–285.

4. **Rogue X., Rodriguez G., Haas J.F., Saurel R.**, Experimental and numerical investigation of the shock-induced fluidization of a particles bed, Shock Waves. 8 (1) (1998) 29–45.

5. **Barenblatt G.I., Entov V.M., Ryzhik V.M.**, Theory of nonstationary flow of liquids and gases in porous media [in Russian], Nedra, Moscow, 1972.

6. **Nigmatulin R.I.**, Dynamics of multiphase media, Vol. 1, Hemisphere, New York, 1990.

7. **Nigmatulin R.I.**, Dynamics of multiphase media, Vol. 2, Hemisphere, New York, 1990.

8. **Britan A., Elperin T., Igra O., Jiang J.P.**, Acceleration of a sphere behind planar shock waves, Experiments in Fluids. 20 (2) (1995) 84–90.

9. **Sun M., Saito T., Takayama K., Tanno H.**, Unsteady drag on a sphere by shock wave loading, Shock Waves. 14 (1–2) (2004) 3–9.

10. **Parmar M., Haselbacher A., Balachandar S.**, Modeling of the unsteady force for shock-

particle interaction, Shock Waves. 19 (4) (2009) 317–329.

11. **Wagner J.L., Beresh S.J., Kearney S.P., et al.**, A multiphase shock tube for shock wave interactions with dense particle fields, Experiments in Fluids. 52 (6) (2012) 1507–1515.

12. **Ling Y., Wagner J.L., Beresh S.J., et al.**, Interaction of a planar shock wave with a dense particle curtain: Modeling and experiments, Physics of Fluids. 24 (1) (2012) 113301.

13. **Regele J.D., Rabinovitch J., Colonius T., Blanquart G.**, Unsteady effects in dense, high speed, particle laden flows, International Journal of Multiphase Flow. 61 (May) (2014) 1–13.

14. **Liu H., Guo Y., Lin W.**, Simulation of shock-powder interaction using kinetic theory of granular flow, Powder Technology. 273 (March) (2015) 133–144.

15. **Houim R.W., Oran E.S.**, A multiphase model for compressible granular-gaseous flows: Formulation and initial tests, J. Fluid Mech. 789 (25 February) (2016) 166–220.

16. **Ben-Dor G., Britan A., Elperin T., et al.**, Experimental investigation of the interaction between weak shock waves and granular layers, Experiments in Fluids. 22 (6) (1997) 432–443.

17. **Ben-Dor G., Britan A., Elperin T., et al.**, Mechanism of compressive stress formation during weak shock waves impact with granular materials, Experiments in Fluids. 22 (6) (1997) 507–518.

18. **Zhu F., Chou C.C., Yang K.H.**, Shock enhancement effect of lightweight composite structures and materials, *Composites. Part B: Engineering*. 42 (5) (2011) 1202–1211.

19. **Utkin P.S.**, Nekotoryye vychislitelnyye aspekty modelirovaniya vzaimodeystviya udarnoy volny s oblakom chastits v ramkakh dvukhzhidkostnoy modeli [Some computational aspects of modeling the interaction of a shock

wave with a cloud of particles in the terms of a two-fluid model], *Goreniye i Vzryv* [“Burning and Explosion”– Russian Journal]. 10 (3) (2017) 53–57.

20. **Godunov S.K., Zabrodin A.V., Ivanov M.Ya., et al.**, Résolution numérique des problèmes multidimensionnels de la dynamique des gaz, Mir, Moscou, 1979.

Received 17.09.2019, accepted 05.11.2019.

THE AUTHORS

BULOVICH Sergei V.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
bulovic@yandex.ru

MASIUKEVICH Aleksei V.

The Ioffe Institute of the Russian Academy of Sciences

26 Polytekhnicheskaya St., St. Petersburg, 194021, Russian Federation
79313165906@yandex.ru