

УДК 539.3

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ АЛГОРИТМОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
ДИНАМИЧЕСКИХ КОНТАКТНЫХ ПАРАМЕТРОВ  
НА ДЕФОРМИРУЕМЫХ ГАЗОПРОНИЦАЕМЫХ  
ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИЙ\***

© 2015 г.                    **Глазова Е.Г., Кочетков А.В., Турыгина И.А.**

*Научно-исследовательский институт механики  
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,  
Нижний Новгород, Российская Федерация*

kochetkov@mech.unn.ru

*Поступила в редакцию 11.06.2015*

Проведен сравнительный анализ двух алгоритмов определения контактных параметров при численном моделировании взаимодействия деформируемых газопроницаемых преград с ударными волнами. Первый алгоритм основан на использовании решения задачи распада разрыва на подвижном скачке пористости – «комбинированном» разрыве. Второй алгоритм основывается на усреднении параметров решения задачи распада разрыва между газом и поровым газом, а также между газом и деформируемым скелетом преграды. Показано заметное отличие в поведении контактного давления и параметров движения преграды. Контактный алгоритм на базе распада разрыва на скачке сечений дает более точные результаты.

*Ключевые слова:* газопроницаемая преграда, ударная волна, контакт, распад разрыва, комбинированный разрыв, скачок пористости.

**Введение**

При решении задач взаимодействия потоков газа с пористыми проницаемыми преградами одной из основных проблем является постановка условий на поверхности контакта среды с преградой. Для непроницаемых преград используется традиционное условие непроникания, заключающееся в равенстве нормальных компонент скорости газа и преграды. Для проницаемых преград требуются специальные подходы. Наиболее строгим является подход, требующий выполнения законов сохранения на скачке пористости, называемом «комбинированным» разрывом [1, 2]. В ряде работ [3, 4] были исследованы и обоснованы возможные конфигурации возникающих течений на скачке пористости и приведены результаты модельных расчетов. В [5, 6] приведены общие алгоритмы решения одномерной задачи о распаде

---

\* Выполнено при частичном финансировании в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки (проект № 2014/134 2226), грантами РФФИ (проекты №13-08-00219 а, №14-08-00197 а, №15-48-02333 р\_поволжье\_а) и Программой государственной поддержки ведущих научных школ РФ (грант НШ-593.2014.8).

произвольного разрыва на газодинамическое течение в канале со скачком сечения, отождествляемым со скачком пористости. В работах [7–10] при численном моделировании задач взаимодействия ударных волн с проницаемыми газозвесьями, насыпными слоями и проницаемыми скелетами сред условия на поверхностях разрыва пористости в явном виде не ставились. Алгоритмы использовали сквозной счет через поверхность контакта, «размазывая» ее на несколько ячеек, что является достаточно грубым подходом. В работах [11, 12] в задачах взаимодействия ударных волн с деформируемыми преградами, испытывающими большие перемещения, применялись алгоритмы усреднения контактных параметров на проницаемых и непроницаемых частях границы, которые нельзя считать строго обоснованными. В настоящей статье проводится сравнительный анализ различных алгоритмов определения контактных параметров на проницаемых подвижных границах на примере процессов взаимодействия ударных волн с пакетами плетеных металлических сеток [7, 11, 12]. Рассматриваются два алгоритма. Алгоритм 1 основан на использовании соотношений на скачке пористости и решении задачи о распаде разрыва на этом скачке. Алгоритм 2 использует усреднение контактных параметров при последовательном решении двух задач распада разрыва – между примыкающим и поровым газом на проницаемой части преграды, а также между газом и непроницаемой (в общем случае деформируемой) частью преграды.

### 1. Решение задачи о распаде разрыва на скачке пористости (алгоритм 1)

Рассмотрим алгоритм определения параметров на контактной границе «пористая среда – газ», основанный на теории «комбинированного» разрыва [1, 2]. Один из подходов определения параметров на «комбинированном» разрыве для газодинамических задач основан на использовании решения задачи о распаде произвольного разрыва в канале со скачком площади поперечного сечения [5, 6]. Алгоритм описывается в одномерном приближении. Предполагается наличие скачка сечения канала в точке  $x = 0$ . Исходные состояния газа на левом ( $x \leq 0$ ) и правом ( $x > 0$ ) участках канала произвольны и обозначаются соответственно индексами 2 и 1. Отношение меньшей площади поперечного сечения к большей обозначим через  $\alpha = A_1/A_2$ . Можно трактовать  $\alpha$  как коэффициент проницаемости пористой среды. Исходная постановка задачи изображена на рис. 1.

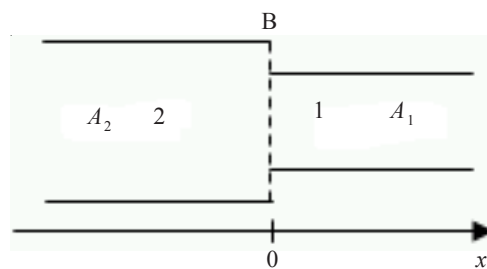


Рис. 1

Предполагается, что через некоторый промежуток времени в окрестности скачка сечения В поток устанавливается. На каждом участке канала, далеко от сечения  $x = 0$ , при больших временах  $t$  течение будет одномерным и движение газа будет осуществляться в виде разделенных элементарных волн постоянной интенсив-

ности: ударных волн S, контактных разрывов T и волн разрежения R. Таким образом, решение задачи сводится к выбору совокупности элементарных волн (конфигураций), при которых от состояния 2 можно перейти к состоянию 1 с соблюдением условий совместности на всех разрывах, в том числе и на разрыве площади сечения канала В. Параметры постоянных потоков, которые устанавливаются слева и справа в окрестности скачка сечения, обозначаются соответственно индексами 5 и 4. Одна из возможных конфигураций образующихся волн приведена на рис. 2.

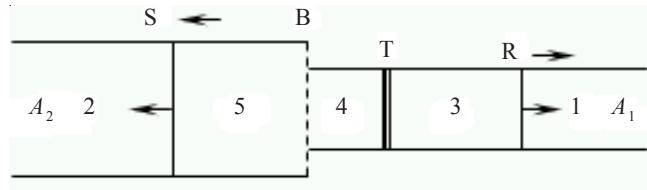


Рис. 2

Условиями совместности – законами сохранения на скачке сечения – являются следующие соотношения [1, 6]:

$$\rho_5 u_5 = \alpha \rho_4 u_4, \quad (1)$$

$$\rho_5 u_5^2 + p_5 - (1 - \alpha) p' = \alpha (\rho_4 u_4^2 + p_4), \quad (2)$$

$$\rho_5 u_5 \left( \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{p_5}{\rho_5} + \frac{u_5^2}{2} \right) = \alpha \rho_4 u_4 \left( \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{p_4}{\rho_4} + \frac{u_4^2}{2} \right), \quad (3)$$

где  $u$  – скорость частиц газа,  $p$  – давление,  $\rho$  – плотность,  $p'$  – реакция стенки уступа, равная по величине давлению газа на указанную стенку ( $p' = p_5$ ),  $\gamma$  – показатель адиабаты.

Движение газа после распада из левого участка канала в правый называется истечением ( $u_5 \geq 0, u_1 \geq 0$ ), из правого в левый – втеканием ( $u_4 < 0, u_5 < 0$ ). Алгоритм определения всех параметров распада разрыва подробно описан в [5] и реализован в рамках пакета программ UPSGOD [13]. Тестирование алгоритма и программ проведено на многочисленных задачах истечения и втекания ударных волн и сверхзвуковых потоков в сравнении с решениями многомерных задач с использованием вычислительного комплекса STAR CCM+ [14]. В случае деформируемой газопроницаемой преграды решение задачи о распаде разрыва производится в подвижной системе координат, связанной со скачком пористости В, в которой скачок неподвижен. Контактное давление на преграду определяется состоянием 5 (см. рис. 2). Для его уточнения при движении преграды дополнительно решается задача о распаде разрыва между газом 2 и деформируемой преградой [15]. Здесь же определяется скорость скачка пористости В.

## 2. Решение задачи распада произвольного разрыва (алгоритм 2)

Алгоритм опирается на решения двух классических одномерных задач распада произвольного разрыва. Первая задача – между примыкающим газом и деформируемой преградой [15], вторая задача – между газом и поровым газом на газопроницаемом участке преграды [16]. Полученные давления усреднились с весовыми коэффициентами, пропорциональными поверхностным концентрациям фаз, определяемым коэффициентом  $\alpha$  (1).

Ниже приводятся решения одномерных задач взаимодействия плоской и сферической ударной волн с газопроницаемой преградой в виде пакета плетеных металлических сеток [11, 12]. Сравниваются решения, полученные с использованием алгоритмов 1 и 2.

### 3. Взаимодействие плоской ударной волны с неподвижной газопроницаемой преградой

Постановка задачи приведена на рис. 3. Расчетная область включает в себя три подобласти. Координаты границ подобластей имеют значения:  $r_1 = 2$  см,  $r_2 = 3$  см,  $r_3 = 5$  см. В первой подобласти задаются параметры, соответствующие параметрам газа за фронтом плоской ударной волны:  $p_n = 0,1805$  МПа,  $\rho_n = 0,00186$  г/см<sup>3</sup>,  $u_n = 147,29$  м/с. Вторая подобласть – неподвижный недеформируемый пакет сеток с коэффициентом проницаемости  $\alpha = 0,7$  и начальными параметрами порового газа  $p_0 = 0,1$  МПа,  $\rho_0 = 0,00123$  г/см<sup>3</sup>,  $u_0 = 0$ . В третьей подобласти – покоящийся газ с начальными параметрами, как во второй подобласти. Показатель адиабаты газа во всех подобластях  $\gamma = 1,4$ .

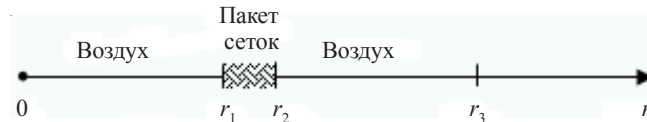


Рис. 3

Решение с использованием алгоритма 1 получено на разностной сетке с размером ячеек 0,05 см. На рис. 4 представлены распределения давлений по расчетной области задачи в момент времени  $t = 0,05$  мс.

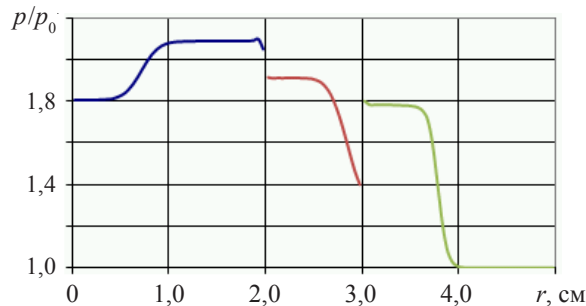


Рис. 4

Наблюдается формирование отраженной от преграды ударной волны с более высоким уровнем давления, чем в падающей волне. За преградой ( $r > r_2$ ) формируется прошедшая ударная волна меньшей амплитуды, чем падающая. Газодинамическое течение включает в себя разрывы на скачках пористости (контактных границах преграды). Численное решение с высокой степенью точности дает значения амплитуд отраженной и проходящей волн, полученных из точного решения задачи о распаде разрыва на скачке сечений [5].

Аналогичные результаты расчета данной задачи по алгоритму 2 приведены на рис. 5. Алгоритм 2 дает завышенные значения амплитуды отраженной ударной волны и занижение амплитуды проходящей через преграду волны. Кроме того, наблюдаются численные осцилляции контактного давления (хотя и незначительные). По-

этому более предпочтительным является решение с использованием задачи распада разрыва на скачке пористости (алгоритм 1).

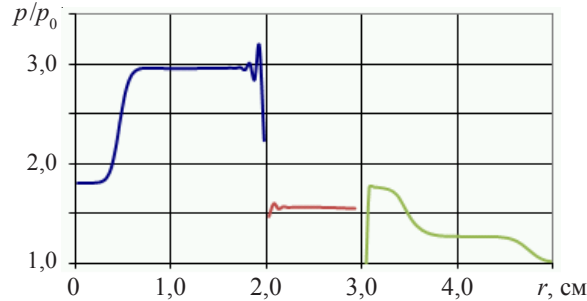


Рис. 5

#### 4. Взаимодействие сферической волны от взрыва взрывчатого вещества с газопроницаемым пакетом плетеных сеток

Рассматривается нагружение сферического пакета плетеных металлических сеток при взрывном воздействии шарового заряда взрывчатого вещества (ВВ), находящегося в центре симметрии системы (рис. 6). Постановка одномерной задачи показана на рис. 7.

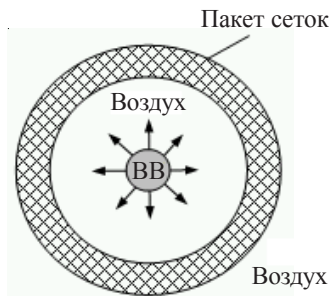


Рис. 6

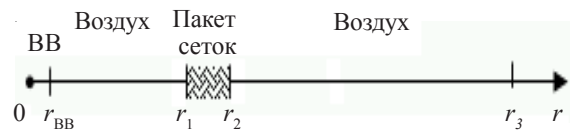


Рис. 7

Расчетная область включает в себя три подобласти. Первая подобласть  $0 < r \leq r_1$  включает в себя продукты детонации и воздух. В силу близких термодинамических свойств продуктов детонации и воздуха считаем их одной средой с единым уравнением состояния и переменным показателем адиабаты, зависящим от плотности. В начальный момент времени  $t = 0$  в части подобласти  $0 \leq r \leq r_{\text{ВВ}}$  ( $r_{\text{ВВ}} = 0,3$  см) задано распределение газодинамических параметров, соответствующее экспериментальным данным по взрывам зарядов ТГ 50/50 [17]. При  $r > 0,3$  см начальные параметры воздуха:  $p_0 = 0,1$  МПа,  $\rho_0 = 0,00123$  г/см<sup>3</sup>,  $u_0 = 0$ . Вторая подобласть – пакет плетеных стандартных сеток  $2 \times 2 \times 0,5$  НУ ГОСТ 3826-82 толщиной 2,5 см, с объемной концентрацией металла  $\alpha_{20} = 0,14$ , коэффициентом проницаемости  $\alpha = 0,8$ , начальной плотностью  $\rho_{20}^0 = 1,09$  г/см<sup>3</sup>. Нелинейная модель деформирования пакета сеток и значения параметров приведены в [11, 12]. В начальный момент времени частицы сетки и порохового газа находятся в невозмущенном покое за исключением объема, занятого продуктами детонации. Третья подобласть – также невозмущенный покоящийся газ. Решение получено на разностной сетке с начальным размером ячеек по первой подобласти газа 0,05 см, по пакету сеток и

поровому газу – 0,1 см. В расчетах анализируются контактные давления в точках подобластей газа, граничащих с сеткой:  $r_1 = 8$  см и  $r_2 = 10,5$  см. Сравнение результатов расчетов по алгоритму 1 с результатами, полученными по алгоритму 2, приведено на рис. 8.

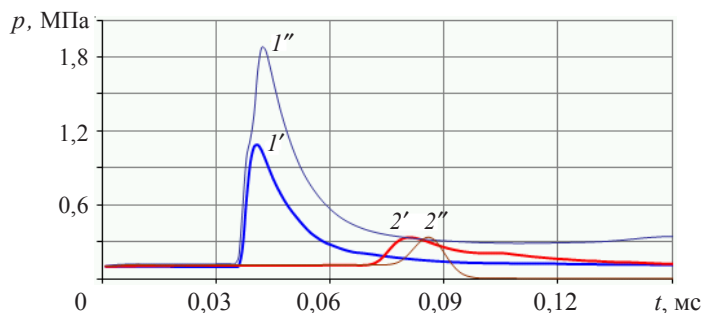


Рис. 8

Здесь показаны давления газа на контактных границах в точках подобластей газа  $r_1$  и  $r_2$  (цифры 1' и 2' для расчета по алгоритму 1, 1'' и 2'' для расчета по алгоритму 2). Как и в тесте с плоской волной, наблюдается существенное завышение амплитуды отраженной ударной волны при использовании алгоритма 2. В то же время амплитуды волн, проходящих через пакет сеток, оказываются близкими для обоих вариантов контактных алгоритмов. Изменение контактной нагрузки вызывает и изменение во времени смещений границ сетки, которые приведены на рис. 9.

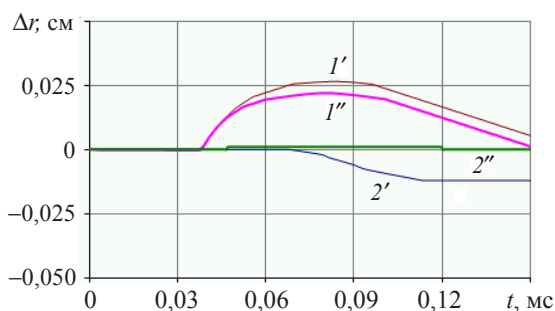


Рис. 9

### Заключение

Алгоритм определения контактных параметров, основанный на распаде разрыва на скачке пористости, дает более точные результаты по сравнению с упрощенным, теоретически менее обоснованным алгоритмом «усреднения», предложенным авторами ранее. Алгоритм, основанный на теории «комбинированного» разрыва, реализован в виде пакета программ на языке Fortran и может быть использован как программная компонента в вычислительных системах для определения контактных параметров взаимодействия ударных волн с газопроницаемыми преградами.

#### Список литературы

1. Киселев С.П., Руев Г.А., Трунев А.П., Фомин В.М., Шавалиев М.Ш. *Ударно-волновые процессы в двухкомпонентных и двухфазных средах*. Новосибирск: ВО Наука, 1992. 261 с.
2. Федоров А.В., Фомин В.М. К теории комбинированного разрыва в газозвесьях. *Физическая газодинамика реагирующих сред*: сб. науч. тр. Новосибирск. 1990. С. 128–134.
3. Крайко А.Н., Миллер Л.Г., Ширковский И.А. О течениях газа в пористой среде с поверхностями разрыва пористости. *Прикладная механика и техническая физика*. 1982. №1. С. 111–118.
4. Гринь В.Т., Крайко А.Н., Миллер Л.Г. К распаду произвольного разрыва на перфорированной перегородке. *Прикладная механика и техническая физика*. 1981. №3. С. 95–103.
5. Яушев И.К. Распад произвольного разрыва в канале со скачком площади сечения. *Изв. СО АН СССР*. 1967. №8. Сер. техн. наук. Вып. 2. С.1 09–120.
6. Дулов В.Г., Лукьянов Г.А. *Газодинамика процессов истечения*. Новосибирск: Наука, 1984. 234 с.
7. Абакумов А.И., Заикин С.Н., Мельцас В.Ю., Низовцев П.Р., Портнягина Г.Ф., Русак В.Н., Соловьев В.П. Численная модель деформирования противоосколочной сетки при взрывном нагружении. *Тр. ВНИИЭФ. Математическое моделирование физических процессов*. 2006. №10. С. 16–30.
8. Мельцас В.Ю., Портнягина Г.Ф., Соловьев В.П. Численное моделирование прохождения ударных волн через экранирующие решетки. *Вопросы атомной науки и техники*. 1993. Вып. 3. С. 26–31.
9. Губайдуллин А.А., Дудко Д.Н., Урманчиев С.Ф. Моделирование взаимодействия воздушной ударной волны с пористым экраном. *Физика горения и взрыва*. 2000. Т. 36, №4. С. 87–96.
10. Болдырева О.Ю., Губайдуллин А.А., Дудко Д.Н., Кутушев А.Г. Численное исследование передачи ударно-волновой нагрузки экранируемой плоской стенке через слой порошкообразной среды и разделяющий их воздушный зазор. *Физика горения и взрыва*. 2007. Т. 43, №1. С. 132–142.
11. Абузяров М.Х., Глазова Е.Г., Кочетков А.В., Крылов С.В., Романов В.И., Сырунин М.А. Моделирование взаимодействия ударных волн с деформируемыми газопроницаемыми преградами. *Проблемы прочности и пластичности*. 2010. Вып. 72. С. 120–129.
12. Глазова Е.Г., Кочетков А.В. Численное моделирование взаимодействия деформируемых газопроницаемых пакетов сеток с ударными волнами. *Прикладная механика и техническая физика*. 2012. №3. С. 11–19.
13. Абузяров М.Х., Крылов С.В., Цветкова Е.В. Моделирование гидроупругопластического взаимодействия с помощью программного комплекса UPSGOD. *Проблемы прочности и пластичности*. 2013. Вып. 75(1). С. 25–32.
14. *Документация, сопровождающая вычислительный комплекс STAR-CCM+* 9.04.011.
15. Абузяров М.Х., Баженов В.Г., Котов В.Л., Кочетков А.В., Крылов С.В., Фельдгун В.Р. Метод распада разрывов в динамике упругопластических сред. *Журнал вычислительной математики и математической физики*. 2000. Т. 40, №6. С. 940–953.
16. *Численное решение многомерных задач газовой динамики*. Под ред. С.К. Годунова. М.: Наука, 1976. 400 с.
17. *Физика взрыва*. Под ред. Л.П. Орленко. Т. 1. М.: Физматлит, 2002. 832 с.

#### References

1. Kiselev S.P., Ruev G.A., Trunev A.P., Fomin V.M., Shavaliyev M.Sh. *Udarno-volnovyye protsessy v dvukhkompontnykh i dvukhfaznykh sredakh*. Novosibirsk: VO Nauka, 1992. 261 s.
2. Fedorov A.V., Fomin V.M. K teorii kombinirovannogo razryva v gazovzvesyakh. *Fizicheskaya gazodinamika reagiruyushchikh sred*: sb. nauch. tr. Novosibirsk. 1990. S. 128–134.
3. Krayko A.N., Miller L.G., Shirkovskiy I.A. O techeniyakh gaza v poristoy srede s poverkhnostyami razryva poristosti. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*. 1982. №1. S. 111–118.
4. Grin' V.T., Krayko A.N., Miller L.G. K raspadu proizvol'nogo razryva na perforirovannoy

- peregorodke. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*. 1981. №3. S. 95–103.
5. Yaushev I.K. Raspad proizvol'nogo razryva v kanale so skachkom ploshchadi secheniya. *Izv. SO AN SSSR*. 1967. №8. Ser. tekhn. nauk. Vyp. 2. S. 109–120.
6. Dulov V.G., Luk'yanov G.A. *Gazodinamika protsessov istecheniya*. Novosibirsk: Nauka, 1984. 234 s.
7. Abakumov A.I., Zaikin S.N., Mel'tsas V.Yu., Nizovtsev P.R., Portnyagina G.F., Rusak V.N., Solov'yev V.P. Chislennaya model' deformirovaniya protivoskolochnoy setki pri vzryvnom nagruzhении. *Tr. VNIIEF. Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh protsessov*. 2006. №10. S. 16–30.
8. Mel'tsas V.Yu., Portnyagina G.F., Solov'yev V.P. Chislennoe modelirovanie prokhozheniya udarnykh voln cherez ekraniruyushchie reshetki. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki*. 1993. Vyp. 3. S. 26–31.
9. Gubaydullin A.A., Dudko D.N., Urmancheev S.F. Modelirovanie vzaimodeystviya vozduшной udarnoy volny s poristym ekranom. *Fizika goreniya i vzryva*. 2000. T. 36, №4. S. 87–96.
10. Boldyreva O.Yu., Gubaydullin A.A., Dudko D.N., Kutushev A.G. Chislennoe issledovanie peredachi udarno-volnovoy nagruzki ekraniruemy ploskoy stenke cherez sloj poroshkoobraznoy sredy i razdelyayushchiy ikh vozduшный zazor. *Fizika goreniya i vzryva*. 2007. T. 43, №1. S. 132–142.
11. Abuzyarov M.Kh., Glazova E.G., Kochetkov A.V., Krylov S.V., Romanov V.I., Syrunin M.A. Modelirovanie vzaimodeystviya udarnykh voln s deformiruemymi gazopronitsaemymi pregradami. *Problemy prochnosti i plastichnosti*. 2010. Vyp. 72. S. 120–129.
12. Glazova E.G., Kochetkov A.V. Chislennoe modelirovanie vzaimodeystviya deformiruemyykh gazopronitsaemykh paketov setok s udarnymi volnami. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*. 2012. №3. S. 11–19.
13. Abuzyarov M.Kh., Krylov S.V., Tsvetkova E.V. Modelirovanie gidrouprugoplasticheskogo vzaimodeystviya s pomoshch'yu programmnoogo kompleksa UPSGOD. *Problemy prochnosti i plastichnosti*. 2013. Vyp. 75(1). S. 25–32.
14. *Dokumentatsiya, soprovozhdayushchaya vychislitel'nyy kompleks STAR-CCM+ 9.04.011*.
15. Abuzyarov M.Kh., Bazhenov V.G., Kotov V.L., Kochetkov A.V., Krylov S.V., Fel'dgun V.R. Metod raspada razryvov v dinamike uprugoplasticheskikh sred. *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki*. 2000. T. 40, №6. S. 940–953.
16. *Chislennoe reshenie mnogomernykh zadach gazovoy dinamiki*. Pod red. S.K. Godunova. M.: Nauka, 1976. 400 s.
17. *Fizika vzryva*. Pod red. L.P. Orlenko. T. 1. M.: Fizmatlit, 2002. 832 s.

**STUDYING DIFFERENT ALGORITHMS  
OF DETERMINING DYNAMIC CONTACT PARAMETERS  
ON DEFORMABLE GAS-PERMEABLE STRUCTURAL ELEMENTS**

**Glazova E.G., Kochetkov A.V., Turygina I.A.**

*Research Institute of Mechanics of State University of Nizhni Novgorod  
Nizhni Novgorod, Russian Federation*

A comparative analysis is given of two algorithms of determining contact parameters when numerically modeling the interaction of deformable gas-permeable obstacles with shock waves. The first of the algorithms is based on using a solution of Riemann problem of a moving porosity jump - a "combined" discontinuity. The second one is based on averaging the parameters of Riemann problem for a gas and a pore gas, as well as for a gas and the deformable skeleton of the obstacle. A noticeable difference in the behavior of the contact pressure and the motion parameters of the obstacle is observed. The contact algorithm based on Riemann problem for the section jumps gives more substantiated results.

*Keywords:* gas-permeable obstacle, shock wave, contact, Riemann problem, combined discontinuity, porosity jump.