

ЭВОЛЮЦИЯ УДАРНЫХ ВОЛН В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ С РАЗЛИЧАЮЩЕЙСЯ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРОЙ¹

Ахметов А. Т., Балапанов Д. М.

Институт механики УНЦ РАН, Уфа

Аннотация. Приводятся результаты экспериментального и теоретического исследований процессов отражения и прохождения слабых ударных волн в газонасыщенных пористых структурах. Предложена математическая модель, описывающая эволюцию ударных волн в гранулярной среде. Изучено влияние на свойства проходящих и отраженных волн таких параметров пористой среды как характерный размер частиц скелета и его гранулометрический состав. Рассмотрено взаимодействие ударных волн со слоистыми неоднородными средами. Полученные результаты представляют интерес для развития методов взрывозащиты и акустического зондирования.

1. Введение

Акустические методы занимают прочное положение среди геофизических методов исследования призабойной зоны газовых и нефтяных скважин. Обычно зондирование пласта проводится после доставки на исследуемый участок прибора, который содержит излучатель и приемник акустических сигналов. Развивается также идея дистанционного акустического зондирования [1, 2] с помощью слабых ударных волн (УВ), посылаемых с устья скважины по газу или жидкости. Исследование отраженных и про-

¹Работа выполнена при финансовой поддержке грантов Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ НШ-3483.2008.1, НШ-4381.2010.1 и гранта РФФИ № 08-01-97033-р_поволжье_a

ходящих сигналов в пористых средах с различной структурой скелета и свойствами насыщающего флюида может дать полезную информацию для подтверждения возможности дистанционного зондирования. Изучение свойств проходящих волн актуально с точки зрения разработки пористых экранов для поглощения энергии взрыва.

Среди экспериментальных работ по данной тематике можно выделить пионерское исследование Б. Е. Гельфанда [3] и др., и статью [4], в которой имеются результаты как экспериментов, так и теоретического моделирования. В работе [5] совместно изучались волны фильтрации и деформации скелета в простых и слоистых структурах различного строения. Математические модели взаимодействия УВ с пористыми средами (ПС) с учетом деформации твердого скелета предлагались также в работах А. А. Губайдуллина и А. Г. Кутушева с учениками [6, 7].

Цель данной работы — экспериментально и численно исследовать влияние структуры газонасыщенной ПС на эволюцию УВ, ограничиваясь фильтрационной составляющей давления.

2. Методика эксперимента

Эксперименты проводились в вертикальной ударной трубе диаметром 52 мм, с длиной камеры высокого давления (КВД) 904 мм и длиной камеры низкого давления (КНД) 1516 мм. Схематичное изображение ударной трубы приведено на рис. 1. Нагнетание воздуха из баллона в КВД приводит к разрыву диафрагмы из кальки, разделяющей КВД и КНД. В результате этого вниз по воздуху, заполняющему КНД, распространяется УВ, фронт которой можно считать плоским уже на расстоянии нескольких калибров трубы от места разрыва. Вверх по КВД распространяется волна разрежения. Типичное значение перепада давления между КВД и КНД при разрыве диафрагмы составляло около 0,3 бар. Образующиеся УВ имели амплитуду $\Delta p \approx 0,13$ бар и скорость $D \approx 350$ м/с при скорости звука в воздухе $c_0 \approx 335$ м/с. Первоначальное давление в КНД равнялось атмосферному. Профили давления воздуха до ($t < 0$) и после

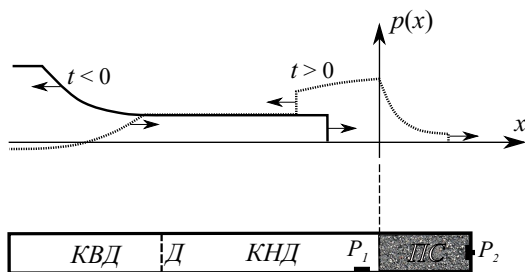


Рис. 1. Распределение давления воздуха в ударной трубе (вверху) при $t < 0$ (сплошная линия) и при $t > 0$ (точечная линия). Стрелки указывают направление распространения соответствующих волн. Схема ударной трубы (внизу): *КВД* — камера высокого давления, *КНД* — камера низкого давления, *Д* — диафрагма, P_1 и P_2 — датчики давления. Масштаб не соблюден

($t > 0$) контакта УВ с поверхностью ПС показаны на рис. 1 над схемой трубы.

В качестве пористых материалов в работе использовались материалы с сильно различающимися акустическими свойствами: поролон, песок и горох. Свойства перечисленных материалов: характерный размер структуры d , пористость α и проницаемость k указаны в табл. 1.

Установка оборудована пьезоэлектрическими датчиками давления, заделанными заподлицо во внутренние стенки трубы. Датчики калибровались путем сравнения измеряемых амплитуд УВ с точным решением задачи о распаде разрыва [9] при известной разности давлений в КВД и КНД. Донный датчик (P_2) был отгорожен от пористой среды сеткой, что давало возможность регистрировать отдельно фильтрационную волну давления без влияния скелета.

Для записи сигналов с датчиков использовались усилители заряда с полосой пропускания 22 кГц и АЦП L-Card с частотой дискретизации 10 МГц.

Таблица 1. Параметры пористых образцов

образец	d , мм	α	k , кД
горох	5	0,34	15
песок	0,6	0,36	0.25
поролон	0,5	0,9	450

3. Ударные волны в пористых средах

В первой серии опытов изучалось взаимодействие УВ с пористыми образцами высотой $H = 17$ см. На рис. 2(а) совмещены осциллограммы давления с датчика Р1. Регистрируются первоначальная ступенька давления зондирующего импульса и отраженная от поверхности насыпки волна, между которыми следует волна разрежения, приходящая от верха КВД. На отраженном импульсе за начальной ступенькой всегда следует скошенный фронт, наклон которого определяется гидравлическим сопротивлением ПС: наибольшей крутизной обладает УВ, отразившаяся от поролона, наименьшей — отраженная от песка. Это означает, что ударный фронт отражается «постепенно», по мере торможения потока газа в среде, это и приводит к выполаживанию профиля. Таким образом, имеется однозначная связь между размером структуры d , что определяет гидравлическое сопротивление (см. раздел «Математическое моделирование»), и формой эхо-сигнала. Вероятно, сглаженный фронт при отражении УВ от поролона обусловлен и деформацией образца при нагружении. Однако сдавливание материала приводит к постепенному уменьшению объема пор и росту сопротивления. Это рассуждение подтверждает вывод о связи формы фронта отраженной волны с сопротивлением ПС.

На заднем фронте УВ, соответствующем приходу волны разрежения, имеется излом, тем более крутой, чем выше проницаемость среды. Этот факт наводит на мысль о возможном способе зондирования пористых сред с помощью простых волн.

Отличия в поведении проходящих волн гораздо сильнее. Затухание амплитуды давления газа на дне секции, как следует из

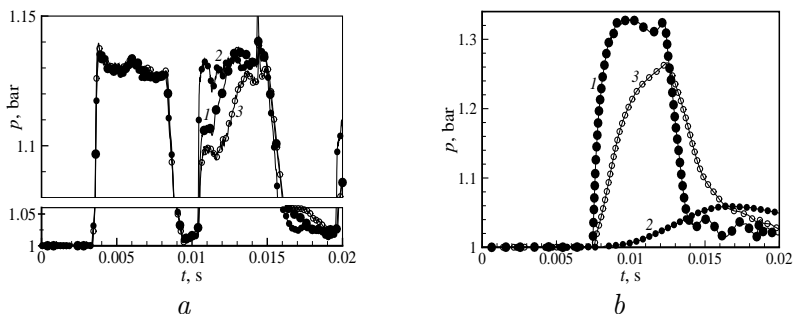


Рис. 2. Отражение ударного импульса от поверхности различных пористых образцов (а) и давление газа на дне образцов (б): 1 — гороховая насыпка, 2 — песчаная насыпка, 3 — поролоновый цилиндр

кривых на рис. 2(б), однозначно согласуется с проницаемостью ПС. Например, насыпная плотность гороха мала, скелет слабо консолидирован, поэтому прошедший сигнал ослабляется мало, тогда как для плотного песка амплитуда прошедшей волны значительно снижена.

4. Ударные волны в слоистых образцах

В природе и технике часто встречаются пористые среды с резкими неоднородностями, которые носят слоистый характер. В данной работе сопоставляется поведение ударных волн в чистых и слоистых средах. Слоистые образцы имели высоту 34 см и были сформированы из двух однородных пористых слоев высотой 17 см каждый.

Сравнение диаграмм для слоистых и однородных пористых образцов, показывает, что форма отраженной ударной волны всецело зависит от свойств верхнего слоя. Поэтому картина отраженных волн не приводятся.

В проходящих волнах наблюдается сильная зависимость от взаимной ориентации слоев. Из рис. 3 можно видеть, что фильтрационная составляющая, прошедшая среду в порядке «горох–песок» оказывается более интенсивной, чем прошедшая в по-

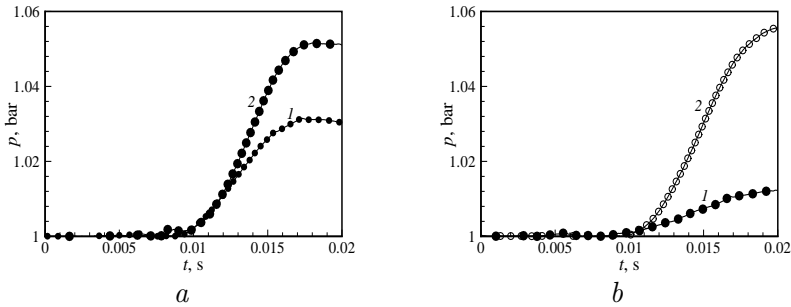


Рис. 3. Фильтрационные волны на дне различно ориентированных слоистых пористых сред. «Песок–горох» (а): 1 — прямой порядок, 2 — обратный порядок. «Песок–поролон» (б): 1 — прямой порядок, 2 — обратный порядок

рядке «песок–горох», т.к. нелинейность среды ведет к неаддитивности давления. То же самое выполняется и для поролоно-песчаного образца.

Никаких прямых свидетельств того, что в среде есть слои с разными характеристиками ни проходящие, ни отраженные волны не несут. Волны, отраженные от межслойной границы, значительно ослабляются и не выходят из образца. Однако, по результатам акустического исследования можно судить о взаимной ориентации слоев, если заранее известно о слоистом характере среды.

5. Математическое моделирование

В предположении жесткости скелета [4] течение газа описывается уравнениями механики многофазных систем [10] как вне ПС, так и внутри, с учетом зависимости $\alpha(x) = \alpha_0 + (1 - \alpha_0) \times \mathcal{H}(-x)$. Это дает возможность избежать постановки дополнительных граничных условий на границе раздела «воздух–ПС». Процесс будем считать адиабатическим. Пользуясь тем, что $\partial\alpha/\partial t = 0$, можно записать следующую систему уравнений динамики газа:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v) &= -\frac{\rho v}{\alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial x}; \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v^2 + p) &= -\frac{F}{\alpha} - \frac{\rho v^2}{\alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial x}; \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho e) + \frac{\partial}{\partial x}[\rho v(e + h - u)] &= -\frac{Fv}{\alpha} - \frac{v(e + p)}{\alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial x}, \end{aligned} \quad (1)$$

где t — время; ρ — плотность; v — скорость p — давление; $e = u + v^2/2$ — удельная полная энергия; u — удельная внутренняя энергия; $h = u + p/\rho$ — удельная энтальпия; F — межфазная сила трения на единицу объема ПС. Ось x направлена вдоль оси трубы, а начало координат совпадает с положением границы ПС.

Для воздуха в условиях, близких к нормальным, хорошо выполняется приближение политропного газа:

$$u = \frac{p}{\rho(\gamma - 1)}. \quad (2)$$

При описании силового взаимодействия фаз ограничимся квазистационарной составляющей:

$$\begin{aligned} F &= \alpha(1 - \alpha)K_\eta \frac{\eta v}{d^2}; \\ K_\eta &= \begin{cases} \frac{3}{\alpha^2} \left(54,45 \frac{1 - \alpha}{\alpha} + 0,45 \text{Re} \right), & \text{Re} \gtrsim 3000; \\ \frac{3,44}{\alpha^2} \left(\frac{1 - \alpha}{\alpha} \right)^{0,14} \text{Re}^{0,86}, & \text{Re} \lesssim 3000, \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

взяв полуэмпирическую формулу для коэффициента сопротивления K_η , рекомендованную в [9], где $\text{Re} = \rho v d / \eta$ — местное число Рейнольдса обтекания зерна скелета, а η — вязкость газа.

Моделировался эксперимент [13] по отражению ударной волны амплитудой $\Delta p = 0,38$ бар от насыпки частиц диаметром $d = 3$ мм, высотой $H = 56$ мм. Рассматривался участок ударной трубы с пористым образцом в области $-b \leq x \leq H$, захватывающей положение датчика $P2$. Математическая постановка задачи включает в себя уравнения (1)–(3), дополненные начальными условиями:

$$\begin{cases} p = p_S, & \rho = \rho_S, & v = v_S, & (-b \leq x \leq -b/2); \\ p = p_0, & \rho = \rho_0, & v = 0, & (-b/2 < x \leq H), \end{cases} \quad (4)$$

которые задают падающую на поверхность ПС ударную волну, соответствующую условиям эксперимента. Справа от УВ газ находится под давлением $p_0 = 1$ бар, его плотность, найденная из уравнения Менделеева–Клапейрона для температуры $T_0 = 298$ К, составляет $\rho_0 = 1,18$ кг/м³. Скорость движения волны D , скорость потока v_S и плотность газа ρ_S за скачком рассчитаны с помощью соотношений Рэнкина–Гюгонио [9] и равны $D = 391$ м/с, $v_S = 79,3$ м/с, $\rho_S = 1,48$ кг/м³. На правой границе области задавались условия на жесткой стенке, а слева — неотражающие граничные условия, соответствующие воображаемой границе в непрерывном потоке среды. Физические свойства воздуха при температуре $T_0 = 298$ К и давлении $p_0 = 1$ бар следующие [11]: вязкость $\eta = 1,85 \cdot 10^{-5}$ Па·с, показатель адиабаты $\gamma = 1,4$, молярная масса $\mu = 29$ г/моль. «Буферное» расстояние $b = H = 56$ мм. Решение получено с помощью численной схемы типа WENO 5-го порядка точности [12] на сетке из $N = 450$ узлов.

Экспериментальные и расчетные зависимости давления от времени в точках $P1$ и $P2$, сведены на рис. 4. В качестве «репера» присутствует известное решение об отражении УВ в двухатомном газе от твердой стенки [9]. Из поведения решения видно, что отраженная волна несет информацию о ПС, с которой вступала в контакт: дефицит амплитуды при отражении по сравнению с отражением от твердой стенки зависит от «просветности» поверхностного слоя. За фронтом УВ следует область с некоторым градиентом давления, величина которого определяется проницаемостью среды [2, 4]. Эти факты и лежат в основе идей о создании экспресс-методов ударно-волнового зондирования.

Получено удовлетворительное согласие результатов расчетов и измерений даже в количественном отношении, что указывает на правильную постановку задачи и точность модели.

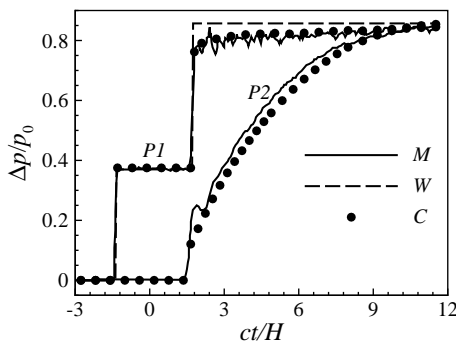


Рис. 4. Осциллограммы давления над поверхностью раздела ($P1$) и на дне пористого образца ($P2$) при падении ударной волны на границу ПС: M — измерения [13], W — отражение от жесткой стенки, C — численное решение

6. Заключение

Экспериментальные исследования, предпринятые в работе, устанавливают связь между изменением формы отраженных и проходящих УВ с параметрами среды. Имеется хорошее соответствие ослабления переднего фронта отраженной волны с увеличением проницаемости ПС. Амплитуда фильтрационной волны при этом, наоборот, пропорционально уменьшается. Проходящая волна может дать информацию о взаимной ориентации слоев в среде, если заведомо известно ее слоистое строение. Разработанная математическая модель адекватно отражает распространение фильтрационной волны. Полученные результаты позволяют говорить о возможности создания практической методики дистанционного зондирования прискважинной зоны пласта. Дальнейшая работа должна быть связана с теоретическим моделированием и более глубокой обработкой экспериментальных данных.

Список литературы

- [1] Булатова З. А., Шагапов В. Ш. К теории акустического зондирования прискважинных областей пористых и проницаемых горных пород // Геофизический журнал. 2002. Т. 24, № 2. С. 79–91.

- [2] Шагапов В. Ш., Султанов А. Ш., Урманчиев С. Ф. К решению задачи об отражении линейных волн в флюиде от насыщенного этим флюидом пористого полупространства // Прикладная механика и техническая физика. 2006. Т. 47, № 5. С. 16–26.
- [3] Гельфанд Б. Е., Губанов А. Б., Тимофеев Е. И. Взаимодействие воздушных ударных волн с пористым экраном // Известия АН СССР, Механика жидкости и газа. 1983. № 4. С. 54–79.
- [4] Britan A., Ben-Dor G., Elperin T., Igra O., Jiang J. P. Gas filtration during the impact of weak shock waves on granular layer // Int. J. of Multiphase Flow. 1997. V. 3, № 3. P. 473–491.
- [5] Кутушев А. Г., Родионов С. П. Численное исследование влияния параметров слоя насыщенной среды и падающей ударной волны на давление на экранируемой плоской стенке // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35, № 2. С. 105–113.
- [6] Азаматов А. Ш., Ахметов А. Т., Балапанов Д. М., Лукин С. В., Камалов З. Г., Набиев Р. Ф., Тимерханов В. В. Особенности отражения и прохождения ударных волн через слоистые и пористые структуры // Динамика сплошной среды. 2010. Т. 126. С. 11–19.
- [7] 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.
- [8] Аэров М. Э., Тодес О. М., Наринский Д. А. Аппараты со стационарным зернистым слоем: Гидравлические и тепловые основы работы. Л.: Химия, 1979. 176 с.
- [9] Овсянников Л. В. Лекции по основам газовой динамики. М.: Наука, 1981. 368 с.
- [10] Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред: В 2 Т. М.: Наука, 1987. Т. 1. 464 с.
- [11] Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 720 с.
- [12] Ch.-W. Shu. High order ENO and WENO schemes for computational fluid dynamics, in High Order Methods for Computational Physics, T.J. Barth and H. Deconinck, editors, Lecture Notes in Computational Science and Engineering. Springer. 1999. V. 9. P. 439–582.
- [13] Wisse C. J. On frequency dependence of acoustic waves in porous cylinders. PhD Thesis, Delft University of Technology, 1999. 130 p.