

ХАРАКТЕР РАЗРУШЕНИЯ И ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОРИСТОЙ ГАЗОНАСЫЩЕННОЙ СРЕДЫ ПОСЛЕ ПРОВЕДЕНИЯ КАМУФЛЕТНОГО ВЗРЫВА

А. Н. Бовт, А. В. Васильев, Е. Е. Ловецкий, В. И. Селяков,
В. К. Сироткин, Е. А. Шурьгин

(Москва)

В случае проведения камуфлетного взрыва в пористой газонасыщенной среде характер изменения фильтрационных свойств существенно зависит от начальной пористости среды. С целью изучения зависимости изменения проницаемости, вызванного камуфлетным взрывом, от начальной пористости среды проведены лабораторные эксперименты с искусственно подготовленными моделями пористого коллектора, имевшими различные значения пористости. Результаты экспериментов указывают на наличие качественно различного поведения коэффициента проницаемости после взрыва в средах с пористостями $m_0 < 15$ и $< 15\%$. Предлагается перколяционная модель, объясняющая этот эффект изменением структуры порового пространства. Конкретные механизмы, приводящие к возникновению такого эффекта, могут быть разнообразны: раздавливание зерен, разрушение межзеренного цемента и т. д.

1. Методика эксперимента. Лабораторные опыты с камуфлетными взрывами сферического заряда тэна весом от 0,5 до 2 г проводились в средах с начальной пористостью $m_0 = 25, 18$ и 10% , поры которых содержали воздух. Лабораторная модель представляла собой металлический цилиндр диаметром 300 и высотой 350 мм, по оси цилиндра для размещения заряда в центре модели образовывался канал. Пористая среда, заполняющая цилиндр, представляла собой смесь обогащенного песка, известковой муки, кремнефторида натрия и жидкого стекла. Эта смесь прессовалась давлением в 6 и 14 МПа и выдерживалась в печи в течение 55 ч при температуре около 100°C . Таким образом, удавалось получить среду с пористостью 25 и 18% и проницаемостью соответственно 300 и 100 мД. Для получения среды пористостью около 10% использовалась смесь крупного песка, портландцемента и воды, которая после виброукладки выдерживалась в течение 8 ч в пропарочной камере при температуре 90°C . Проницаемость такой среды не превышала 10 мД.

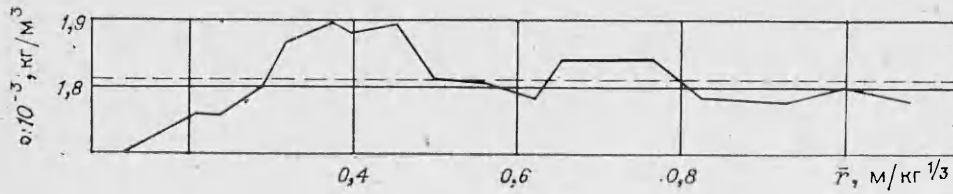
Основные физико-механические свойства сред с пористостью 25 и 18%: соответственно прочность на раздавливание $\sigma^* = 20$ и 28 МПа, скорость продольных упругих волн $c_l = 3000$ и 3500 м/с; для среды с пористостью 10% $\sigma^* \approx 35-40$ МПа, $c_l = 4000$ м/с.

В опытах изучались характер и состояние среды вокруг взрывной полости и изменение фильтрационных характеристик среды.

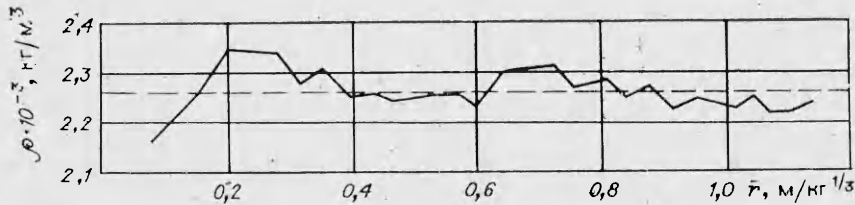
Характер разрушения и состояния среды исследовался визуально и путем прямого измерения плотности среды от полости взрыва к периферии, а изменение фильтрационных свойств — путем сопоставления до- и послевзрывных фильтрационных характеристик среды.

Методика визуального изучения характера разрушения среды такова. После взрыва и снятия фильтрационных характеристик среда освобождалась от металлической оболочки и распиливалась в поперечном сечении в плоскости заложения заряда. При этом определялись размер полости, трещины, общее состояние среды вокруг полости и состояние трубок для измерения фильтрационных свойств.

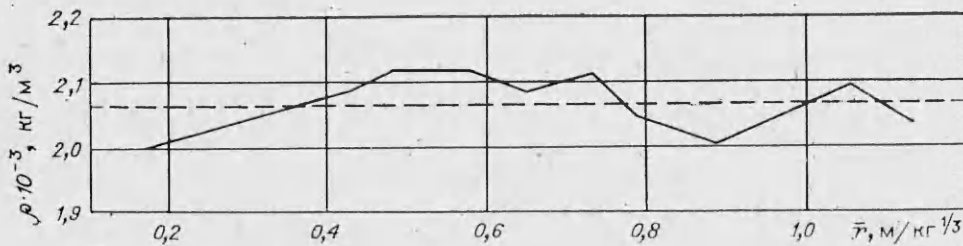
Для измерения плотности среды от полости взрыва к периферии применялся денситометрический метод регистрации рассеянного гамма-излучения в модификации просвечивания узким пучком гамма-квантов. Измерение распределения плотности в среде производилось на дисках толщиной до 5 см, выпиленных из модели после взрыва в плоскости заложения заряда. Измерение осуществлялось по радиусам из центра, шаг измерений изменялся от 1 см на периферии до 0,5 см в центральной части диска.



Р и с. 1



Р и с. 2



Р и с. 3

Для исследования фильтрационных параметров среды при изготовлении модели на различных удалениях от заряда размещались 8—9 трубок диаметром 3 мм. Концы трубок перфорировались на длине 18—20 мм, противоположные концы их, выходящие из модели, соединялись со схемой измерений. В опытах определялся установившийся расход Q воздуха и соответствующий ему перепад давления Δp между парами трубок до и после взрыва. В качестве фильтрационной характеристики принималось соотношение $\Gamma = Q/\Delta p^2$, изменение фильтрационных свойств среды в результате взрыва оценивалось отношением Γ/Γ_0 (индекс 0 относится к довзрывным испытаниям). Подробно методика изложена в [1].

2. Результаты экспериментов. Во всех случаях вокруг полости, которая по форме близка к сферической, выделяется зона с измененным цветом, которую можно определить как спрессованный, но слабосвязанный материал, представляющий собой агрегаты зерен среды. Трецины, окрашенные взрывными газами, прослеживаются от границы полости и пересекают зону спрессованного материала. Общее их количество 3—5 штук, раскрытие менее 0,5 мм. Фильтрационные трубки повреждений не получали.

Результаты исследований плотности среды от полости к периферии, осредненные по всем радиусам для данной среды, показаны на рис. 1—3 для $m_0 = 25, 18, 10\%$ соответственно (штриховые линии — средняя плотность, равная среднеарифметическому значению общего числа замеров и принимаемая за начальную плотность среды). Видно, что последовательно от полости для сред с различной исходной пористостью выделяются зоны разрыхления и уплотнения. Протяженность зоны уплотнения по мере снижения исходной пористости среды возрастает. Плотность среды в зоне разрыхления снижается на $\sim 15\%$, в зоне уплотнения

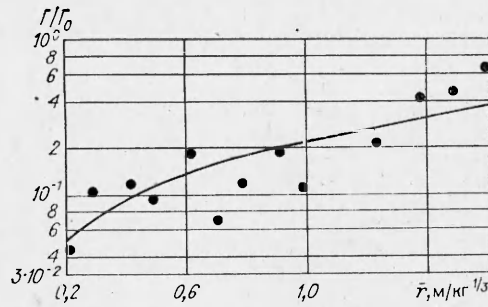


Рис. 4

проницаемости наблюдается вблизи полости (в $\sim 10^2$ раз). В среде с пористостью $m_0 = 18\%$ в диапазоне расстояний $\bar{r} = 0,24 - 1,4 \text{ м/кг}^{1/3}$ (внешняя граница) послевзрывные фильтрационные свойства также ухудшаются с максимумом на $\bar{r} = 0,24 \text{ м/кг}^{1/3}$ в ~ 4 раза, ближе $\bar{r} = 0,24$ изменение фильтрационных свойств не исследовано. Снижение пористости до $m_0 = 10\%$ приводит к радикальной смене закономерности изменения послевзрывных фильтрационных свойств. Немонотонная кривая рис. 6 содержит последовательно от полости три области с различным характером изменения фильтрационных свойств и лежит выше исходных до взрывных значений. Первая область, радиус которой $\bar{r} \approx 0,3 \text{ м/кг}^{1/3}$, характеризуется снижением проницаемости от центра к границе, второй области присущ минимум увеличения проницаемости, а третья имеет внешнюю границу на $\bar{r} = 2,0 \text{ м/кг}^{1/3}$ и охватывает большой объем среды с улучшенными фильтрационными свойствами.

Из представленных данных обращают на себя внимание следующие факты. Кажется парадоксальным, что, несмотря на разрыхление вблизи полости для сред с $m_0 = 25$ и 18% , наблюдается ухудшение проницаемости, причем в наиболее разрыхленной части оно максимальное. За пределами зоны уплотнения во всех случаях отмечено изменение фильтрационных свойств, хотя другими методами изменения в среде не обнаружены. И, наконец, дальнейшее снижение пористости приводит к смене закономерности изменения фильтрационных свойств среды.

3. Перколяционная модель изменения проницаемости зернистой среды.

Для объяснения экспериментально обнаруженного эффекта рассмотрим подробнее структуру порового пространства коллектора, который представляет собой совокупность зерен, соединенных между собой цементирующим веществом. Одна часть межзеренного пространства занята цементом, а другая — поровое пространство коллектора. Перколяционная модель проницаемости зернистых сред предложена в [2]. С точки зрения теории перколяции межзеренное пространство представляет собой узлы, соединенные узкими каналами (связями). Часть узлов забита цементирующим веществом, а остальные способны пропускать флюид. Теория перколяции устанавливает, что при определенной доле x проводящих узлов в бесконечной среде возникают непрерывные цепочки проводящих узлов (бесконечный кластер), по которым может осуществляться фильтра-

увеличивается в среднем на 5—10%. Выявленные деформации сред показаны в таблице.

На рис. 4—6 представлены функции изменения проницаемости газонасыщенных сред при камуфлетном взрыве соответственно для сред с начальной пористостью 25, 18 и 10%.

Для среды с пористостью $m_0 = 25\%$ послевзрывные фильтрационные свойства ухудшаются до $\bar{r} = 2 \text{ м/кг}^{1/3}$, причем минимум

Начальная пористость $m_0, \%$	Размер зоны, $\text{м/кг}^{1/3}$				
	Радиус полости $\bar{r}_п$	Радиус интенсивного разрушения (изменение цвета) $\bar{r}_{и.р}$	Радиус поровых трещин $\bar{r}_т$	Радиус разрыхления $\bar{r}_р$	Интервал уплотнения $\bar{r}_у$
25	0,12	0,26	0,4	0,3	0,3—0,5
18	0,1	0,27	0,6	0,2	0,2—0,35
10	0,08	0,29	0,8	0,3	0,3—0,9

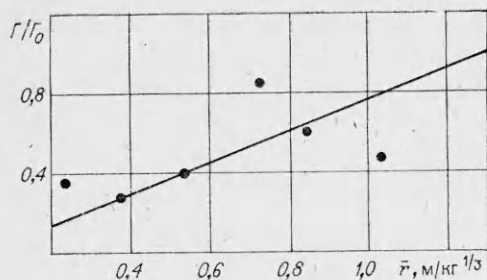


Рис. 5

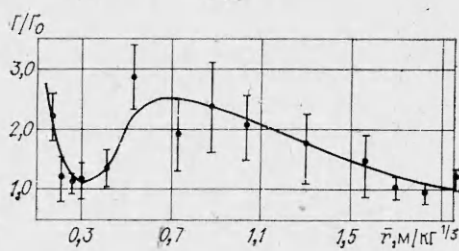


Рис. 6

дия флюида. При меньшей доле бесконечный кластер не образуется и фильтрация невозможна. Эта критическая величина называется порогом протекания P_c и зависит от топологии задачи — ее размерности и структуры размещения узлов в пространстве. В области $x > P_c$ проницаемость зернистой среды описывается формулой [2]

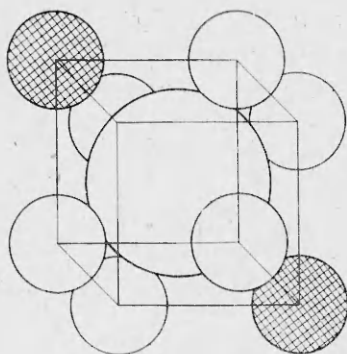
$$(3.1) \quad K = 2 \cdot 10^{-3} \frac{m_0^3 d^2}{(1 - m_0)^3} (x - P_c)^t \eta(x - P_c).$$

Здесь $m_0 = 1 - V_3/V$; V_3 — объем, занимаемый зернами; V — полный объем среды (назовем m_0 структурной пористостью); x — доля проводящих межзеренных узлов от их общего числа (при случайном распределении в пространстве проводящих и непроводящих узлов величина x равна вероятности какому-то узлу быть проводящим); t — индекс, зависящий только от размерности задачи (для трехмерного пространства $t = 1,7 \pm \pm 0,2$); $\eta(x - P_c)$ — единичная функция Хевисайда; d — диаметр зерна.

При прохождении ударной волны (УВ), вызванной камуфлетным взрывом, может происходить разрушение самого слабого места межзеренных контактов: либо пластичное течение цементирующего вещества, либо разрушение межзеренных контактов, полностью свободных от цемента. Конкретный механизм в том или ином случае зависит от строения и состава зерен породы и межзеренного цементирующего вещества. Разрушение межзеренных контактов может приводить к заполнению продуктами разрушения прилегающего порового пространства. Таким образом, происходят перестройка структуры порового пространства и изменение фильтрационных свойств среды. В дальнейшем для определенности причиной заполнения межзеренных узлов порового пространства будем считать разрушение зерен на контактах, между которыми отсутствует цемент.

При проведении камуфлетного взрыва среда в зоне дробления разбивается на блоки, последующее движение которых за счет эффекта дилатансии приводит к возникновению межблоковой пористости. Результирующие фильтрационные свойства среды определяются суммой проницаемости блоков и межблокового пространства (дилатансионной проницаемостью). Для малопористых пород доля полностью свободных от цемента межзеренных контактов ничтожно мала. Соответственно и перестройка структуры порового пространства дает пренебрежимо малый вклад в изменение проницаемости блоков. Основным механизмом улучшения фильтрационных свойств малопористых сред — дилатансионное разуплотнение [3], чем объясняется улучшение коэффициента проницаемости во всей области, испытавшей воздействие взрыва.

В среде с высокой начальной пористостью находится много межзеренных контактов, полностью лишенных цементирующего вещества. В этом случае коэффициент проницаемости блоков может существенно превышать дилатансионную проницаемость, которая быстро убывает с ростом расстояния и вносит незначительный вклад в изменение фильтрационных свойств среды практически во всей области действия взрыва, за иск-



Р и с. 7

лучением узкой зоны, непосредственно прилегающей к камуфлетной полости, в которой происходят сильное измельчение среды и ее сдвиг. Размеры указанной зоны легко найти из неравенства $K_d(r) < K_0$, где K_d — дилатационная проницаемость, определенная в [3], а K_0 — начальная проницаемость среды. За пределами указанной области сильного измельчения материала коллектора при прохождении УВ, вызванной взрывом, зерна, имеющие бесцементные контакты, разрушаются, а продукты разрушения зерна заполняют окружающее поровое пространство. Таким образом, происходит уменьшение проводящей пористости за счет перестройки структуры порового пространства, что вызывает, в свою очередь, ухудшение проницаемости.

Рассмотрим сначала наиболее простой случай регулярной упаковки сферических зерен одного радиуса в простую кубическую решетку. Частично структурная пористость занята межзеренным цементом, а частично свободна. Свободная часть структурной пористости составляет поровое пространство породы-коллектора. Величину истинной пористости обозначим через m . Тогда $x = m/m_0$ — доля структурной пористости, свободной от цементирующего вещества.

С другой стороны, x — вероятность того, что узел является проводящим. Посмотрим на эту упаковку с точки зрения теории перколяции. Каждое зерно окружают восемь межзеренных узлов, центры которых лежат в углах куба (рис. 7). Видно, что межзеренные узлы образуют правильную систему с простой кубической решеткой. Эти узлы либо забиты цементом и непроницаемы, либо свободны от цемента. Совокупность свободных от цемента узлов составляет проводящий кластер. Доля проводящих узлов от их полного числа есть $x = m/m_0$. В зависимости от величины x среда может быть проводящей или нет. Критическое значение для задачи узлов на простой кубической решетке $x_c = 0,31$, а величина структурной пористости $m_c = 0,48$ [2].

Разрушение зерна с вероятностью α будет происходить, если хотя бы на одной грани кубической решетки, изображенной на рис. 7, все четыре узла не будут содержать цемента. Обломки разрушенного зерна заполняют все свободные узлы таким образом, что превращают их в непроводящие, это изменяет структуру проводящего кластера. Определим вероятность P того, что зерно имеет свободную грань. Вероятность разрушения зерна определяется суммой вероятностей пяти независимых событий: когда пустыми окажутся все восемь узлов, семь, шесть, пять и четыре. Обозначим вероятности этих событий через P_8, P_7, P_6, P_5, P_4 . Вероятность $P_8 = x^8$, поскольку представляет совпадение восьми независимых событий, вероятность каждого из которых есть x . Соответственно $P_7 = x^7(1 - x)$. Поскольку заполненным цементом узлом может быть любой из восьми окружающих зерно узлов, то при вычислении P необходимо к P_8 прибавить $8P_7$. Вероятность $P_6 = x^6(1 - x)^2$. Из всех возможных сочетаний из восьми узлов по два нужно исключить четыре таких, когда два зацементированных узла расположены на противоположных концах диагонали куба, поскольку в этом случае нет ни одной грани, на которой все четыре узла были бы пустыми. На рис. 7 представлена одна из таких возможных комбинаций, где узлы, занятые цементом, заштрихованы. Видно, что при таком расположении зацементированных узлов нет ни одной грани решетки, полностью свободной от цементирующего вещества. Тогда вклад в вероятность разрушения зерна от сочетаний шести пустых и двух зацементированных узлов будет равен $24P_6$. Аналогичным образом вклад от сочетаний пяти пустых и трех забитых узлов дает $24P_5$, где $P_5 = (1 - x)^3x^5$, а от сочетаний четырех пус-

тых и забитых узлов — $6P_4$, где $P_4 = x^4(1-x)^4$. Таким образом, вероятность $P = P_8 + 8P_7 + 24P_6 + 24P_5 + 6P_4$.

Поскольку при разрушении зерна происходит забивание свободных узлов, то необходимо определить среднюю долю вновь забитых узлов, приходящихся на одно зерно P_1 . Зная P , легко понять, что

$$(3.2) \quad P_1 = \frac{1}{8}(8P_8 + 7 \cdot 8P_7 + 6 \cdot 24P_6 + 5 \cdot 24P_5 + 4 \cdot 6P_4).$$

Множители, появившиеся перед слагаемыми, стоящими в скобках, определяются числом пустых узлов в соответствующих случаях. Поскольку на долю одной ячейки решетки приходится по $1/8$ части от каждого узла, то вся скобка умножена на $1/8$. Зная P_1 , можно определить долю свободных от цемента узлов после разрушения $x' = x - P_1\alpha$ (α — вероятность разрушения зерна, имеющего свободную от цемента грань). Теперь легко найти изменение K/K_0 после взрыва, используя выражение для измененной доли проводящих узлов $x' = x - \alpha P_1$. Как следует из формулы (3.1),

$$(3.3) \quad \frac{K}{K_0} = \left(\frac{x' - P_c}{x - P_c} \right)^t = \left(1 - \frac{\alpha P_1}{x - P_c} \right)^t,$$

где P_1 определяется формулой (3.2). Зависимость относительного изменения коэффициента проницаемости от величины x приведена на рис. 8 для $\alpha = 0,5$. Поскольку m_0 среды однозначно связана с вероятностью проводимости узла $x = m/m_0$, то зависимость (3.3) является зависимостью изменения фильтрационных свойств среды от начальной пористости. С целью иллюстрации этой зависимости на горизонтальной оси нанесены соответствующие значения пористости.

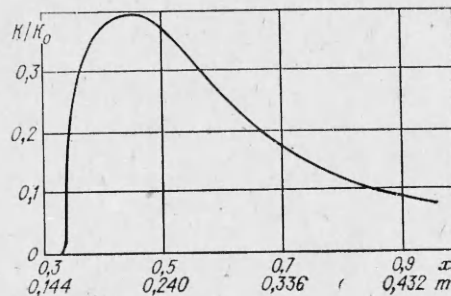
Из рис. 8 видно, что с удалением от порога протекания фильтрационные характеристики монотонно ухудшаются. Физически это связано с тем, что с увеличением начальной пористости возрастает число межзеренных контактов, свободных от цементирующего вещества, разрушение которых вызывает перестройку структуры порового пространства. Чем больше «голых» контактов, тем сильнее влияние изменения порового пространства и тем больше уменьшается проницаемость. Резкое ухудшение проницаемости вблизи порога протекания объясняется тем, что в этой области в проницаемой среде очень мало проводящих цепочек, составляющих бесконечный кластер, а число свободных от цементирующего вещества контактов достаточно велико, чтобы при своем разрушении уменьшить долю проводящих узлов до величины ниже порога протекания P_c .

В рассмотренном случае упаковки в виде простой кубической решетки среда становится проницаемой только при $m > m_* = 0,15$ (m_* — критическая пористость, соответствующая порогу протекания среды [2]).

Кроме простейшего случая периодической укладки шаров в кубическую решетку, возможны и другие способы укладки: укладка в виде объемно-центрированной и гранецентрированной кубических решеток. Соответствующие пороговые значения пористостей равны для объемно-центрированной решетки $m_* = 8\%$, а для гранецентрированной $m_* = 5\%$.

Для случаев регулярной упаковки зерен в виде объемно-центрированной или гранецентрированной кубической решетки остается в силе соотношение (3.3), в котором только изменяются численные значения P_c и P_1 . При этом полностью сохраняются все качественные стороны зависимости изменения проницаемости от величины начальной пористости.

Реальная зернистая среда представляет собой смешение зерен раз-



Р и с. 8

ных размеров. На различных масштабных уровнях в реальной среде в небольших объемах могут реализовываться различные типы упаковки зерен. Однако независимо от упаковки среды с $m_0 < 0,05$ будут вести себя при взрыве как монолит, поскольку в них отсутствуют проводящие цепочки из межзеренных узлов и изменение структуры порового пространства не вносит изменений в проницаемость блоков. В среде с $m_0 > 0,15$ вне зависимости от реальной упаковки зерен всегда находится значительное число проводящих межзеренных узлов, которые образуют разветвленный бесконечный проводящий кластер. При воздействии взрыва на такие среды происходит значительная перестройка порового пространства (поскольку при обилии проводящих узлов в среде имеется много межзеренных контактов, полностью лишенных цементирующего вещества). Это приводит к заметному ухудшению фильтрационных свойств. С другой стороны, начальная проницаемость высокопористых сред ($m_0 > 0,15$) значительно превышает дилатансионную проницаемость везде, за исключением небольшой области, непосредственно прилегающей к камуфлетной полости. Поэтому изменение начальной проницаемости среды за счет перестройки порового пространства оказывается доминирующим эффектом и определяет результирующее ухудшение проницаемости среды.

Среды с начальными пористостями от 0,05 до 0,15 образуют класс с переходными свойствами. Поведение коэффициента проницаемости после камуфлетного взрыва в таких средах определяется как механизмом дилатансионного разуплотнения блоков, так и механизмом перестройки порового пространства внутри блоков.

Интересно отметить, что внутри диапазона от 5 до 15% имеется характерное значение $m_* \sim 8\%$, соответствующее объемно центрированной упаковке. При $m_0 > 8\%$ напряжения в УВ могут приводить к перестройке структуры порового пространства в среде с таким типом упаковки. Поэтому в диапазоне от 8 до 15% действие УВ на зернистые среды приводит к более существенным изменениям проницаемости среды по сравнению с интервалом от 5 до 8%.

Указанные значения характерных пористостей 5, 8 и 15% приближенные, поскольку значения порогов протекания известны с точностью порядка 2%. Соответственно неточность определения m_* достигает одного процента, и реальное значение m_* находится в пределах $\pm 0,01$.

4. Радиальная зависимость изменения коэффициента проницаемости зернистой среды после взрыва. Физическая причина разрушения зерен — вызванная взрывом УВ. В реальной среде зерна различны по размеру. Будем считать, что зерна имеют близкую к сферической форму, а распределение зерен по диаметру описывается функцией распределения $f(a)$, которая нормирована на единицу. Согласно закону Холла—Петча [4], прочность зерна обратно пропорциональна корню квадратному из размеров зерна. Поскольку при распространении УВ от центра взрыва ее интенсивность убывает, то с ростом расстояния минимальный размер разрушаемых зерен возрастает. Таким образом, доля зерен, которые могут быть разрушены напряжениями на фронте УВ, уменьшится с ростом расстояния от центра взрыва. Соответственно в меньшей степени будет перестраиваться поровое пространство, и, следовательно, меньше изменится коэффициент проницаемости. Рассмотрим функцию $f(a)$ в виде

$$f(a) = \frac{a}{a_c^2} \exp(-a/a_c).$$

Для выбранной функции $f(a)$ доля зерен с размером, превышающим a , есть

$$P_2 = (a/a_c + 1) \exp(-a/a_c).$$

В силу закона Холла—Петча разрушению напряжением подвергнутся только те зерна, размеры которых превышают $a \geq A/\sigma^2$, где A — константа. Зависимость напряжения σ на фронте УВ от расстояния исследовалась экспериментально для широкого класса горных пород и пород-

коллекторов [1]. Как показали эксперименты, напряжения на фронте УВ затухают с расстоянием по степенному закону $\sigma = B(r_0/r)^\beta$, где β в интересующей нас области можно положить равным 2. Теперь зависимость минимального размера разрушаемого зерна от расстояния от центра взрыва запишем в виде

$$a(r) = D \left(\frac{r}{r_0} \right)^{2\beta},$$

где $D = A/B^2$. Доля зерен с размером, превышающим $a(r)$, есть

$$(4.1) \quad P_2 = \left(\frac{Dr^{2\beta}}{a_c r_0^{2\beta}} + 1 \right) \exp \left(- \frac{Dr^{2\beta}}{a_c r_0^{2\beta}} \right).$$

Поскольку из всех зерен, находящихся на расстоянии r от центра взрыва, могут разрушаться только P_2 от их общего числа, то в формуле (3.3) для изменения проницаемости $\alpha = P_2$

$$(4.2) \quad \frac{K}{K_0} = \left[1 - \frac{P_1 \left(\frac{Dr^{2\beta}}{a_c r_0^{2\beta}} + 1 \right) \exp \left(- \frac{Dr^{2\beta}}{a_c r_0^{2\beta}} \right)}{x - P_c} \right]^t.$$

Зависимость (4.2) определяет изменение проницаемости пористой газонасыщенной среды как функцию расстояния от центра взрыва. График зависимости (4.2) представлен на рис. 9 для $P_1 = 0,21$, $x = 0,5$, $P_c = -0,2$, $D/a_c = 10^{-4}$, $\beta = 2$. Сравнение приведенной на рис. 9 кривой с экспериментальной (см. рис. 4) для $m_0 = 25\%$ показывает хорошее совпадение теории и эксперимента.

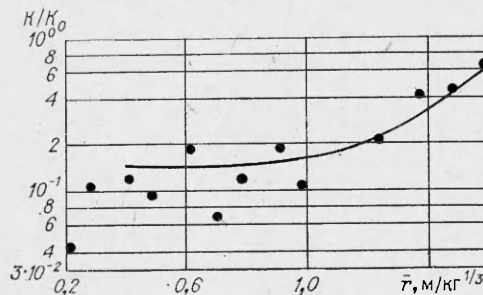
Результаты экспериментального изучения зависимости коэффициента проницаемости от величины начальной пористости среды после проведения камуфлетного взрыва показывают, что с ростом начальной пористости происходит смена характера поведения проницаемости от улучшения фильтрационных характеристик к ухудшению. Вместе с тем вблизи полости камуфлетного взрыва всегда наблюдается некоторое разуплотнение среды, характеризующее уменьшением средней плотности вблизи полости.

Теоретическая модель изменения фильтрационных свойств после взрыва, основанная на представлениях теории перколяции, объясняет наблюдаемую на эксперименте зависимость проницаемости после взрыва от начальной пористости изменением структуры порового пространства под воздействием взрыва. При малой пористости ($m_0 < 0,05$) влияние изменения структуры порового пространства не сказывается на проницаемости блоков и изменение проницаемости определяется дилатансионным разуплотнением среды.

При увеличении начальной пористости изменение структуры порового пространства начинает вносить все более заметный вклад в суммарное изменение проницаемости.

Для сред с пористостями в интервале от 0,05 до 0,15 в изменение проницаемости вносит вклад механизм как дилатансионного разуплотнения, так и перестройки порового пространства. В высокопористых средах ($m_0 > 0,15$) относительное ухудшение проницаемости за счет перестройки структуры порового пространства преобладает над дилатансионным улучшением фильтрационных свойств. Это объясняет результирующее ухудшение проницаемости высокопористых сред после взрыва.

В США осуществлены мощные взрывы в газоносных пластах по проектам «Газбагги» и «Рио-Бланка». Взрывы по проекту «Рио-



Р и с. 9

Бланка» проведены в газоносном пласте с $m_0 = 26\%$, по проекту «Газбагги» — в газоносном пласте с $m_0 = 11,8\%$. В результате взрыва «Рио-Бланка» проницаемость среды ухудшилась [6], несмотря на разрыхление вблизи полости [7]. При взрыве «Газбагги» проницаемость возросла до приведенных расстояний $r = 0,3 \text{ м/кг}^{1/3}$ от заряда [5]; американские исследователи предположили, что далее этих расстояний проницаемость пласта не изменилась по сравнению с фоновой.

Приведенные данные свидетельствуют об идентичном характере разрушения и изменения фильтрационных свойств сред с одинаковой начальной пористостью в натуральных и лабораторных опытах, что подтверждает объективность полученных в работе выводов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бовт А. Н., Мясников К. В. и др. Камуфлетный взрыв в пористой среде // ПМТФ.— 1981.— № 6.
2. Ловецкий Е. Е., Селяков В. Н. Перколяционные модели фильтрационных свойств среды // Изв. АН СССР. МЖГ.— 1984.— № 3.
3. Кадет В. В., Ловецкий Е. Е. и др. Влияние камуфлетного взрыва на фильтрационные характеристики хрупкой среды // ПМТФ.— 1981.— № 1.
4. Кобл Р. Л., Парих Н. М. Разрушение поликристаллической керамики // Разрушение.— М.: Мир, 1976.— Т. 7, ч. 1.
5. Lemon R. E., Patel H. G. The effect of nuclear stimulation of the formation permeability and gas recovery at project Gasbuggy // J. Petrol. Technol.— 1972.— V. 24.— P. 1199.
6. Durham W. B. Direct observation of explosively induced damage in sandstone with application to reservoir stimulation // Scanning Electron Microscopy.— Chicago, 1981.— Pt 1.
7. Shock R. N., Hanson M. E., Swift R. P., Walton O. R. In situ fracture related to energy and resource recovery // High Pressure Sci. and Technol.: Proc. 7th Intern. AIRART Conf., Le Crenot. 1979.— Oxford, e. a., 1980.— V. 2.

Поступила 6/II 1986 г.

УДК 539.3

ОДИН КЛАСС СИНГУЛЯРНО ВОЗМУЩЕННЫХ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ В ДВУМЕРНОЙ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ

Ю. А. Боган

(Новосибирск)

При изучении краевых задач для упругой среды, армированной одним семейством очень жестких волокон, в качестве предельной часто возникает модель упругой среды с нерастяжимыми волокнами: деформация вдоль заданного направления равна нулю [1]. Вопрос о корректности предельной модели практически не изучен, если не считать [2], где при довольно жестких предположениях о границе области рассмотрена краевая задача с заданным вектором напряжений на границе для нерастяжимой в заданном направлении среды и прямой арматуры.

В настоящей работе доказан ряд теорем о сходимости сингулярно возмущенных задач данного класса к решениям предельных в соответствующих гильбертовых пространствах, а также то, что предельная система уравнений может не совпадать с той, к которой приводит гипотеза нерастяжимости. Конкретный пример подобной ситуации приведен в [3].

1. В ортогональной криволинейной системе координат (α_1, α_2) на плоскости примем обобщенный закон Гука для ортотропного материала в виде [4]

$$(1.1) \quad \sigma_{11} = \varepsilon^{-2} e_{11} + b_{12} e_{22}, \quad \sigma_{22} = b_{12} e_{11} + b_{22} e_{22}, \quad \sigma_{12} = 2e_{12},$$

где напряжения безразмерны и отнесены к модулю сдвига G ; оси ортотропии совпадают с осями (α_1, α_2) ; $\varepsilon^{-2} = b_{11} G^{-1} \gg 1$; $\varepsilon \ll 1$; $b_{22} = \varepsilon^2 b_{12}^2 > 0$; $b_{22} > 0$. Деформации представляются через перемещения $u = (u_1, u_2)$ следующим образом:

$$e_{11} = \frac{1}{h_1} \frac{\partial u_1}{\partial \alpha_1} + \frac{1}{h_1 h_2} \frac{\partial h_1}{\partial \alpha_2} u_2,$$