

вазия, которые могут привести к потере устойчивости и способны вызвать большие деформации, разрушающие материал [10]. Возможно также проявление при нагреве больших локальных напряжений на неоднородностях материала [11].

Авторы благодарят И. В. Немчинова и Б. Д. Христофорова за полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Киселев Ю. Н., Христофоров Б. Д., Цикулин М. А. Экспериментальное исследование воздействия на преграду источников мощного излучения сплошного спектра // Низкотемпературная плазма в космосе и на Земле.— М.: ВАГО, 1977.
2. Левинсон Г. Р., Смилга В. П. Лазерная обработка тонких пленок // Квантовая электрон.— 1976.— Т. 3, № 8.
3. Киселев Ю. Н., Крохин В. З. Малоинерционные пироэлектрические приемники для регистрации излучения в диапазоне 40—1100 нм // ПМТФ.— 1976.— № 4.
4. Гуревич М. М. Введение в фотометрию.— Л.: Энергия, 1968.
5. Термодинамические свойства индивидуальных веществ.— Т. 1, кн. 2/Отв. ред. Глушко В. П.— М.: Недра, 1978.
6. Таблицы физических величин/Под ред. Кикоина И. К.— М.: Атомиздат, 1976.
7. Андержанов Э. К., Дивнов И. И., Зотов Н. И., Христофоров Б. Д. Разрушение поверхности твердых тел под действием излучения сильноточного разряда // 6-я Всесоюз. конф. «Динамика излучающего газа».— М.: Изд-во МГУ, 1987.
8. Ujihara K. Reflectivity of metals at high temperatures // IEEE J. Quant. electronics.— 1972.— V. QE-8, N 6.
9. Френкель Я. П. Собрание избранных трудов. Т. 3. Кинетическая теория жидкостей.— М.: АН СССР, 1959.
10. Андержанов Э. К., Дивнов И. И., Зотов Н. И. Механическая неустойчивость проводника при электрическом взрыве // ДАН СССР.— 1989.— Т. 304, № 4.
11. Родionов В. И., Сизов И. А., Цветков В. М. Основы геомеханики.— М.: Недра, 1986.

г. Москва

Поступила 4/V 1989 г.,
в окончательном варианте — 15/XI 1989 г.

УДК 622.235; 534.222

А. Н. Бовт, Е. Е. Ловецкий, А. М. Масленников,
Н. С. Ростовский, В. И. Селяков, Е. А. Шурыгин

ХАРАКТЕР РАЗРУШЕНИЯ И ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА НАСЫЩЕННОЙ ЖИДКОСТЬЮ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ ПРИ КАМУФЛЕТНОМ ВЗРЫВЕ

Известно, что в малопористых (типа гранита) средах механическое действие взрыва приводит к улучшению фильтрационных свойств среды во всей области действия взрыва, в высокопористых газонасыщенных — к резкому ухудшению фильтрационных свойств среды [1]. При взрыве в высокопористой цементированной насыщенной жидкостью среде имеет место немонотонное изменение ее фильтрационных параметров в окрестности камуфлетного взрыва с образованием зоны локального ухудшения, по сравнению с первоначальной, проницаемости [2]. Размер зоны, в которой происходит изменение фильтрационных характеристик среды, оказывается значительно больше, чем в случае действия взрыва той же мощности в монолитной среде типа гранита.

В данной работе приводятся результаты экспериментальных и теоретических исследований особенностей механического действия камуфлетного взрыва на пористые, насыщенные жидкостью среды. Изучаются причины, вызывающие качественное отличие радиальных зависимостей коэффициента проницаемости, соответствующих камуфлетному взрыву в средах с различной пористостью и насыщением.

1. Методика экспериментов. Опыты проводились в лабораторных условиях со взрывами сферических зарядов ТЭНа весом от 1 до 2 г в искусственно создаваемых цементированных пористых средах и в полевых условиях со взрывами зарядов ТГ-20/80 мощностью от 200 до 765 кг ТНТ в водонасыщенном карбонатном пласте.

Лабораторные опыты проводились в средах с начальной пористостью $m_0 = 25$ и 18% , помещенных в цилиндрическую емкость $d = 300$ и $h = 350$ мм.

Основные физико-механические свойства сухих сред пористостью 25 и 18 % соответственно составляли: прочность на раздавливание 20 и 28 МПа, скорость продольных упругих волн 3000 и 3500 м/с, проницаемость 300 и 100 МД. Выдержанность начальных свойств по сечению приготовлявшихся моделей определялась путем их прозвучивания до взрыва по нескольким радиусам от центра, а также измерения плотности на дисках толщиной 4—5 см, выпиленных из моделей, не подвергавшихся действию взрыва.

После приготовления поровое пространство моделей на 90—95 % насыщалось керосином. В опытах изучались характер разрушения среды и изменение фильтрационных характеристик. Характер разрушения определялся визуально и прямыми измерениями плотности и скорости звука в среде вокруг камуфлетной полости. Для исследования фильтрационных свойств среды при изготовлении модели на различных удалениях от заряда размещались 8—9 трубок из нержавеющей стали диаметром 3 мм. В качестве фильтрационной характеристики принималось отношение $\Gamma = Q/\Delta p$, где Q и Δp — установившийся расход керосина между парой трубок и соответствующий ему перепад давления. Изменение фильтрационных свойств среды в результате взрыва оценивалось отношением Γ/Γ_0 (Γ_0 — дозрывные свойства).

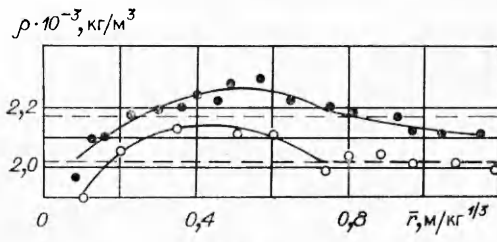
Подробно методика исследований изложена в [1, 2].

Опыты в полевых условиях проводились в водонасыщенном карбонатном пласте, залегающем на глубине 37—74 м. Свойства пород пласта по разрезу резко меняются, по площади — относительно выдержаны. Пласт характеризуется развитой системой естественной трещиноватости. В интервале глубин 41—44 м в разрезе присутствуют высококаверзные прослои, пористость которых существенно превышает пористость остальной части пласта и через которые происходит основная часть фильтрующейся жидкости. Физико-механические свойства пород пласта представлены без учета высококаверзной части пласта: пористость 21,2 %, плотность 2,2 г/см³, прочность на сжатие 460 кг/см², скорость упругих волн 3800 м/с.

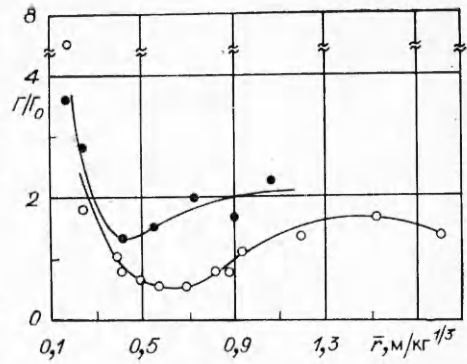
В процессе проведения опытов осуществлены взрывы на глубине 46 м сосредоточенных зарядов мощностью 200 и 765 кг ТНТ при плотности заряжения 1,67 г/см³. Вокруг каждой боевой скважины до взрыва были пробурены наблюдательные скважины глубиной 55 м на расстояниях 3, 5, 7 и 9 м, а после взрыва — исследовательские на расстояниях 2, 4 и 6 м от соответствующей боевой. В обоих типах скважин из продуктивного пласта отбирался керн из всей вскрытой части.

Для изучения механического действия взрыва на продуктивный пласт выполнялись гидродинамические исследования в наблюдательных скважинах и изучение керна, извлеченного до и после взрыва из обоих типов скважин. Методика исследований сводилась к проведению до и после взрыва установившихся опытных откачек, в результате которых определялись удельные дебиты скважин, воронки депрессии и устанавливался закон фильтрации жидкости в пласте. До взрыва перед откачками производилась эрлифтная прокачка для очистки трещин от бурового шлама, после взрыва дополнительно к этому — проработка скважин для удаления обломков породы из ствола. Погрешность измерений не превышала 0,3 % от величины измеряемого уровня.

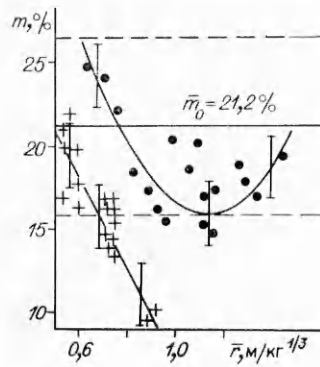
2. Результаты экспериментов. Лабораторные опыты. На вскрытой модели в горизонтальной плоскости заложения заряда визуально выделяются полость взрыва и зона разрушения; видимые трещины, прошивающие зону разрушения, не наблюдаются. Полость сферической формы и обожжена продуктами детонации. Вокруг полости четко выделяется зона измененного цвета (более светлого), где среда спрессована и слабосвязана. За этой зоной на некотором расстоянии при неизменности цвета среда также становится менее прочной, определить визуально ее границы не удается. В таблице приведены зоны деформаций, выявленные в опытах.



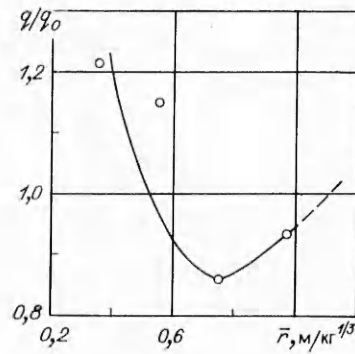
Р и с. 1



Р и с. 2



Р и с. 3



Р и с. 4

Распределение плотности среды после взрыва показано на рис. 1. Изменение плотности среды от центра взрыва к периферии определялось как минимум в трех моделях по четырем — шести радиусам. Каждая точка представляет собой среднее значение из нескольких величин плотности, замеренных на равных расстояниях от центра взрыва (светлые точки — $m_0 = 25\%$, темные — 18%). Вокруг полости последовательно выделяются две зоны — разрыхления и уплотнения. Зона разуплотнения в обоих случаях достигает $r \approx 0,2 \text{ м/кг}^{1/3}$ с максимальным разуплотнением вблизи полости примерно в 10% . Зона уплотнения при снижении начальной пористости среды имеет большую протяженность, а степень уплотнения $5-6\%$. Из таблицы видно, что пониженная скорость упругих волн в среде после взрыва наблюдается до $\bar{r}_p \approx 1,0$ ($m_0 = 25\%$) и $\bar{r}_p \approx 1,3 \text{ м/кг}^{1/3}$ ($m_0 = 18\%$). Интенсивное падение скоростей волн отмечается до расстояний $\bar{r} \approx 0,5-0,6 \text{ м/кг}^{1/3}$ с минимумом значений (60% от начальных) у границ взрывной полости. Пониженные скорости упругих волн свидетельствуют о наличии остаточных деформаций в среде, поэтому внешнюю границу пониженных скоростей можно считать границей зоны разрушения.

Изменения проницаемости среды после взрыва в условиях начального насыщения ее керосином представлены на рис. 2. Приведенные данные

Начальная пористость $m_0, \%$	Размеры зон, $\text{м/кг}^{1/3}$				
	Радиус полости $\bar{r}_п$	Радиус зоны измененного цвета $\bar{r}_и$	Радиус разрыхления $\bar{r}_рр$	Интервал уплотнения $\bar{r}_у$	Радиус разрушения $\bar{r}_р$
25	0,1	0,3	0,2	0,2—0,7	1,0
18	0,09	0,3	0,2	0,2—0,8	1,3

показывают немонотонность изменения проницаемости, выделяются три зоны с различным характером изменения. В первой от полости зоне (до $\bar{r} \approx 0,4 \text{ м/кг}^{1/3}$) вблизи центра проницаемость увеличивается в несколько раз, достигая минимума на внешней границе зоны; во второй после взрыва минимальна; в третьей вначале умеренно возрастает, а далее снижается. Экстраполируя данные опытов, внешнюю границу зоны, где проницаемость становится фоновой, оцениваем на $\bar{r} \geq 2 \text{ м/кг}^{1/3}$.

Из всей области изменения проницаемости обращает на себя внимание вторая зона. В высокопористом коллекторе с $m_0 = 25 \%$ в этой зоне проницаемость среды снижается в интервале расстояний от заряда примерно от 0,4 до 1,0 $\text{м/кг}^{1/3}$. Минимум поствзрывной проницаемости составляет 0,5 от фоновой. При снижении начальной пористости среды до 18 % во второй зоне проницаемость становится выше исходных значений.

Минимум проницаемости во второй зоне совпадает с максимальным уплотнением среды и с максимумом остаточных сжимаемых радиальных и азимутальных напряжений [1—3]. Отметим также, что внешняя граница третьей зоны изменения проницаемости существенно дальше от заряда, чем граница зоны разрушения \bar{r}_p , определяемая по изменению скорости упругих продольных волн. Это зона так называемых допредельных деформаций порогового пространства [1].

Опыты в полевых условиях. По данным визуального изучения кернового материала исследованных скважин и сопоставления их с керновым материалом наблюдательных скважин внешняя граница зоны деформаций водонасыщенного карбонатного пласта прослеживается до приведенных расстояний примерно 1,0 $\text{м/кг}^{1/3}$. В непосредственной близости от полости породы интенсивно разрушены вплоть до состояния известкового песка, далее размер кусков керна возрастает до 5—10 см и более.

Изменения пористости матрицы коллектора, выявленные по керновому материалу, показаны на рис. 3 (из высококавернозных прослоев извлеченного керна было мало, и поэтому он здесь не рассматривается).

Для заряда в 200 кг извлеченным керном (кружочки) изменение пористости пород охарактеризовано полностью до выхода на начальные значения по величине, для заряда 765 кг (крестики) самая дальняя скважина в опыте оказалась ближе, чем внешняя граница изменения пористости. Из рис. 3 видно, что ближе приведенных расстояний (примерно 0,6 $\text{м/кг}^{1/3}$) матрица пласта разрыхляется, в интервале расстояний около 0,6—1,3 $\text{м/кг}^{1/3}$ уплотняется (штриховые линии показывают разброс значений естественной пористости массива). Диапазон изменения пористости пласта после взрыва существенно сужается. Так, для опыта с зарядом в 200 кг среднеквадратичное отклонение σ после взрыва составило 1,95 по сравнению с $\sigma = 5,3$ до взрыва, т. е. пористость матрицы пласта после взрыва как бы «упорядочивается».

Проницаемость керна для опытов с зарядами в 200 и 765 кг снизилась после взрыва примерно на порядок в тех интервалах от заряда, где наблюдается снижение пористости. При начальном среднем значении проницаемости керна $\bar{K} = 12,6 \text{ МД}$ и $\sigma = 7,1$ проницаемость после взрыва 200 кг составила $\bar{K} = 1,9 \text{ МД}$ ($\sigma = 2,1$), после взрыва 765 кг — $\bar{K} = 0,9 \text{ МД}$ ($\sigma = 1,3$).

Данные об удельных дебитах скважин до и после взрыва мощностью 765 кг приведены на рис. 4. Для заряда в 200 кг ТНТ до взрыва абсолютные значения удельных дебитов скважин по техническим причинам оказались заниженными. Однако характер их изменения в этом опыте аналогичен приведенному на рис. 4, но по упомянутой причине график сдвинут вверх по сравнению с графиком опыта при взрыве 765 кг ТНТ. Видно, что изменение фильтрационных свойств карбонатного водонасыщенного коллектора с начальной пористостью матрицы $m_0 = 21,2 \%$ (а для высококавернозных прослоев пористость существенно выше) после камуфлетного взрыва носит немонотонный характер от полости взрыва к периферии. С учетом данных опыта с зарядом 200 кг внешняя граница с изме-

ненными фильтрационными свойствами проходит на расстоянии от заряда $\bar{r} > 1,6 \text{ м/кг}^{1/3}$. В диапазоне $\bar{r} = 0,5 \div 1,0 \text{ м/кг}^{1/3}$ фильтрационные свойства коллектора снижаются примерно на 20 %, а вблизи полости до $\bar{r} = 0,5 \text{ м/кг}^{1/3}$ — улучшаются. Естественно, что основной вклад в наблюдаемую картину вносят изменения, происшедшие в высококавернозных прослоях, пористость и проницаемость которых существенно превышает эти показатели для остальной части пласта, где характер изменений аналогичен высококавернозной части.

Из приведенных экспериментальных данных обращают на себя внимание следующие основные факторы. 1. Проницаемость коллектора после взрыва от полости к периферии носит немонотонный характер. 2. Минимум проницаемости наблюдается там, где в среде матрица максимально уплотнена и среда находится под действием максимальных остаточных напряжений. 3. В насыщенной жидкостью среде в матрице после взрыва возникают неупругие деформации. 4. При превышении начальной пористости коллектора величины 18 % образуется зона, в которой после взрывная проницаемость становится ниже фоновой. 5. Изменение фильтрационных свойств коллектора наблюдается далеко за пределами зоны разрушения.

Ниже предлагается объяснение наблюдаемым в экспериментах фактам.

3. Теоретическая модель. Действие ударных нагрузок на среду может приводить как к обратимым, так и к необратимым изменениям коэффициента проницаемости среды. Необратимые изменения проницаемости среды могут происходить за счет перестройки структуры порового пространства на динамической стадии и под действием поля остаточных напряжений. Механизмы, приводящие к перестройке структуры порового пространства, бывают весьма разнообразными: контактное разрушение зерен, затекание цемента в поровые каналы и т. д. Наиболее существенным образом эти эффекты проявляются при действии взрыва на высокопористые ($m_0 > 15 \%$) насыщенные газом среды, поскольку газ, содержащийся в порах, практически не препятствует контактному разрушению зерен. В случае же, когда среда насыщена жидкостью, сжимаемость которой сравнима со сжимаемостью скелета, действие взрыва на такую среду на динамической стадии взрыва аналогично действию взрыва на монолитную среду. При прохождении ударной волны (УВ) в такой среде могут образовываться трещины, приводящие при пересечении между собой и последующем сдвиге разрушенной среды к возникновению дилатансионной проницаемости. Сдвиговые напряжения ведут к повороту образованных трещинами блоков (кусков) друг относительно друга и раскрытию трещин между блоками. Радиальная зависимость дилатансионной проницаемости в зоне разрушения среды имеет вид [4]

$$K_g = 0,7 \cdot 10^{-2} d_0^2 [1 - (1 - \xi^\delta)^\lambda]^3 \exp \left[2 \left(\frac{\xi^0 - 1}{\xi_*^\delta - 1} \right) \frac{2\beta}{\delta} \ln \frac{d_m}{d_0} \right].$$

Здесь d_0 и d_m — минимальный и максимальный размеры блоков на внутренней и внешней границах зоны разрушения; $\xi = r/a_m$; $\xi_* = R/a_m$ (R — внешний радиус зоны разрушения); β — степень затухания напряжений на фронте УВ ($\sigma(r) \sim r^{-\beta}$); $\delta = 3(1 + \lambda)$; λ — коэффициент дилатансии; a_m — радиус полости.

Как показывают оценки, при прохождении УВ жидкость не успевает отфильтроваться в трещины из блоков, образованных в среде этими трещинами. Поэтому эффективное давление в среде (разность между давлением в скелете и в жидкости) на динамической стадии взрыва практически не меняется, если поры полностью заполнены жидкостью. Наличие жидкости в порах препятствует контактному разрушению зерен и затеканию цемента в поровое пространство. После окончания динамической стадии взрыва фильтрация приводит к падению порового давления жидкости и увеличению эффективного давления, что в свою очередь может

привести к изменению проницаемости среды под действием поля остаточных напряжений [3]. Если изменение эффективного давления не превосходит 100 МПа, то изменение проницаемости определяется по формуле [5] $K = K_0 \exp(-\alpha \Delta p_f)$ (K_0 — коэффициент проницаемости при начальном давлении, Δp_f — изменение эффективного давления, МПа, α — коэффициент, зависящий от типа и структуры среды).

Таким образом, в результате описанных выше эффектов проницаемость разрушенной среды будет складываться из дилатансионной проницаемости и проницаемости блоков (матрицы), изменившейся под действием поля остаточных напряжений.

Необходимо отметить, что насыщение среды жидкостью изменяет эффективное давление в среде, уменьшает ее прочность и приводит к существенному ослаблению затухания УВ по сравнению с ее затуханием в монолите. Существенно увеличиваются размеры зоны механического действия взрыва, а также размеры зоны радиальной трещиноватости, когда глубина заложения заряда H не слишком велика и возможно образование такой зоны: $H < (\sigma_1 - 2\sigma_0)/3\rho g$ (σ_1, σ_0 — прочность среды на сдвиг и на отрыв, ρ — плотность среды, g — ускорение силы тяжести).

Если это условие не выполняется, зона радиальной трещиноватости не образуется и непосредственно за зоной разрушения возникает зона упругих смещений, в которой увеличение радиальной компоненты тензора проницаемости происходит за счет перестройки тензора напряжения. Эффект изменения тензора проницаемости при неодносной нагрузке образца наблюдался в лабораторных опытах [6].

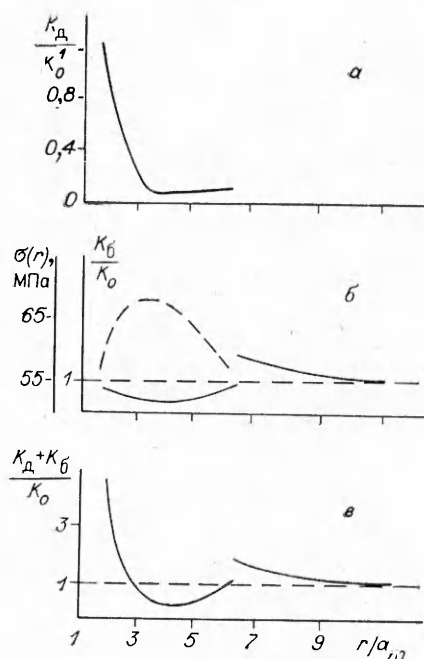
Ниже приведены результаты расчета изменения радиальной компоненты тензора проницаемости в зоне упругих смещений с учетом этого эффекта и результаты, полученные для зоны разрушения. Зависимости радиальных коэффициентов проницаемости даются как функции приведенного радиуса. Для перехода к абсолютным значениям необходимо учесть эффект увеличения зон разрушения в пористой среде, насыщенной жидкостью с известным гидростатическим давлением.

Зависимость приведенного дилатансионного коэффициента проницаемости от расстояния показана на рис. 5, а ($K_0^{-1} = 1$ Д), на рис. 5, б представлено изменение проницаемости среды (блоков) под действием остаточных напряжений в зоне разрушения, изображенных штриховой линией. Зависимость суммарного коэффициента проницаемости $(K_d + K_b)/K_0$ приведена на рис. 5. Расчеты проводились для случая, когда $\ln(d_m/d_0) = 3$, $K_1 = 0,7 \cdot 10^{-2} d_0^2 = 1,75 \cdot 10^5$ Д, $\lambda = 0,1$, $K_0 = 1$ Д, $\beta = 2$, $\xi_* = 5$.

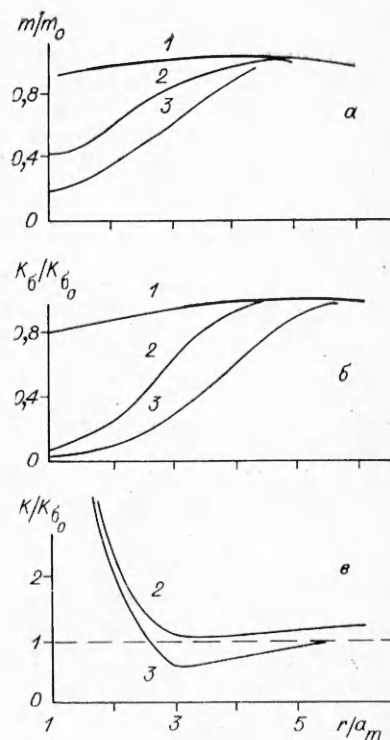
Из рис. 5 видно, что зависимость суммарного коэффициента проницаемости от расстояния имеет немонотонный характер, что связано с конкуренцией дилатансионной и блоковой проницаемостей. С увеличением расстояния от заряда дилатансионная проницаемость быстро убывает, в то время как блоковая возрастает, что объясняется уменьшением остаточных напряжений по мере удаления от взрывной полости. В зоне упругих смещений изменение эффективного давления в среде равно нулю и происходит лишь перераспределение напряжений: σ_r возрастает по абсолютной величине, а σ_ϕ уменьшается. Это приводит к увеличению сечения капилляров, ориентированных в радиальном направлении и соответственно к росту радиальной компоненты тензора проницаемости, которая может быть найдена по формуле [7]

$$K_r/K_0 = \left[1 + \frac{3(1+\nu)\sigma}{m_{0T}E_f} \right]^3 / \left[1 + \frac{(1+\nu)\sigma}{E_f} \right].$$

Здесь ν — коэффициент Пуассона; σ — изменение радиальной компоненты тензора напряжений; E_f — эффективный модуль Юнга; m_{0T} — начальное значение трещинной пористости (параметр модели). При расчете полагалось $\sigma/E_f = 5 \cdot 10^{-4}$, $m_{0T} = 10^{-2}$, $\nu = 0,33$. Приведенная формула определяет максимальное изменение радиальной компоненты тензора проницаемости (на внутренней границе зоны упругих смещений), которая



Р и с. 5



Р и с. 6

затем убывает по мере уменьшения σ с расстоянием от заряда по закону $\sigma \sim r^{-2}$.

Таким образом, показано, что имеется удовлетворительное качественное согласие теоретических и экспериментальных зависимостей изменения коэффициента проницаемости в окрестности камуфлетного взрыва в пористой насыщенной жидкостью среде.

Эффект необратимого изменения фильтрационных свойств среды при камуфлетном взрыве можно объяснить в рамках модели, предложенной в [8]. Эта модель позволяет определить изменение пористости среды под действием УВ для случаев, когда среда полностью или частично насыщена жидкостью или газом, а также описать как упругие изменения объема пор под действием нагрузки, так и пластическое затекание их, когда нагрузка превышает предел текучести среды Y . Расчеты изменения пористости такой среды после камуфлетного взрыва проводились в [9]. Там же приведена методика решения уравнений, описывающих динамику распространения сферической УВ. Аналогичные расчеты сделаны для сред с различной степенью насыщения их жидкостью. Для описания движения среды использовались гидродинамические уравнения, учитывающие прочностные эффекты.

Для уравнения состояния пористой насыщенной среды [8] задавался ряд параметров, характеризующих материал матрицы и насыщающую жидкость: плотность $\rho_m = 2,65 \text{ г/см}^3$, скорость звука $c_m = 4,5 \cdot 10^3 \text{ м/с}$, модуль сдвига $G_m = 10^4 \text{ МПа}$, прочность на сдвиг $Y = 10^2 \text{ МПа}$. Для поровой жидкости плотность $\rho_{m_0} = 1 \text{ г/см}^3$, скорость звука 10^3 м/с . Противодавление во всех вариантах расчетов полагалось равным 50 МПа .

Как показали расчеты, при полном насыщении среды жидкостью пористость ее матрицы после прохождения УВ практически не меняется, так как жидкость, содержащаяся в порах, препятствует пластической деформации пор и после снятия нагрузки на среду способствует восстановлению начальной пористости, т. е. в этом случае необратимых изменений пористости матрицы и соответственно коэффициента ее проницаемо-

сти нет. Когда же поры не полностью насыщены жидкостью, имеет место их пластическое затекание. При этом изменение пористости после снятия нагрузки практически равно доле пористости, заполненной газом. Это означает, что при прохождении УВ необратимым образом уменьшается пористость среды за счет затекания пор, содержащих газовую фазу. Типичные радиальные зависимости изменения пористости среды для различных соотношений жидкой и газовой фаз в порах приведены на рис. 6, а. На рис. 6, б видны соответствующие этим изменениям пористости радиальные зависимости изменения коэффициента проницаемости матрицы, при расчете которого использовалась формула Козени [4] $K \sim m^3$.

На рис. 6, в изображена радиальная зависимость суммарного коэффициента проницаемости (дилатансионной и блоковой), полученная для этих параметров среды. При расчете полагалось $K_{б0} = 0,5$ Д. Видно, что и здесь зависимость коэффициента проницаемости — немонотонная функция. На рис. 6 линия 1 — $m_0 = 10$ % (жидкость 100 %), 2 — 10 % (жидкость 50 %, газ 50 %), 3 — 20 % (жидкость 25 %, газ 75 %).

Таким образом, результаты теоретического рассмотрения позволяют объяснить немонотонность послевзрывной проницаемости в области действия взрыва. В случае проведения взрыва в полностью насыщенной жидкостью пористой среде немонотонная зависимость радиальной компоненты тензора проницаемости объясняется наличием в среде остаточных напряжений, а также упругих смещений вне зоны разрушения. Наличие остаточных напряжений в среде приводит к изменению тензора проницаемости, при этом изменения обратимы, поскольку связаны с упругой деформацией пористой среды. Когда же пористая среда насыщена жидкостью не полностью, действие взрыва приводит к необратимым изменениям блокового коэффициента проницаемости в зоне разрушения за счет пластического затекания порового пространства, содержащего газовую фазу. Зависимость радиальной компоненты тензора проницаемости от радиуса при этом также немонотонная. Блоковая проницаемость в зоне разрушения ухудшается.

Представляет интерес рассмотреть вопрос о зависимости вида функции радиальной компоненты тензора проницаемости от начальной пористости среды, в которой производят взрыв. В [9] показано, что при взрыве в пористой газонасыщенной среде на вид функции распределения коэффициента проницаемости в зоне разрушения существенно влияет начальная пористость. При $m_0 < 5$ % среда независимо от насыщения ведет себя как монолит, функция распределения проницаемости монотонно убывающая. При $m_0 > 15$ % взрыв в пористой газонасыщенной среде приводит к ухудшению проницаемости в зоне разрушения. Как показано в [9], этот эффект связан с тем, что при пористости $m_0 > 15$ % имеется большое число контактов зерен, межзеренное пространство которых не заполнено цементирующим веществом. Поэтому при нагружении возможно как разрушение зерен (особенно их контактов), так и затекание цемента в межзеренное пространство. При взрыве в насыщенной жидкостью среде роль цемента в таких контактах играет жидкость, которая после окончания динамической стадии взрыва под действием поля остаточных напряжений может отфильтровываться в области пониженных давлений. В результате давление жидкости, компенсирующее внешнюю нагрузку (остаточные напряжения) на блоки, снижается и происходит ухудшение проницаемости блоков за счет пластической деформации пор. Естественно, что чем больше число контактов, межзеренное пространство которых не заполнено цементом, тем более чувствительна среда к таким изменениям. Как показано в [9], доля таких контактов и влияние их на проницаемость среды возрастают при пористости $m_0 > 15$ %. Поэтому и в случае взрыва в пористой насыщенной жидкостью среде эффекты локального ухудшения проницаемости среды наиболее существенно начинают сказываться при высокой пористости ($m_0 > 15$ %). Как показывают экспериментальные данные, область локального ухудшения проницаемости возникает при начальной пористости $m_0 > 18$ %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бовт А. Н., Мясников К. В., Николаевский В. Н., Шурыгин Е. А. Камуфлетный взрыв в пористой среде // ПМТФ.— 1981.— № 6.
2. Бовт А. Н., Коненков К. С., Мушинов В. И. и др. Изменение фильтрационных свойств насыщенного коллектора при камуфлетном взрыве // ПМТФ.— 1981.— № 5.
3. Бовт А. Н., Кобец В. И., Масленников А. М. и др. О напряженном состоянии цементированной пористой среды при камуфлетном взрыве // ПМТФ.— 1980.— № 3.
4. Кадет В. В., Ловецкий Е. Е., Селяков В. И., Сироткин В. К. Влияние камуфлетного взрыва на фильтрационные характеристики хрупкой среды // ПМТФ.— 1981.— № 1.
5. Николаевский В. Н., Басниев К. С., Горбунов А. Т. и др. Механика насыщенных пористых сред.— М.: Недра, 1970.
6. Марморштейн Л. М. Коллекторские и экраняющие свойства осадочных пород при различных гидродинамических условиях.— Л.: Наука, 1975.— Т. 180.
7. Кречетова Т. Н., Ромм Е. С. Об использовании нелинейной упругой трещинно-капиллярной модели пористой среды для изучения влияния давления на физические свойства пород-коллекторов нефти и газа // Вопросы нелинейной геофизики.— М.: ВНИИИТГ, 1981.
8. Дунин С. З., Сурков В. В. Уравнения состояния газоводонасыщенных сред // Изв. АН СССР. Физика Земли.— 1978.— № 11.
9. Бовт А. Н., Васильев А. В., Ловецкий Е. Е. и др. Характер разрушения и фильтрационных свойств пористой газонасыщенной среды после проведения камуфлетного взрыва // ПМТФ.— 1987.— № 2.

г. Москва

Поступила 15/1 1988 г.,
в окончательном варианте — 16/VI 1989 г.

УДК 532.5.522

А. А. Шутов

ФОРМА НЕСЖИМАЕМОЙ СЛАБОПРОВОДЯЩЕЙ СТРУИ В СИЛЬНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Исследования формирования струй в электрическом поле носят преимущественно экспериментальный характер. Систематическое изучение закономерностей генерации струй различных жидкостей в электростатическом поле проведено в [1], где пайдены ряд эмпирических условий на межэлектродное напряжение и напор жидкости, при которых поток капель переходит в непрерывное струйное течение. Для жидкостей в широком диапазоне по вязкости, проводимости, поверхностному натяжению (водоглицериновые смеси, солевые растворы, органические, неорганические масла и т. и.) в [2] исследовалось влияние напряженности поля и расхода жидкости на длину сплошной части струи, в [3] — влияние проводимости на распадную длину струи. Большое количество работ посвящено тонкому распылению заряженных струйных потоков. Например, в [4] струи плохопроводящих криогенных жидкостей рассматривались в связи с возможностью получения шаровых микроишней контролируемых размеров для лазерного термоядерного синтеза. В [5, 6] экспериментально изучалось образование микроволокон из полимерных растворов и расплавов в электрическом поле.

Предполагается, что исследуемые далее жидкости обладают ионной проводимостью с характерным электрическим параметром времени, меньшим характерного времени истечения жидкости из капилляра. Из-за малого времени релаксации в непосредственной близости от эмиттирующей жидкости электрода заряд оттекает к поверхности струи. Вытягивающие электрические силы обусловлены взаимодействием внешнего поля с поверхностными инжектированными зарядами, взаимным отталкиванием последних, поляризационными взаимодействиями. Для тонкого слабоспадающего струйного профиля поляризацйонные силы малы, объемные электрические силы отсутствуют, взаимодействие электрических и гидродинамических полей осуществляется через границу струи. Рассматриваются сильные электростатические поля, для которых мощность поля, связанная с переносом заряда UI , превышает начальную мощность гидродинамического потока $\rho Q^3/2\pi^2 r_0^4$, т. е. в условиях, когда параметр $\delta = \rho Q^3/2\pi^2 IU r_0^4 \ll 1$ (I — ток, переносимый струей, U — разность потенциалов исследуемого интервала координат, ρ , Q — плотность и объемный расход жидкости, r_0 — начальный радиус струи). Это обстоятельство позволяет опустить начальные условия генерации струи у инжектирующего жидкости электрода. В [7] проанализирована роль поверхностного натяжения, взаимного отталкивания поверхностных зарядов, взаимодействия поляризацйонных зарядов. Эти силы дают малый вклад в скорость и зависимость радиуса от продольной координаты, здесь на них останавливаться не будем.