

Докажем справедливость первого равенства, для второго доказательство проводится аналогично. Имеем

$$(2.1) \quad \lim_{n \rightarrow \infty} \int_{\Omega} (u_* - u^n)^2 d\Omega = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\int_{\Omega} u_*^2 d\Omega - \frac{2}{(1+n)} \sum_{i=0}^n \int_{\Omega} u_* u_i^n d\Omega + \right. \\ \left. + \frac{1}{(1+n)^2} \sum_{i,j=0}^n \int_{\Omega} u_i^n u_j^n d\Omega \right).$$

Используя вид функций u_i^n и u_* , а также известные формулы теории рядов, после интегрирования получаем

$$(2.2) \quad \int_{\Omega} u_*^2 d\Omega = \frac{5+\pi}{12}, \quad \frac{1}{(1+n)} \sum_{i=0}^n \int_{\Omega} u_* u_i^n d\Omega = \frac{5+\pi}{12} - \frac{1}{48n}, \\ \frac{1}{(1+n)^2} \sum_{i,j=0}^n \int_{\Omega} u_i^n u_j^n d\Omega = \frac{5+\pi}{12} - \frac{4+\pi-2n}{48n(1+n)}.$$

Подставляя соотношения (2.2) в (2.1), имеем

$$\int_{\Omega} (u_* - u^n)^2 d\Omega = \frac{6+\pi}{48n(1+n)},$$

где при $n \rightarrow \infty$ правая часть стремится к нулю. Таким образом доказано, что непрерывное решение для скоростей (1.1) является пределом последовательности разрывных решений.

Поступила 10 IX 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. Прандтль Л. Примеры применения теоремы Генки к равновесию пластических тел. — В кн.: Теория пластичности. М.: ИЛ, 1948.
2. Хилл Р. Математическая теория пластичности. М.: Гостехтеориздат, 1956.
3. Прагер В., Холж Ф. Теория идеально пластических тел. М.: ИЛ, 1956.
4. Быковцев Г. И. О поле скоростей при вдавлении плоского штампа в пластическое полупространство. — ПММ, 1967, № 3.

УДК 622.235

ИЗМЕНЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ НАСЫЩЕННОГО КОЛЛЕКТОРА ПРИ КАМУФЛЕТНОМ ВЗРЫВЕ

А. Н. Бовт, К. С. Коненков, В. И. Мусинов,
В. Н. Николаевский, Е. А. Шурыгин

(Москва)

1. К настоящему времени вполне определенно установлено, что проницаемость монолитной горной породы типа гранита после взрывного камуфлетного воздействия возрастает до 4—5 порядков [1—2] по сравнению с начальной, которая весьма мала (0,01 мД). Проницаемость угля после взрыва возрастает более умеренно (на 2 порядка), начальная проницаемость порядка 100 мД [1, 3]. В обоих случаях отмечен монотонный спад проницаемости от взрывной полости к периферийному начальному значению проницаемости. В этих средах улучшение проницаемости связано с взрывной генерацией радиальных и иных систем трещин.

С другой стороны, камуфлетный взрыв в воздушно-сухой пористой высокопроницаемой среде приводит [4] к существенному снижению проницаемости всюду вокруг взрывной полости, несмотря на эффект дилатационного разуплотнения. Случайное резкое улучшение гидравлической проводимости среды было обусловлено лишь прохождением отдельных трещин вблизи взрывной полости. Таким образом, взрывные необратимые изменения проницаемости пористых горных пород обуславливаются конкурирующими механизмами трещинообразования пород и уплотнения пор. Параметрами необратимого деформирования пород, соответствующими заметным изменениям проницаемости, будут поврежденность [3] (т. е. трещиноватость) и остаточные деформации весьма малого порядка (0,01 %).

Насыщение порового пространства капельной жидкостью меняет, как известно, характер деформаций породы. При необратимом (дилатационном) деформировании разуплотнение среды будет приводить к спаду порового давления, благодаря чему сдвиговая прочность, выражающаяся в эффективных напряжениях Терцаги [5], будет возрастать, а уплотнение вызывает увеличение порового давления и снижение прочности. Тем самым насыщение пор приводит к сглаживанию различий и меняет сам характер разрушения. В слабых (мягких) насыщенных грунтах и горных породах взрывные волны хорошо описываются в гидродинамическом приближении [5, 6], основное разрушение сводится к разжижению, а при камуфлетном взрыве, как и при подводном, отмечаются пульсации взрывной полости [7]. Наконец, взрывное воздействие приводит к повышению порового давления в значительных [8, 9] областях, которое сохраняется долгое время.

Вместе с тем гидропроводность пористых сред весьма чувствительна к самым малым необратимым деформациям (микроразрушениям). Поэтому взрыв в насыщенных породах может приводить к различным (в зависимости от типа микроразрушения) и заметным немонотонным изменениям их фильтрационных свойств, включая слабые изменения в значительно удаленных участках.

2. Чтобы изучить воздействие взрыва на типичный продуктивный коллектор, для моделирования взрыва была выбрана высокопористая проницаемая цементированная среда. Известно, что деформационные характеристики цементированных и кристаллических горных пород существенно различаются [10]. Хотя большинство нефтяных месторождений представлено весьма различными цементированными коллекторами [11, 12], используемая модель среды была ближе всего к терригенным коллекторам. Модель изготовлялась из обогащенного песка КП-3, известковой муки и жидкого стекла, которое служило цементирующим материалом. Модель размещалась в металлической емкости высотой 350 и диаметром 300 мм. Размер модели и максимальная мощность заряда выбирались из условий, чтобы время развития полости было меньше удвоенного времени прохождения волны сжатия до границы модели [13] и чтобы граница, разделяющая зоны остаточных и упругих деформаций, не выходила за пределы модели.

Приготовленная смесь из песка КП-3, известковой муки и жидкого стекла выдерживалась в сушильном шкафу при температуре 100—120°C в течение 50—55 ч. В результате получался коллектор со следующими физико-механическими свойствами: плотность $\rho = 1,85 \cdot 10^3$ кг/м³ (в ненасыщенном состоянии), пористость $m = 25\%$, проницаемость (по газу) $k = 150$ мД, прочность на одноосное сжатие $\sigma^* = 25$ МПа, скорость продольных упругих волн (в насыщенном состоянии) $c_l = 3150$ м/с, коэффициент Пуассона $\nu = 0,22$.

Для заложения заряда в процессе изготовления модели создавалась модель скважины глубиной до 160 и диаметром 12 мм, которая после уста-

новки заряда на забое заливалась эпоксидной смолой. В опытах использовались заряды тэна диаметром 10 мм и мощностью 0,76 г (в тротиле эквиваленте — 1,06 г).

Опыты проводились с моделями, поры которых практически на 100 % перед взрывом насыщались керосином. В опытах изучалось механическое действие камуфлетного взрыва на насыщенный керосином искусственный коллектор и связанное с ним изменение фильтрационных свойств от полости взрыва к периферии.

Для изучения механического действия взрыва применялись методы: визуальное изучение характера деформирования коллектора от центра взрыва к периферии (полость, трещины, общее состояние среды после взрыва); изучение изменения плотности среды от полости взрыва к периферии; изучение изменения скорости упругих волн от полости к периферии методом ультразвукового прозвучивания.

Методика визуального изучения зон действия взрыва заключалась в следующем. Перед взрывом модель, заключенная в металлическую оболочку, зажималась с торцов фланцами с целью исключения появления трещины по периметру модели в плоскости заложения заряда из-за действия волны разгрузки, что могло существенно повлиять на фильтрационные параметры среды после взрыва. Среда находилась в модели под фоновым давлением около 0,3 МПа. После взрыва модель освобождалась от металлической оболочки и распиливалась в поперечном сечении в плоскости заложения заряда. При этом определялись размер полости, количество и протяженность трещин, общее состояние среды вокруг полости (ее связность, деформированность), состояние трубок для измерения фильтрационных параметров.

Определение изменения плотности коллектора по зонам от центра взрыва проводилось с помощью универсального гамма-гамма-плотномера УГГП-1. Применялся денситометрический метод регистрации рассеянного гамма-излучения в модификации просвечивания узким пучком гамма-квантов. В основе плотностного гамма-гамма-метода лежит регистрация рассеянных в веществе гамма-квантов первичного излучения источников (методика и измерения осуществлялись совместно с Г. И. Ховриным и Л. Б. Прозоровым).

Для определения изменения скорости прохождения упругих волн в среде использовалась аппаратура УКБ-1М, для которой были изготовлены малогабаритные датчики с собственной резонансной частотой 150 и 800 кГц. Определение первичных свойств среды проводилось методом сквозного прозвучивания модели по радиусам от центра к периферии с точками замеров через 0,5—2,0 см. Для выявления изменения свойств среды после взрыва из модели вырезался диск в плоскости заряда толщиной около 5 см, на котором методом прозвучивания по толщине и профилирования с шагом 0,5 см определялись значения скоростей продольной волны (методика и измерения осуществлялись совместно с Ю. Ф. Трофимовым и Н. И. Селезевым). На этих же дисках по тем же профилям определялись значения плотности среды от полости взрыва к периферии.

Для исследования изменения фильтрационных параметров коллектора в результате взрыва в процессе изготовления в модели размещались трубки диаметром 3 мм, концы которых перфорировались на длине 15—20 мм. Противоположные концы трубок, выходящие из модели, соединялись с установкой УИПК. Трубки в модели располагались в горизонтальной плоскости заряда или же ниже заряда на расстояниях от него от 2 до 14 см, число трубок в одном опыте составляло 8—9 штук. Модель коллектора, заключенная в стальной цилиндр, герметично закрывалась с торцов фланцами; герметизация в местах сочленения достигалась путем установки в вырезах фланцев резиновых прокладок, герметизация мест выхода трубок из модели производилась эпоксидной смолой. В опытах опреде-

Зона	R , мм	R/R_3	$\bar{r}$
R_{Π}	11,0	2,2	0,11
R_p	90,0	18	0,88

лялся расход керосина при установившемся перепаде давления между парами трубок в модели до и после взрыва. В качестве фильтрационной характеристики среды между парами трубок принималось отношение $Q/\Delta p$ (где Q — расход керосина, Δp — установившийся перепад давления между трубками), т. е. определялась проводимость среды на заданном

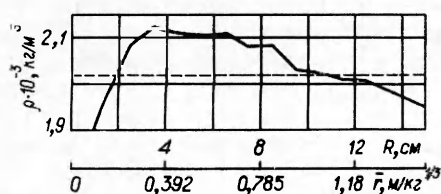
участке. Изменения фильтрационных параметров среды в результате взрыва оценивались отношением $Q/\Delta p/(Q/\Delta p)_0$. Индекс 0 относится к до-взрывным испытаниям.

3. Визуально вокруг заряда выделяется лишь полость взрыва, близкая по форме к сферической. Трещины и другие нарушения вокруг полости обнаружить не удалось. В радиусе $\bar{r} \approx 0,8-1,0$ м/кг^{1/3} матрица среды после взрыва становится менее связной ($\bar{r} = R/W^{1/3}$ — радиус, приведенный к мощности заряда). Зоны деформаций среды показаны в таблице, где R_{Π} — радиус полости, R_p — радиус нарушения связности, R_3 — радиус заряда.

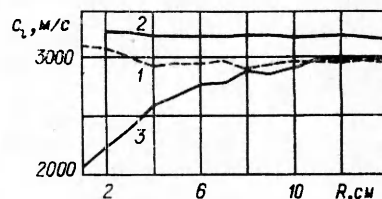
Изучение распределения плотности среды после взрыва показывает, что вокруг полости последовательно выделяются две зоны (фиг. 1): разуплотнения и уплотнения. Зона разуплотнения, где среда претерпевает максимальное разуплотнение вблизи полости до 10%, достигает величины радиуса $\bar{r} \approx 0,22$ м/кг^{1/3}. Зона уплотнения присутствует в диапазоне приведенных расстояний от $\bar{r} \approx 0,22$ до $\bar{r} \approx 0,8-1,0$ м/кг^{1/3}. Максимальное уплотнение среды в этой области достигает величины 5%. Наблюдающееся некоторое снижение плотности среды у периферии модели может быть связано с условиями приготовления, когда в процессе прессования сырой модели напряжение в центре выше, чем на периферии. Результаты прозвучивания диска, выпиленного из среды после взрыва, показаны на фиг. 2, откуда видно, что скорость волн минимальна у полости (около 60% от исходной) и возрастает до исходной на $\bar{r} \approx 0,9-1,0$ м/кг^{1/3} (кривая 1 — до насыщения, 2 — после насыщения керосином, 3 — после взрыва).

Таким образом, камуфлетный взрыв в высокопористом насыщенном коллекторе не приводит к образованию видимых трещин в среде, а инициирует перестройку порового пространства, изучать которую следует с помощью шлифов или других микрометодов. Взрыв приводит к созданию вокруг полости двух последовательных зон: уплотнения и разуплотнения.

4. Результаты исследования изменения фильтрационных свойств коллектора после взрыва показаны на фиг. 3. Из приведенных данных следует, что взрывное воздействие приводит к возникновению последовательно от полости трех различных зон. Первая зона характеризуется существенным улучшением фильтрационных свойств (вблизи полости на порядок), радиус ее $\bar{r} \approx 0,45$ м/кг^{1/3}. Во второй зоне взрыв ухудшает фильтрационные свойства коллектора по сравнению с исходными в среднем на 30-40%, эта область присутствует в интервале расстояний от $\bar{r} \approx 0,45$



Ф и г. 1

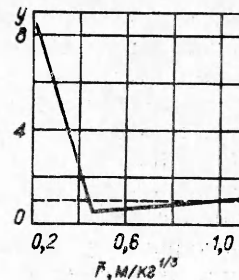


Ф и г. 2

до $\bar{r} \approx 0,1$ м/кг^{1/3}. За пределами расстояний $\bar{r} \approx \approx 1,0$ м/кг^{1/3} лежит зона слабого улучшения фильтрационных параметров коллектора. Размеры этой третьей зоны и характер изменения фильтрации в ней в проведенных опытах специально не изучались.

Обработка опытных данных методом наименьших квадратов дает следующие зависимости изменения фильтрационных свойств высокопористого насыщенного коллектора от приведенного расстояния. Для первой зоны $y = -31,7\bar{r} + 15$, $0,22 \leq \bar{r} \leq 0,45$; для второй области $y = 0,96\bar{r} - 0,01$, $0,45 \leq \bar{r} \leq 1$, где $y = (Q/\Delta p)/(Q/\Delta p)_0$.

Таким образом, изменения фильтрационных свойств при камуфлетном взрыве носят немонотонный характер, кардинальным образом отличающийся от изменений гидропроводности монолитных горных пород и воздушно-сухих пористых сред.



Ф и г. 3

Поступила 25 VI 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. McKee C. R., Hanson M. E. Explosively created permeability from single charges. — Soc. Petrol. Eng. J., 1975, N 12.
2. Родионов В. Н., Спивак А. А., Цветков В. М. Метод определения фильтрационных свойств горных пород в массиве. — ФТПРПИ, 1976, № 5.
3. Butkovich T. R., Burton D. E., Bryan J. B. Calculational modeling of explosive fracture and permeability enhancement. — J. Energy Resources Techn., 1979, vol. 101, p. 28.
4. Бовт А. Н., Кобец В. И. и др. О зонах уплотнения и разуплотнения при камуфлетном взрыве в пористой среде. — Изв. АН СССР. МТТ, 1979, № 6.
5. Николаевский В. Н., Басниев К. С. и др. Механика насыщенных пористых сред. М.: Недра, 1970.
6. Ляхов Г. М. Основы динамики взрывных волн в грунтах и горных породах. М.: Недра, 1974.
7. Кривцов В. А. Кинематика развития камуфлетной полости в водонасыщенном песке. Применение энергии взрыва на земляных работах. М.: Недра, 1979.
8. Кнох J. B., Rawson D. E., Kower J. A. Analysis of a ground water anomaly created by an underground nuclear explosion. — J. Geophys. Res., 1965, vol. 70, N 4.
9. Banister J. A., Ellet D. M. Pore pressure enhancements observed on Rio Blanco. — Nuclear Technology, 1975, vol. 27, p. 660.
10. Оберт Л. Хрупкое разрушение горных пород. — В кн.: Разрушение. Т. 7, ч. 1/ Под ред. Г. Либовица. М.: Мир, 1976.
11. Шрейнер Л. А. и др. Деформационные свойства горных пород при высоких давлениях и температурах. М.: Недра, 1968.
12. Котяхов Ф. И. Физика нефтяных и газовых коллекторов. М.: Недра, 1977.
13. Родионов В. Н., Адушкин В. В. и др. Механический эффект подземного взрыва. М.: Недра, 1971.

УДК 533+539

О МЕХАНИЗМЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ОБЪЕМНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН ПРИ ПОДЗЕМНОМ ВЗРЫВЕ

В. Н. Родионов

(Москва)

Подземный взрыв как источник сейсмических волн хорошо изучен [1]. Механизм формирования упругой волны, которая затем трансформируется в сейсмические волны разных видов, состоит в следующем. Энер-