

где  $\tilde{G}(\omega)$  — преобразование Фурье ядра  $G(\xi)$  на полубесконечном интервале:

$$\tilde{G}(\omega) = \int_0^{\infty} G(\xi) \exp(i\omega\xi) d\xi.$$

В случае среды Фойгта в первой части уравнения (16) будет стоять чисто диссипативный член  $-i\omega^3 A/2$ .

Кубическое уравнение Шреддингера с нулевой правой частью достаточно подробно исследовано в связи с проблемой самофокусировки двумерных пучков и образованием волн огибающих в нелинейных средах [7]. Правую часть в (16) можно рассматривать как малое возмущение, для учета которого разработаны различные приближенные методы, основанные, в частности, на методе обратной задачи рассеяния (см., например, [8, 9]).

В заключение отметим, что для описания волновых процессов в твердых средах используются также сингулярные ядра наследственности, причем сингулярные ядра предлагается выбрать с особенностью не сильнее логарифмической [10].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Заболотская Е. А., Хохлов Р. В. Квазиплоские волны в нелинейной акустике ограниченных пучков. — Акуст. журн., 1969, т. 15, вып. 1.
2. Энгельбрехт Ю. К. К асимптотическому анализу двумерного волнового процесса деформации в твердой среде. — Изв. АН СССР. МТТ, 1980, № 6.
3. Потанов А. И., Солдатов И. Н. Квазиплоский пучок продольных волн в нелинейной пластине. — Акуст. журн., 1984, т. 30, вып. 6.
4. Бахвалов И. С., Жилейкин Я. М., Заболотская Е. А. Нелинейная теория звуковых пучков. М.: Наука, 1982.
5. Энгельбрехт Ю. К., Нигул У. К. Нелинейные волны деформации. М.: Наука, 1981.
6. Руденко О. В., Солуян С. И. Теоретические основы нелинейной акустики. М.: Наука, 1975.
7. Захаров В. Е., Шабат А. Б. Точная теория двумерной самофокусировки и одномерной автомодуляции волн в нелинейных средах. — ЖЭТФ, 1971, т. 61, № 1.
8. Карман В. И., Маслов В. Е. Теория возмущений для солитонов. — ЖЭТФ, 1977, т. 73, № 2 (8).
9. Лэм Дж. мл. Введение в теорию солитонов. М.: Мир, 1983.
10. Локшин А. А., Суворова Ю. В. Математическая теория распространения волн в средах с памятью. М.: Изд-во МГУ, 1982.

Поступила 24/X 1984 г.

УДК 622.235

#### КАМУФЛЕТНЫЙ ВЗРЫВ В МАЛОПОРИСТОЙ ТВЕРДОЙ СРЕДЕ

А. Н. БОВТ, А. А. МИХАЙЛОВ, В. Н. НИКОЛАЕВСКИЙ,  
Е. А. ШУРЫГИН

(Москва)

1. **Постановка задачи.** Полевыми и лабораторными экспериментальными исследованиями [1, 2] установлено, что камуфлетный взрыв в таких хрупкоразрушаемых практически монолитных средах, как гранит, приводит к гигантскому увеличению проницаемости за счет возникновения системы трещин. На основе этого высказаны [3] рекомендации, в частности, по практическому проектированию взрывов в рудных телах с целью последующего проведения процессов выщелачивания.

С другой стороны, мощные взрывы в пористых коллекторах, содержащих газ низкого давления, не привели к увеличению притока газа [4], тогда как проведение в том же пласте крупномасштабного гидроразрыва оказалось явно эффективным [5]. Результаты мощных взрывов в нефтесодержащих коллекторах [6] внесли интерпретируемые изменения в распределение дебитов по скважинам, но-видимому, сводящиеся к умеренному увеличению нефтеотдачи пласта.

Лабораторные взрывы в искусственно изготовленных высокопористых модельных насыщенных жидкостью средах подтвердили слабое увеличение проницаемости в дальних, немонотонное ее изменение в ближних зонах [2, 7]. В то же время взрыв в сухой среде с пористостью  $m_0 = 25\%$  привел [2, 8] к явному снижению проницаемости за счет ударного, а затем и сдвигового уплотнения пор, анализ [2, 8] позволил установить, что изменения проницаемости обусловлены малыми допредельными пластическими деформациями, а дилатансионное разуплотнение, приводящее к росту пористости в ближайшей окрестности полости, подавляется сопутствующим дроблением, а следовательно, и уменьшением эффективного диаметра поровых каналов. Эти выводы подтвердились опубликованными данными лабораторных взрывов в образцах естественных

песчаников ( $m_0 = 26\%$ ), отмечены также кольцевые зоны уплотнения и разуплотнения [9], а исследования с помощью сканирующего электронного микроскопа показали [10], что все трещины имеют дилатантное раскрытие, но их длина мала, и они не образуют той щелевой сети, которая необходима для эффективного увеличения проницаемости.

В этой связи предполагалось, что взрыв может приводить к увеличению проницаемости коллекторов, но только малопористых [2]. Теоретические расчеты механического действия взрыва в ближней зоне [2, 11, 12], в которых с целью упрощения пренебрегалось допредельными остаточными деформациями, могут установить факт немонотонного изменения лишь пористости, но не проницаемости. Это обстоятельство привело к необходимости постановки лабораторных экспериментов, излагаемых в данной работе.

**2. Методика опытов.** Исследования проводились в лабораторных условиях с блоками, моделирующими горную породу и изготовленными из смеси крупного песка (размер зерен до 2 мм), портландцемента (марки 500) и воды. Смесь тщательно перемешивалась и укладывалась в металлическую емкость диаметром 300 и высотой 350 мм. В процессе укладки смеси в нее помещались датчики давления. Емкость со смесью в течение 2—3 мин виброуплотнялась. После этого в тело смеси через специальные отверстия в корпусе емкости вводились трубки, выполненные из нержавеющей стали (модели скважин), для последующего изучения фильтрационных свойств среды. Собранная модель устанавливалась в прозрачную камеру на 9 ч при температуре 90°C, а затем выдерживалась при комнатной температуре в течение 7—10 сут.

Физико-механические характеристики среды, получаемой таким образом: прочность на одноосное сжатие  $\sigma \approx 35$  МПа, плотность  $\rho \cdot 10^{-3} \approx 2,15$  кг/м<sup>3</sup>, скорость продольных упругих волн  $c \approx 4000$  м/с, пористость  $m_0 \approx 10\%$ , проницаемость по газу  $k_0 \approx 5—10$  мД. Перед термообработкой модели в ее центре помещался цилиндрический стержень диаметром от 10 до 16 мм и длиной до 180 мм. После застывания среды стержень извлекался, а образовавшийся при этом канал использовался в дальнейшем в качестве зарядной скважины.

В опытах применялись заряды тона сферической формы весом 0,4; 0,76 и 1,34 г с диаметром соответственно 8, 10 и 12 мм и плотностью ВВ 1,6 г/см<sup>3</sup>. Для обеспечения камуфлетности взрыва скважина над зарядом заполнялась забойкой на основе эпоксицидной смолы. Иницирование зарядов осуществлялось из центра с помощью азида свинца. Для запуска регистрирующей аппаратуры при изготовлении зарядов в них размещалось параллельно два проводника, направленных к точке иницирования. Перед взрывом модель сверху и снизу зажималась, что создавало предварительное статическое обжатие в 0,15—0,3 МПа. Тем самым исключалась вероятность разделения модели на две части поперечной трещиной, возникающей в плоскости заложения заряда под действием взрывных волн.

Механическое действие камуфлетного взрыва в среде оценивалось по комплексу исследований: а) регистрация параметров взрывных волн; б) изучение изменения фильтрационных свойств среды от полости взрыва к периферии; в) визуальное изучение характера и размера зон разрушения среды при взрыве (размер полости, зоны разрушения и трещины); г) изучение состояния среды вокруг полости взрыва акустическими и плотностными методами.

Датчики давления размещались в плоскости заложения заряда таким образом, чтобы можно было регистрировать радиальную составляющую напряжения  $\sigma_{11}$  во взрывной волне в диапазоне приведенных расстояний от 0,2 до 1 м/кг<sup>1/3</sup>. В качестве датчиков давления использовался полупроводниковый кристалл кремния на основе стабилизатора КС 133В размером 1×1 мм. Для увеличения площади контакта датчика со средой на положительный вывод диода припаивалась пластинка размером 3×3 мм. Рабочий диапазон частот таких датчиков от 0 до 10 МГц.

Тарировка датчиков производилась на масляном прессе МП-2500. Зависимость чувствительности датчика от давления  $p \sim f(u)$  линейна. По результатам [13], где проведено динамическое нагружение полупроводниковых кремниевых датчиков с помощью луча лазера, зависимость  $p \sim f(u)$  линейна в диапазоне давлений 0—2·10<sup>3</sup> МПа. Для оценки величин измерявшихся давлений проведены опыты при взрыве в песке. Полученные данные измерений по величинам напряжений удовлетворительно согласуются с результатами [14]. Регистрация показаний датчиков в опытах осуществлялась запоминающими осциллографами С8-11 и С8-14.

Для исследования фильтрационных параметров использовали 8 трубок (диаметром 3 мм), помещенных в модели на приведенных расстояниях от заряда 0,162—1,94 м/кг<sup>1/3</sup>. Концы трубок перфорировали на длине 8—10 мм, а противоположные концы, выходящие из модели, развальцовывали и накидными гайками соединяли со схемой измерений.

Для измерений применялась установка АКМ-кери. В опытах определялись установившийся расход  $Q$  воздуха и соответствующий ему в модели перепад давления  $\Delta p$  между попарно исследуемыми трубками до и после взрыва. Мерой гидравлического сопротивления среды служило отношение  $\Gamma = Q/\Delta p^2$ , названное в дальнейшем гидропроводностью среды, тем самым определялась гидропроводность среды для межскважинных участков.

Изменение фильтрационных параметров среды в результате взрыва оценивалось отношением

$$\Gamma/\Gamma_0 = \frac{(Q/\Delta p^2)}{(Q_0/\Delta p_0^2)},$$

Т а б л и ц а 1

Вес заряда тона, г	Радиус полости $r_c$ , мм	Радиус зоны измененного цвета $r_*$ , мм	Приведенный $\bar{r}_c$ , м/кг <sup>1/3</sup>	Приведенный $\bar{r}_*$ , м/кг <sup>1/3</sup>
1,34	10,5	30	0,083	0,245
0,76	8,1	26	0,08	0,255
0,40	6,7	25	0,081	0,30

где  $\Gamma$  и  $\Gamma_0$  — послевзрывная и до взрывная гидропроводимость среды.

Визуальное изучение сводилось к следующему. После определения послевзрывных фильтрационных характеристик среды модель освобождали от металлического корпуса и разрезали в поперечном сечении в плоскости заложения заряда; по свежему сколу определяли размер полости, зоны разрушения и трещин.

Изучение состояния среды вокруг полости взрыва осуществляли путем определения изменения скорости прохождения упругих волн в среде и изменения ее плотности. При исследованиях использовали серийно выпускаемую аппаратуру УКБ-1М для измерения скорости упругих волн, а также универсальный гамма-гамма-плотномер УГГП-1. Скорость продольных волн определяли малогабаритными датчиками с собственной резонансной частотой 150 и 800 кГц. До взрыва применялся метод сквозного прозвучивания модели по радиусам от центра к периферии с точками замеров через 0,5 см. Для выявления изменения свойств среды после взрыва из модели вырезали диск в плоскости заряда (толщиной 4—5 см), на котором методом прозвучивания по толщине с шагом 0,5 см по разным радиусам (т. е. в 100 точках измерений на каждом диске) находили значения скоростей продольных волн (поперек диска).

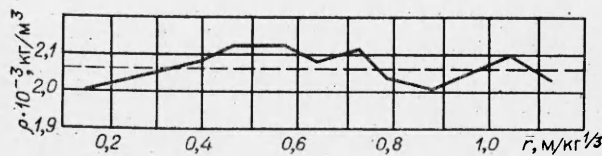
Для определения изменения плотности среды вокруг взрывной полости применяли денситометрический метод регистрации рассеянного гамма-излучения (ГГМ-И) в модификации просвечивания узким пучком гамма-квантов (МПГ). В основе плотностного гамма-гамма-метода лежит регистрация рассеянных в веществе гамма-квантов первичного излучения источника. Регистрируя скорость счета на диске, выпиленном из модели после взрыва и используемом также для упомянутых измерений скорости волн с учетом его толщины в точке просвечивания, удается определить объемный вес среды вокруг взрывной полости. Измерение плотности среды производили по радиусам от центра диска с шагом 0,5—1,0 см.

**3. Результаты опытов.** В серии из 11 опытов в пяти случаях визуально изучали зоны действия взрыва, в трех были выпилены диски для измерений скоростей и плотности среды, подвергнутой взрывному воздействию. Изменения фильтрационных свойств среды и напряжения во взрывной волне регистрировались при всех 11 опытных взрывах.

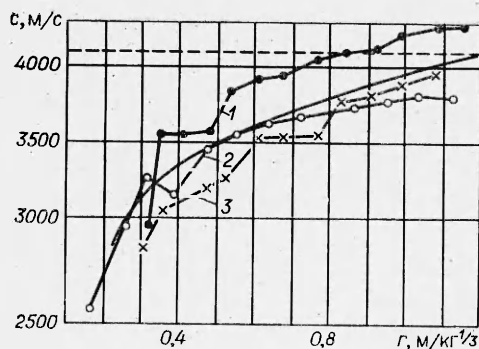
После снятия корпуса и разделения модели на две части (верхнюю и нижнюю) по плоскости заложения заряда обнаружено, что полость, близкая по форме к сферической, обожжена продуктами детонации и окружена зоной спрессованной среды, которая тем не менее обладает меньшим сжатием по сравнению с исходной. Цвет ее также изменился. От полости сквозь зону изменения цвета проходят отдельные видимые вертикальные трещины. Число трещин невелико (до 5), и их протяженность по радиусу от полости примерно 0,8 м/кг<sup>1/3</sup>. Радиальные размеры полости и зоны измененного цвета  $r_*$  для трех весов заряда приведены в табл. 1, где средний размер образующейся взрывной полости 0,08 м/кг<sup>1/3</sup>, размер зоны дробления (зоны измененного цвета) вокруг полости имеет радиус около 0,27 м/кг<sup>1/3</sup>, протяженность вновь образованных трещин до 0,8 м/кг<sup>1/3</sup>.

Изменение плотности среды от полости к периферии по результатам экспериментов показано на рис. 1, откуда видно, что последовательно вокруг полости выделяются зоны разрыхления и уплотнения. Зона разрыхления прослеживается до расстояний  $\bar{r} \approx 0,32$  м/кг<sup>1/3</sup> от центра взрыва, зона уплотнения — в интервале расстояний  $\bar{r} \approx 0,32—0,88$ . На расстояниях, больших, чем  $\bar{r} \approx 0,88$  м/кг<sup>1/3</sup>, изменения плотности среды прибором УГГП-1 не регистрируются. Разрыхление и уплотнение среды в среднем 5—6%.

Данные о скорости упругих волн осредняли для каждого из трех дисков по точкам, соответствующим одинаковым приведенным расстояниям, что дало экспериментальные кривые 1—3 (рис. 2), которые представляют изменение скорости упругих волн в соответствующих рассмотренных моделях. На рис. 2 приведена также монотонная кривая  $c = 1758,7 + 4127\bar{r} + 1912,6\bar{r}^2$ , отвечающая (с доверительной вероятностью 0,92) среднему ожидаемому значению скорости продольных волн и полученная путем осреднения данных по всем трем дис-



Р и с. 1



Р и с. 2

мости до 2,6 раз. Третья зона, начинающаяся на  $\bar{r} \approx 0,65 \text{ м/кг}^{1/3}$ , имеет внешнюю границу на  $\bar{r} \approx 2,0 \text{ м/кг}^{1/3}$ , соответствует постепенному снижению гидропроводимости до исходного значения. Среднее улучшение проницаемости в этой зоне оценивается в 1,5 раза.

На рис. 4 приведена типичная осциллограмма записи напряжений в волне. Отметим, что даже в самых близких к заряду точках регистрации фронт волны отличен от ударного и волна представляет собой непрерывную волну сжатия. Скорость максимума фронта волны до расстояний  $\bar{r} \approx 0,6 \text{ м/кг}^{1/3}$  ниже скорости звука в среде, т. е. максимум взрывной волны соответствует пластической волне.

Статистическая обработка результатов динамических измерений дает зависимость максимальных напряжений в волне  $\sigma_{11}^{\max} = 33,2 (\bar{r})^{-n}$  ( $n = 2,13, 0,26 \leq \bar{r} \leq 1,0$ ) от приведенного расстояния. Показатель  $n$  оказался ниже, чем для высокопористых сред [2, 15, 16], что согласуется по порядку с величиной  $n$  с измерениями [17].

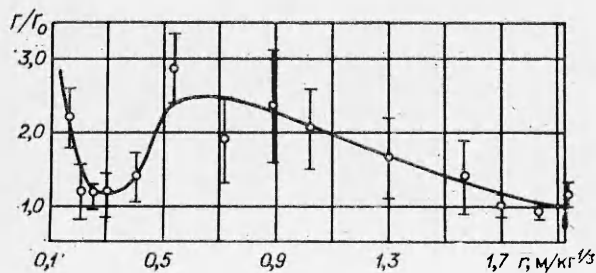
Сводка радиусов характерных зон воздействия взрыва дана в табл. 2.

**4. Анализ результатов.** Изменение гидропроводимости после взрыва в первую очередь обусловлено допредельными изменениями структуры порового пространства — в данном случае созданием новых микротрещин. Этот эффект прослеживается до приведенных расстояний  $\bar{r} \approx 2,0 \text{ м/кг}^{1/3}$ . Однако постепенный рост гидропроводимости к полости подавляется общим уплотнением среды (см. рис. 1), и только наличие протяженных макротрещин ( $\bar{r} \leq \bar{r}_i$ ), пронизывающих зону уплотнения, обеспечивает сохранение уровня проницаемости ( $\Gamma \geq \Gamma_0$ ).

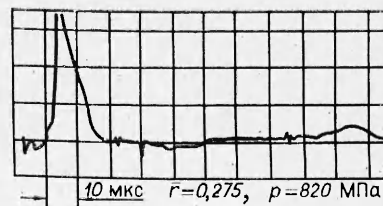
Дальнейший переход к зоне разуплотнения ( $\bar{r} \leq 0,32$ ) обеспечивает новое нарастание гидропроводимости к полости, причем этот интервал совпадает с зоной катапластического дробления среды до порошкообразного состояния, фиксируемого и по изменению цвета.

Сложный характер процесса изменения порового пространства в интервале  $0,3 \leq \bar{r} \leq 0,52$ , смены уплотнения на разуплотнение отражается и на немонотонности индивидуальных кривых скоростей ультразвука  $V_p \sim f(\bar{r})$  для каждого из изученных дисков. Наличие локальных максимумов ( $\bar{r} = 0,48-0,55$ ) и минимумов ( $\bar{r} \approx 0,63$ ) отмечалось и при акустических исследованиях зоны воздействия камуфлетного натурального взрыва [18] с зарядом 500 кг.

Сопоставление полученных данных с результатами [2, 7, 8] приводит к выводам. При снижении пористости в 2,5 раза (от 25 до 10%) линейный размер полости снижается в 1,5 раза, гидропроводимость новых трещин при этом увеличивается примерно в



Р и с. 3



Р и с. 4

\* Трубки — модели скважин — после взрыва сохранились неповрежденными; это означает, что все взрывные изменения имели место в пористой среде.

Таблица 2

Радиус полости $\bar{r}_c$ , м/кг <sup>1/3</sup>	Радиус новых трещин $\bar{r}_f$ , м/кг <sup>1/3</sup>	Радиус разрушения $\bar{r}_p$ , м/кг <sup>1/3</sup> *	Радиус доп-редельной деформации $\bar{r}_d$ , м/кг <sup>1/3</sup> **	Радиус разрушения $\bar{r}_{pp}$ , м/кг <sup>1/3</sup>	Интервал уплотнения $\bar{r}_y$ , м/кг <sup>1/3</sup>	Улучшение фильтрационных свойств
0,08	0,8	1,2	2,0	0,3	0,3—0,9	до $\bar{r} \approx 2,0$

\* По данным ультразвуковых исследований.

\*\* По данным изменения фильтрационных свойств среды.

2 раза, а зона разрушений, определяемая ультразвуковыми исследованиями, увеличивается в  $\sim 1,5$  раза. Внешняя граница зоны уплотнения для низкопористых сред имеет линейный размер, почти в 2 раза больший, чем при взрыве в среде с  $m_0 = 25\%$ . Это может быть обусловлено меньшей степенью загущения  $\sigma_{ii}^{max}$  в волне, для низкопористых сред  $n = 2,13$  при  $m_0 = 10\%$  против  $n = 3,5$  для  $m_0 = 25\%$  [2, 8, 15]. Изменения фильтрационных свойств среды при снижении ее исходной пористости от 25 до 10% качественно различны. Так, если взрыв в среде с  $m_0 = 25\%$  приводит только к ухудшению проницаемости до расстояний  $\bar{r} \approx 2,0$  м/кг<sup>1/3</sup> (с максимумом ухудшения более чем в  $10^2$  раз вблизи полости), взрыв в среде с  $m_0 \approx 10\%$  вызывает немонотонные изменения после взрывной проницаемости, гидропроводимости от полости к периферии имеет локальные максимум и минимум и всюду в зоне механического воздействия оказывается выше исходной.

Авторы признательны Г. И. Ховрину, Ю. Ф. Трофимову, Б. В. Русинову, В. В. Шорохову, Д. Л. Фролову, В. И. Яночкину за помощь в работе, а К. В. Мясникову — за постоянное внимание и поддержку.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Родионов В. Н., Адушкин В. В. и др. Механический эффект подземного взрыва. М.: Недра, 1971.
2. Бовт А. Н., Николаевский В. Н. Дилатансия и механика подземного взрыва. Итоги науки и техники. Сер. мех. тв. деф. тела. М.: ВИНТИ, 1981, т. 14.
3. McKee C. R., Jacobson R. H., Way S. C. et al. Design criteria for in-situ mining of hard rock ore deposits. — In Situ, 1982, v. 6, N 3.
4. Leutkehan C. R., Toman J., Dibona V. G. The Rio-Blanco experiment: its objective, design and execution. — Nuclear Technology, 1975, v. 27, p. 539.
5. Appledorn C. R., Mann R. I. Massive hydraulic fracturing gas simulation project. — In: Energy and mineral resource recovery: Amer. Nucl. Soc. Meeting. Conf. — 770440. Techn. Inform. Center. US Department of Energy, 1977.
6. Бакиров А. А., Бакиров Э. А., Виноградов В. Н. и др. Применение подземных ядерных взрывов в нефтедобывающей промышленности. М.: Недра, 1981.
7. Бовт А. Н., Мусинов В. И. и др. Изменение фильтрационных свойств насыщенного коллектора при камуфлетном взрыве. — ПМТФ, 1981, № 5.
8. Бовт А. Н., Мясников К. В. и др. Камуфлетный взрыв в пористой среде. — ПМТФ, 1981, № 3.
9. Schock R. N., Hanson H. E., Swift R. P., Walton O. R. In situ fracture related to energy and resource recovery. — In: High-pressure Sci. Technol.: Proc. 7th Int. AIRAPT Conf., Le Creusot, 1979. Oxford, 1980, v. 2.
10. Durham W. B. Direct observation of explosively induced damage in sandstone with application to reservoir simulation. — In: Scanning Electron Microscopy, 1981, v. 1.
11. Ловецкий Е. Е., Сироткин В. К., Сумин Е. В. Взрыв в зернистой пористой среде с переменной дилатансией. — ПМТФ, 1981, № 2.
12. Самаров Е. Л. Расширение взрывной полости в дилатанционно-пластических грунтах. — Изв. АН СССР. Физика Земли, 1983, № 2.
13. Жираков В. М., Малинин В. Г., Тимошин В. В. Сравнение величины и формы коротких сигналов давления, полученных с кварцевых и полупроводниковых датчиков при воздействии лазерного излучения. — В кн.: Матер. III Всесоюз. симпоз. по импульсным давлениям. М.: ВНИИТРИ, 1979.
14. Ляхов Г. М. Основы динамики взрывных волн в грунтах и горных породах. М.: Недра, 1974.
15. Цветков В. М. О взрыве в песчаном грунте. — ПМТФ, 1962, № 5.
16. Христофоров Б. Д. Параметры ударных волн при взрыве сферического заряда в пористом NaCl. — ФГВ, 1972, № 7.
17. Larson D. V. Explosive energy coupling in geologic materials. — Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., 1982, v. 19.
18. Зайченко В. Ю., Кузнецова Л. В., Тюльтев В. М. Изучение напряженного состояния массива горных пород методом акустического каротажа при воздействии на среду взрывом. — В кн.: Изучение напряженного состояния массивов горных пород акустическим методом. М.: ВНИИЯГГ, 1980.

Поступила 5/XI 1984 г.