

тенсивного роста сопротивления фольги и возрастает до величины 20 кВ на каждом размыкателе.

При зарядном токе 54 кА амплитуда тока на выходе накопителя более 2 МА. После достижения максимума ток экспоненциально спадает с постоянной времени  $\tau_2 \approx 10^{-3}$  с.

Авторы выражают благодарность И. А. Иванову за интерес к работе, В. И. Курносовой, К. В. Соломасову за помощь в проведении экспериментов.

Поступила 13 X 1980

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Азизов Э. А., Ахмеров Н. А. и др. Коммутационные характеристики взрывных размыкателей с быстрым разрушением контактного элемента.— ПМТФ, 1978, № 4.
2. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972.
3. Азизов Э. А., Кочуров И. В., Степаненко М. М. Квазистационарное ускорение плазмы в коаксиальном инжекторе с нецилиндрическими электродами, питаемом от индуктивного накопителя энергии.— ЖТФ, 1975, т. 45, вып. 9.

УДК 622 235

### КАМУФЛЕТНЫЙ ВЗРЫВ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

А. Н. Бовт, К. В. Мясников,  
В. Н. Николаевский, Е. А. Шурыгин  
(Москва)

1. К настоящему времени экспериментально изучено механическое воздействие камуфлетного взрыва на монолитную горную породу [1—5], причем не только найдены зависимости максимальных параметров взрывной волны (массовой скорости, давления) от приведенного расстояния, но и имеются определенные сведения о зонах разрушения. Эти представления позволили сформулировать относительно простые способы прогнозирования механического воздействия взрыва на монолитную горную породу [1, 5]. Вместе с тем экспериментальные данные по взрыву в пористых средах ограничиваются результатами лабораторных работ [6, 7] с песком и полевых работ [8, 9] с натурными мягкими грунтами, что позволило изучить характер затухания амплитуд волн сжатия [6, 8, 9], а также зафронтальное разуплотняющее движение [7], обусловленное эффектом дилатансии [1, 5, 10]. Изучение зон разрушения на таком материале, как песок, крайне затруднительно (см., например, [11]). В лабораторных опытах [3, 12] с пресованной каменной солью основное внимание также уделялось закономерности затухания массовых скоростей в волне сжатия.

Сопоставление имеющихся данных по взрывным сферическим волнам приводит к следующему противоречию. Так, часто утверждают, что зависимость максимальных массовых скоростей для монолитных горных пород (гранит, каменная соль) от приведенного расстояния ( $\bar{r} = R/W^{1/3}$ , где  $W$  — энергия взрыва) такая же, как и для такой пористой среды, как песок. С другой стороны, известен вывод о значительной низкой сейсмической эффективности некоторых пористых сред (аллювий), вмещающих очаг взрыва [1, 13].

В связи с этим представляет значительный интерес изучить механический эффект взрыва на прочную высокопористую среду, области разрушения в которой достаточно просто фиксировать. За счет искусственного изготовления удастся так подобрать ее свойства, чтобы она моделировала реальные горные породы, а также разместить измерительные устройства без нарушения ее целостности.

2. Опыты по камуфлетному взрыву проводились в блоках из искусственной пористой среды, которая изготовлялась из смеси песка марки КП-3, известковой муки и жидкого стекла. За счет термообработки пористая среда стала подобной прочной хрупко-разрушаемой горной породе.

Цилиндрический блок такой среды имел высоту 350 и диаметр 300 мм и помещался в металлическую емкость. Размер блока и мощность заряда ВВ выбираются из условия, чтобы время развития полости было меньше удвоенного времени прохождения волны сжатия до границы модели [1]. В качестве взрывчатого вещества использовался ТЭН в виде сферических зарядов диаметром 12 и 8 мм и массой 1,34 и 0,4 г (тротилловый эквивалент  $W = 1,89$  и  $0,56$  г). Заряд устанавливался в центре модели в скважине, ствол которой заливался эпоксидной смолой.

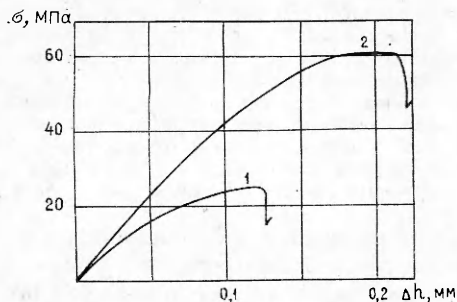
Параметры среды, слагающей блоки, следующие: плотность  $\rho = 1,85 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, пористость  $m = 25\%$ , проницаемость  $k_0 = 150-300$  мД, плотность материала матрицы  $\gamma = 2,64 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, скорость продольных волн  $c = 3000$  м/с, коэффициент Пуассона  $\nu = 0,22$ , модуль Юнга  $E = 3,5 \cdot 10^8$  МПа, прочность на одноосное сжатие  $\sigma^* = 25$  МПа, прочность на растяжение по так называемому бразильскому методу  $\sigma_p = 4,5$  МПа. Данные о характере разрушения (измерения К. С. Коненкова) приведены на фиг. 1. По деформационным данным искусственный материал (кривая 1) подобен песчанику (кривая 2), но слабее последнего.

Для измерения параметров волн напряжения использовались датчики напряжений, изготовленные на базе полупроводниковых кристаллов кремния. Датчики ориентировались в моделях по отношению к точке заложения заряда так, чтобы иметь возможность регистрировать радиальную компоненту напряжения в волне сжатия. Перед установкой в среду датчики тарировались на масляном прессе до давлений 250 МПа и при взрыве во влажном песке.

Для визуального изучения среда освобождалась после взрыва от металлической оболочки и разрезалась в поперечном сечении в плоскости заложения заряда. При этом определялись размер полости, характер разрушения среды вокруг нее, а также наличие и протяженность трещин.

Для измерения плотности среды от полости взрыва к периферии применялся денситометрический метод регистрации рассеянного гамма-излучения (ГГМ-п) в модификации просвечивания узким пучком гамма-квантов (МППГ). В основе плотностного гамма-гамма-метода лежит регистрация рассеянных в веществе гамма-квантов первичного излучения источника. Измерение распределения плотности в среде по зонам проводилось на дисках толщиной до 5 см, выпиленных из модели после взрыва в плоскости заложения заряда. Измерение проводилось по 5 лучам, исходящим из центра полости; шаг измерений изменялся от 1,0 см на периферии до 0,5 см в центральной части диска (разработка методики и измерения проведены совместно с Г. И. Ховриным и Л. Б. Прозоровым).

Акустический метод исследования заключался в определении скорости продольных волн в среде до и после взрыва. В исследованиях использовалась аппаратура УКБ-1М, для которой были сконструированы и изготовлены малогабаритные датчики с собственной резонансной частотой 150 и 800 кГц. Определение исходных свойств среды проводилось методом сквозного прозвучивания модели вдоль ее образующей по трем профилям



Фиг. 1

из центра под углом  $120^\circ$  друг к другу с точками замеров через 0,5—2,0 см; в этом случае применялись датчики с собственной резонансной частотой 150 кГц. Для выявления изменений акустических свойств среды после взрыва измерения проводились на диске, который уже использовался для измерения плотности по тем же профилям. Прозвучивание по толщине и профилирование проводились датчиками с собственной резо-

нансной частотой 800 кГц с шагом 0,5 см (разработка методики и измерения проведены совместно с Ю. Ф. Трофимовым и Н. И. Селезевым).

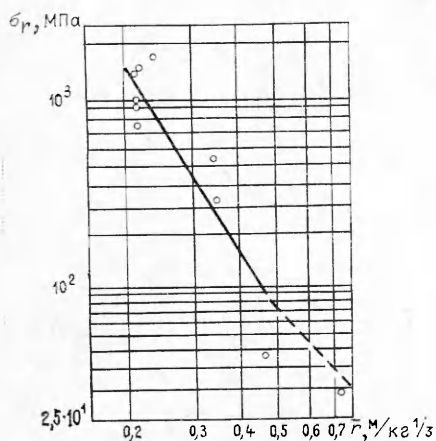
Для исследования изменения фильтрационных параметров среды при изготовлении модели в диапазоне расстояния от 2,2 до 14 см от заряда размещались до 8 трубок диаметром 3 мм. Концы трубок перфорировались на длине 18—20 мм, противоположные концы их, выходящие из модели, соединялись со схемой измерений. Определялись установившийся расход воздуха и соответствующий ему перепад давления между парами трубок в моделях до и после взрыва. В качестве фильтрационной характеристики среды принималось соотношение  $\Gamma = Q/\Delta p^2$ , иными словами, определялась проводимость среды на определенном участке (методика была разработана совместно с К. С. Коненковым).

3. Результаты механического воздействия камуфлетного взрыва оказались следующими. Полость имеет форму, близкую к сферической. Вокруг нее выделяется зона с измененным цветом, которую можно определить как спрессованный, но слабосвязанный порошок. Трещины, окрашенные взрывными газами, прослеживаются от границы полости. Они пересекают зону спрессованного порошка, их длина на 30% больше радиуса этой зоны, раскрытие менее 0,5 мм. Общее количество 3—5. Размеры полости  $R_0$ , зоны спрессованного порошка  $R_p$  и зоны присутствия трещин  $R_{тр}$  приведены в табл. 1 (для взрыва  $W = 1,34$  г ТЭНа, радиус заряда  $a_0 = 6$  мм).

На фиг. 2 даны значения максимальных радиальных  $\sigma_r$  напряжений в волне сжатия. В ближней зоне при  $R < R_\tau$  эти данные описываются зависимостью

$$(3.1) \quad \sigma_r = A(R/W^{1/3})^{-n}, \quad [\sigma_r] = \text{МПа}, \quad n = 3,5, \quad A = 6,4, \\ 0,21 \leq \bar{r} \leq 0,47.$$

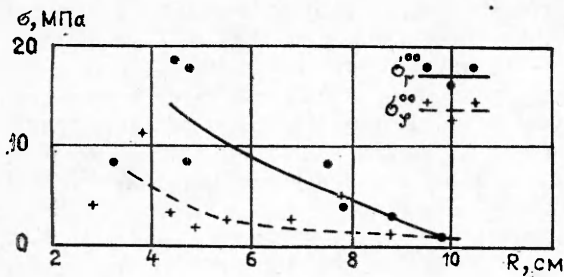
На несколько больших расстояниях выполнено лишь одно измерение ( $\bar{r} = 0,73$ ). Однако в другой серии опытов проведены измерения, из которых можно достоверно установить значение  $n = 1,96$  для  $\bar{r} \geq 0,47$ . Соответствующая линия, проходящая через замер в точке  $\bar{r} = 0,73$ , дана на фиг. 2 штриховой линией. Кроме того, из той же серии опытов следовало значение  $n = 0,6$  для максимальных измеренных напряжений  $\sigma_\phi$  при  $\bar{r} \leq 0,47$ , отсюда следует, что в области  $R < R_\tau = 0,47 W^{1/3}$  достигались значительные максимальные сдвиговые напряжения  $\tau = (1/2)(\sigma_r - \sigma_\phi)$  порядка предела прочности среды. О больших сдвиговых напряжениях говорят также измерения остаточных радиальных  $\sigma_r^\infty$  и азимутальных  $\sigma_\phi^\infty$  напряжений, которые можно выделить на осциллограммах записей напряжений. Распределение остаточных напряжений в среде от полости взрыва к периферии показано на фиг. 3, откуда видно, что в интервале расстояний от  $R = 0,25 W^{1/3}$  до  $R = 0,4 W^{1/3}$  (от 3 до 5,25 см) отмечается зона повышенных



Ф и г. 2

Т а б л и ц а 1

Зоны	R, мм	R/a <sub>0</sub>	$\bar{r}$ , м/кг <sup>1/3</sup>
R <sub>0</sub>	15	2,5	0,12
R <sub>p</sub>	37,5	6,25	0,3
R <sub>тр</sub>	45	7,5	0,365



Ф и г. 3

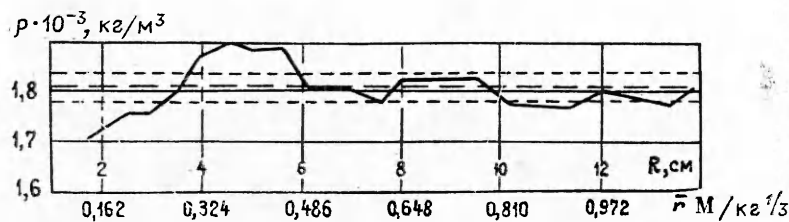
остаточных напряжений обоих типов с максимумом значений на отметке  $R = 0,33 \times W^{1/3}$  (4,1 см). Зарегистрированные вблизи стенки полости anomalно большие значения остаточных напряжений (при  $R < 2,25$  см) не были приняты во внимание, так как датчики могли быть подвергнуты воздействию горячих продуктов детонации.

В целом распределение остаточных напряжений согласуется с данными работы [14].

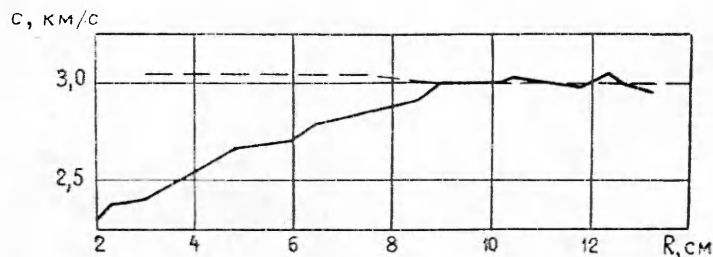
Результаты исследований плотности среды по зонам от полости к периферии, усредненные по разным лучам измерений, показаны на фиг. 4. В интервале расстояний от  $R = 0,125 W^{1/3}$  до  $R = 0,29 W^{1/3}$  плотность среды после взрыва снизилась максимально на 16%, а в интервале от  $R = 0,29 W^{1/3}$  до  $R = 0,49 W^{1/3}$  возросла на 6–10%. За пределами этих расстояний изменения плотности среды не отмечается.

Данные поперечного прозвучивания среды показывают (сплошная линия на фиг. 5), что с удалением от центра взрыва скорости упругих волн возрастают в среднем с 2430 м/с до исходных значений  $3000 \pm 100$  м/с при  $R = 0,8 W^{1/3}$  (штриховая линия на фиг. 5). Продольное профилирование среды по тем же радиусам дало следующие результаты (фиг. 6). Ближе  $R = 0,31 W^{1/3}$  скорость упругих волн снизилась после взрыва примерно на 30%. На участке от  $R = 0,31 W^{1/3}$  до  $R = 0,42 W^{1/3}$  отмечается возрастание скорости волн с пиком значений в 4000 м/с (примерно на 30–35% выше исходной) на отметке  $R = 0,365 W^{1/3}$ .

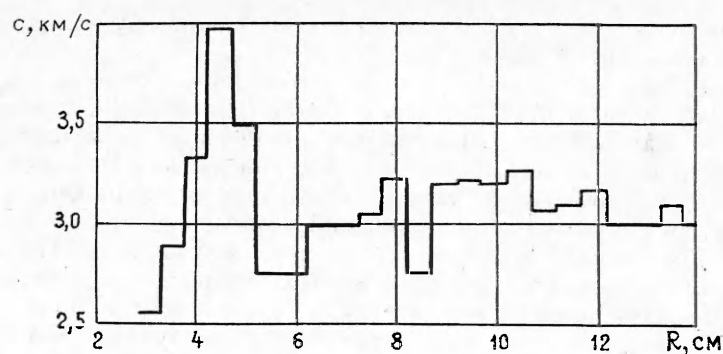
Результаты исследований фильтрационных параметров среды показаны на фиг. 7 ( $\Gamma_p$  — гидропроводимость среды после взрыва,  $\Gamma_{до}$  — гидропроводимость среды до взрыва (исходная)). Во всех случаях фильтрационные параметры среды после взрыва снизились. От полости проводимость среды постепенно увеличивается, однако во всем диапазоне расстояний до  $R \geq 2 W^{1/3}$  все же остается хуже исходной.



Ф и г. 4



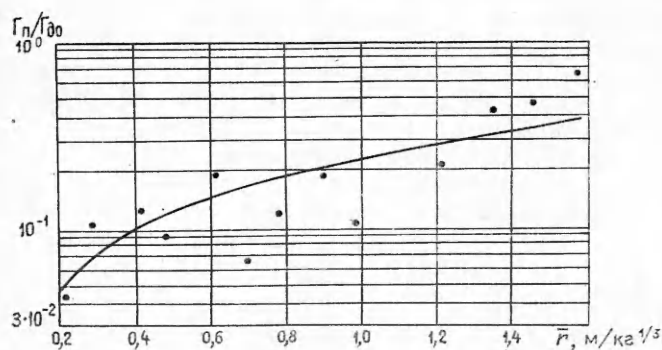
Ф и г. 5



Ф и г. 6

4. Перейдем к анализу приведенных здесь результатов опытов по сферически-симметричному взрывному движению в пористых средах. В отличие от зоны разрушения в хрупких монолитных твердых телах [3, 15], для которой характерна фрагментация материала трещинами, в пористой хрупкой среде число трещин незначительно. Область интенсивного механического воздействия  $R_0 < R < R_\tau = 0,47W^{1/3}$  состоит из двух зон. Для внутренней зоны в непосредственной близости от полости главным оказывается измельчение материала до слабосвязанного порошка. Вместе с тем порошок, который образовался в результате дробления пористой среды, достаточно плотно спрессован. Его плотность меньше начальной плотности среды на 16%, а скорость продольных волн — на 20%, т. е. по отношению к начальному состоянию среды эту зону можно именовать зоной разуплотнения:  $R_0 < R < R_d = 0,3W^{1/3}$ . Видно, что зона разуплотнения совпадает с зоной спрессованного порошка ( $R_d = R_p$ ). Поскольку подобное состояние среды образовалось под действием больших сдвиговых напряжений  $\tau$ , это разуплотнение, связанное с дроблением среды, носило предельный дилатансионный характер [1, 10]. Проницаемость самого спрессованного порошка не оказывается выше начальной проницаемости среды, поскольку дилатансионное разрыхление в условиях одновременного действия высоких давлений приводит не к увеличению проницаемости, а только несколько снижает темпы ее убывания [16]. Заметное улучшение гидравлической проводимости этой зоны, отмечавшееся в ряде опытов, случайно и связано с прохождением отдельных трещин, отмеченных выше.

Известно [11], что при взрыве в песке вблизи полости также образуется корка спрессованного порошка, которая на более поздних этапах взрывного движения прошивается радиальными трещинами. Вопрос о



Ф и г. 7

воздействии остаточных напряжений на гидравлическую проводимость радиальных трещин пока изучен мало.

Вторая (внешняя) часть области интенсивного механического воздействия  $R_d = 0,3W^{1/3} \leq R \leq R_r = 0,47W^{1/3}$  составляет зону уплотнения. В этой зоне плотность выше начальной на 5%, скорость продольных упругих волн в радиальном направлении выше начальной до 35%. На эту же зону приходится максимум остаточных напряжений.

Максимум остаточных напряжений соответствует второму пику напряжений во взрывной сферической волне, получаемому [17] в результате численных расчетов для дилатирующих горных пород (первый соответствует фронту волны). Действительно, второй пик напряжений смещается во времени относительно мало, а его амплитуда, хотя и затухает, но сохраняется выше значений напряжений на больших и меньших расстояниях от центра взрыва. Второй пик, или же максимум остаточных напряжений, следует отождествлять с кольцевой «аркой», или сводом, окружающим полость. Как следует из расчетов [18], этот эффект пережатия, хотя и в меньшей степени, проявлялся также в пластически несжимаемых средах.

В то же время остаточные изменения плотности, исключаемые в традиционных упругопластических расчетах [18], характерны именно для дилатирующих сред. Если остаточное уплотнение еще можно отнести за счет воздействия на фронте ударной волны, то разуплотнение удается объяснить [10] только эффектом дилатансии.

Отметим также, что достижение максимальных деформаций уплотнения не сразу на фронте сферической взрывной волны в песках, а лишь через некоторое время после его прохождения [19] может также найти свое объяснение в зафронтальной дилатансионной интенсификации уплотнения за счет приложения сдвиговых напряжений [20].

Различие скоростей звука вдоль радиуса и в азимутальном направлении в среде после взрывного воздействия говорит об анизотропном характере остаточных изменений объема и сопутствующих изменений модулей Юнга. Этот результат согласуется с данными о яркой анизотропии при обработке порошков металлов взрывными волнами [21].

Понижение параметра гидравлической проводимости  $\Gamma$  и вне области сильного механического воздействия, т. е. там, где изменения акустических свойств и пористости среды не превышали порядка разброса опытных данных, говорит о небольших допредельных пластических деформациях порового пространства [22]. В этой связи укажем работу [23], согласно которой внешняя граница слабого механического воздействия — необратимых объемных деформаций порядка  $10^{-3}$  — в сухих суглинках простирается до  $r_k = 5$ .

Итак, уменьшение гидравлической проводимости  $\Gamma$  (фактически проницаемости) пористой среды обусловлено уменьшением объема пор (закрытием части пор). Конкурирующий механизм состоит в увеличении проницаемости вследствие генерирования взрывом системы новых трещин, и в испытанной высокопористой среде он практически отсутствует. Наоборот, в хрупкой малопористой среде (например, в граните) механизм трещинообразования оказывался преобладающим, и проницаемость [24] от периферии к центру взрыва монотонно возрастает (за исключением непосредственно прилегающей к полости зоны дробления, где начинается ее убывание в соответствии с описанной выше ситуацией для зоны пресованного порошка).

5. Сравним результаты (3.1) с данными других работ, сведенными в табл. 2. Оказывается, что ударные волны в испытанной пористой среде обладают показателем затухания  $n = 3,5$ , который больше, нежели соответствующий показатель для сухого песка или аллювия. Табл. 2 выявляет

Т а б л и ц а 2

Порода	$\rho \cdot 10^{-3}$ , кг/м <sup>3</sup>	$c$ , км/с	$\rho c^2 \cdot 10^{-2}$ , МПа	$n$	$A \cdot 10$	Интервал	Источник	Примечание
				3,4	36,5	$0,7 < \bar{r} < 3$		
Песок	1,7	0,215	0,786	1,8	9,5	$3 < \bar{r} < 10$	[6]	Лабораторные опыты
Песчаный грунт	1,5	0,08	0,096	3,3	2,8	$0,5 < \bar{r} < 2$	[8]	Натурные опыты
Аллювий	1,6	1,2	23	3,035	9,3	$\bar{r} < 0,15$	[4, 26]	»
Туф	1,85	2,14	84,7	2,084	140,7	$\bar{r} < 0,8$	[4, 26]	»
Каменная соль (пористая)	1,72	3,04	159	2,6	110	$1 < \bar{r} < 9$	[12]	Лабораторные опыты
	1,87	3,56	237	2,6	140	$1 < \bar{r} < 9$		
Каменная соль	2,12	4,42	414	2,5	297	$1,5 < \bar{r} < 9$	[26]	Натурные опыты
	2,14	4,5	433	1,6	122,5	$\bar{r} < 1,5$		
				2,16	364,5	$\bar{r} < 0,6$		
Тиосульфат натрия	1,8	4,5	364	1,7	421,2	$\bar{r} > 0,6$	[25]	Лабораторные опыты
Гранит	2,67	5,4	778	1,9625	620	$\bar{r} < 1$	[4]	Натурные опыты
»	2,7	5,0	675	2	700	$1 < \bar{r} < 20$	[2]	»

также заметные расхождения по коэффициенту  $A$  данных лабораторных экспериментов [6] с песком (влажность 5%), в ходе которых замерялись массовые скорости  $v_m$ , а напряжения находились пересчетом по формуле  $\sigma_r^m = \rho_0 v_m c$  и натуральных данных [8, 9] с прямым измерением напряжений во взрывной волне (влажность 3—6%).

Строго говоря, геометрическое подобие «по корню кубическому из энергии взрыва» требует использование не приведенного радиуса  $\bar{r}_i = R/W^{1/3}$ , а безразмерного  $\bar{r}_0 = R(\rho c^2/W)^{1/3}$  (см. [1]). Только при пересчете механического действия взрыва с одной энергии на другую в одной и той же среде приведенный радиус удовлетворяет требованиям теории подобия.

Если привести к безразмерному радиусу зависимость, то координата точки перелома  $\bar{r}_\tau = 0,47$ , соответствующей внешней границе зоны дилатационного разрушения, переходит в безразмерную координату  $\bar{r}_{0\tau} = R_\tau(\rho c^2/W)^{1/3} = 12$  (м·кг<sup>-1/3</sup>·МПа<sup>1/3</sup>) при  $\rho c^2 = 16,7 \cdot 10^3$  МПа.

Точка перелома для песка [6]  $\bar{r}_\tau = 3$  имеет соответствующую координату  $\bar{r}_{0\tau} = r_\tau (\rho c^2)^{1/3} = 12,8$  в тех же единицах. Для тиосульфата натрия, моделирующего монолитную горную породу [25], значение  $\bar{r}_\tau = 0,6$  переходит в  $\bar{r}_{0\tau} = 19,5$ . Таким образом, для пористых сред точка перелома имеет практически совпадающую безразмерную координату, тогда как для монолитной горной породы, взрывная энергия в которой диссипируется менее интенсивно, зона разрушения в 1,6 раза больше (по безразмерному радиусу).

Внешняя граница взрывного уменьшения проницаемости, как следует из фиг. 7, имеет координату  $\bar{r}_K \geq 2$ , что соответствует безразмерной координате  $\bar{r}_{0K} \geq 50,5$ . Эта же безразмерная координата границы необратимых

Таблица 3

Материал	$m$ , %	$\sigma^*$ , МПа	$c$ , м/с	$k$ , мД
Модель	25	25	3000	200
Песчаник	22	60	4500	150
Карбонаты	20	70	4500	100

объемных деформаций при взрыве в суглинках (при  $\rho = 1,65 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $c = 600$  м/с,  $\rho c^2 = 5,94 \cdot 10^2$  МПа) соответствует значению  $\bar{r}_k = 6$ , весьма близкому к фактически замеренному [23].

Таким образом, можно считать установленным, что остаточное взрывное уменьшение проницаемости

обусловлено необратимыми допредельными деформациями порового пространства.

6. Используемая в экспериментах искусственная пористая среда не является точным аналогом какой-либо конкретной горной породы. Это видно из табл. 3, где сопоставляются пористость  $m$ , прочность на одноосное раздавливание  $\sigma^*$ , скорость звука  $c$  и проницаемость  $k$  для модельного материала и для характерных прочных пористых геоматериалов.

Как видно из табл. 3, модельная среда менее прочна, чем естественные материалы той же пористости, а потому эффекты снижения проницаемости и отсутствия взрывных трещин в ней выражены в большей степени, чем следует ожидать при взрывах в указанных горных породах. Поэтому в натуральных условиях возможны некоторые количественные отклонения от полученных здесь данных. Вместе с тем именно излагаемые опытные результаты позволяют ярко выявить характерные особенности механического действия взрыва в пористых средах. Естественно, что конкурирующие эффекты трещинообразования (и сопутствующего увеличения проницаемости) будут возрастать с уменьшением пористости и увеличением прочности материала. Кроме того, заметные поправки будет вносить уровень литостатического давления (обжатия).

Поступила 23 IX 1980

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Родионов В. П., Адушкин В. В. и др. Механический эффект подземного взрыва. М.: Недра, 1971.
2. Христофоров Б. Д., Ромашов А. Н. Определение параметров волны сжатия в скальном грунте.— ФГВ, 1967, № 1.
3. Родионов В. Н. Разрушение и деформирование твердой среды взрывом. Взрывное дело, сб. 76/33. М.: Недра, 1976.
4. Holzer F. Measurements and calculations of peak shock-wave parameters from underground nuclear detonations.— J. Geophys. Res., 1965, vol. 70, N 4.
5. Адушкин В. В., Костюченко В. Н. и др. Механика подземного взрыва — Итоги науки и техники ВИНТИ. Мех. тв. деф. тела, 1973, т. 7.
6. Цветков В. М. О взрыве в песчаном грунте.— ПМТФ, 1962, № 5.
7. Зельманов И. Л., Колков О. С. и др. Движение песчаного грунта при камуфлетном взрыве.— ФГВ, 1968, № 1.
8. Ляхов Г. М. Основы динамики взрывных волн в грунтах и горных породах. М.: Недра, 1974.
9. Рыков Г. В., Скобеев А. М. Измерение напряжений в грунтах при кратковременных нагрузках. М.: Наука, 1978.
10. Николаевский В. П. О связи объемных и сдвиговых пластических деформаций и об ударных волнах в мягких грунтах.— ДАН СССР, 1967, т. 177, № 3.
11. Альтшулер Л. В. Рентгенографическое исследование начальной стадии развития камуфлетной полости в песчаном грунте.— ФГВ, 1970, № 3.
12. Христофоров Б. Д. Параметры ударных волн при взрыве сферического заряда в пористом NaCl.— ФГВ, 1971, № 4.
13. Пасечник И. П., Султанов Д. Д. Доминирующие сейсмические объемные волны при взрывах.— В сб.: Сейсмическое воздействие на гидротехнические сооружения. Труды Гидропроекта, 1971, № 20.
14. Бовт А. Н., Кобец В. И. и др. О напряженном состоянии цементированной пористой среды при камуфлетном взрыве.— ПМТФ, 1980, № 3.
15. Цветков В. М., Сизов И. А., Сырников Н. М. О механизме дробления твердой среды взрывом.— ДАН СССР, 1976, т. 231, № 5.



16. Zoback M. D., Byerlee J. D. A note on the deformational behavior and permeability of crushed granite.— *Int. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.*, 1976, vol. 13, p. 291.
17. Николаевский В. Н., Поляничев А. Н. и др. Дилатансионные эффекты при подземном камуфлетном взрыве.— *ДАН СССР*, 1980, т. 250, № 1.
18. Коротков П. Ф., Лобанов В. С. Расчет взрыва гексогена в алюминии.— *ПМТФ*, 1973, № 4.
19. Рыков Г. В. Влияние скорости деформирования на сжимаемость и сдвиг песчаных и глинистых грунтов при кратковременных нагрузках.— *ПМТФ*, 1969, № 3.
20. Николаевский В. Н., Лившиц Л. Д., Сизов И. А. Механические свойства горных пород. Деформации и разрушение.— *Итоги науки и техники ВИНТИ. Мех. тв. деф. тела*, 1978, т. 11.
21. Крупнин А. В., Соловьев В. Я. и др. Деформация металлов взрывом. М.: Металлургия, 1975.
22. Николаевский В. Н. Дилатансия и законы необратимого деформирования грунтов.— *Основания, фундаменты и мех. грунтов*, 1979, № 5.
23. Васильев Ю. И., Молотова Л. В., Щербо М. Н. О структуре поля напряжений в очаге и параметрах очага при взрыве в мягком грунте.— *Изв. АН СССР. Физика Земли*, 1979, № 11.
24. McKee C. R., Hanson M. E. Explosively created permeability from single charges.— *Soc. Petrol. Eng. J.*, 1975, December.
25. Спивак А. А., Цветков В. М. О взрыве в твердой среде типа горной породы.— *ФТПРПИ*, 1973, № 5.
26. Bukovich T. R., Lewis A. S. Aids for estimating effects of underground nuclear explosions. Lawrence Livermore Lab., UCRL — 50929, Rev. 1, 1973.

УДК 66.021.32 : 536.248.2

### ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОС В ЗАКРУЧЕННОМ ГАЗОЖИДКОСТНОМ СЛОЕ

*А. П. Бурдуков, М. А. Гольдштик, А. Р. Дорохов,  
В. И. Казаков, Т. В. Ли*

(Новосибирск)

Традиционный способ организации процессов переноса тепла и массы при прямом контакте фаз газ — жидкость на барботажных тарелках имеет определенные преимущества. На его основе созданы многочисленные типы тепло- и массообменных аппаратов, широко используемые в различных областях техники [1, 2]. Однако увеличение эффективности пенно-барботажных аппаратов наталкивается на принципиальные трудности, связанные с ограничением по скорости газовой фазы.

Дальнейшим развитием указанного способа является организация процессов тепло- и массопереноса в закрученных газожидкостных слоях, формирующихся в специальных вихревых камерах [3—5]. По данным [3] эффективность процессов переноса в вихревых газожидкостных аппаратах существенно выше, чем в обычных пенно-барботажных. Следует, однако, констатировать, что достаточно надежная методика расчета тепло- и массообмена в таких аппаратах отсутствует.

Важным этапом в создании методики расчета вихревых газожидкостных аппаратов является установление гидродинамических закономерностей газожидкостного слоя — его структуры, скорости вращения, среднего газосодержания, удельной поверхности контакта фаз (ПКФ) и т. п.

В результате предварительных гидродинамических исследований вихревой газожидкостной камеры [6] было установлено, что в поле центробежных сил, возникающих в закрученном слое, реализуется однородная пузырьковая структура слоя с диаметром пузырей  $d$ , значительно меньшим, чем в традиционных барботажных системах. Среднее газосодержание  $\phi$  слабо зависит при этом от скорости газовой фазы  $w$ , отнесенной к полной площади направляющего аппарата. Для подобной системы