

УДК 518.12:539.3

О ВОЗМОЖНОСТЯХ СНИЖЕНИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИИ СЕЙСМИЧЕСКОГО СИГНАЛА ПОДЗЕМНОГО ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА

В.А. Быченков, Н.С. Жилыева, Г.В. Коваленко, И.И. Кузнецова,
В.Ф. Куропатенко, А.В. Сковнень, Л.В. Хардина
(РФЯЦ-ВНИИТФ)

Представлены результаты расчетно-теоретического исследования сейсмического воздействия камуфлетного подземного ядерного взрыва в воздушных полостях, в мягком пористом грунте типа аллювия, в полости, заполненной пористым материалом, в частности, графитом. Получены расчетные и теоретические оценки коэффициента декаплинга на основе сопоставления сферических потенциалов упругих смещений взрывов в различных вмещающих средах для широкого интервала литостатических давлений. Проведен анализ функций сейсмического источника ядерного и химического взрывов.

Настоящая работа является продолжением проведенных ранее исследований сейсмической эффективности подземных ядерных взрывов [1]. Ее результаты могут быть использованы при решении проблем, связанных с контролем за соблюдением международных договоров по запрещению ядерных испытаний. Основное внимание уделено вопросам сейсмического декаплинга. Большая часть результатов получена для трех типов вмещающих сред: гранита, каменной соли и аллювия. Характеристики аллювия определены в соответствии с близостью расчетного потенциала упругих смещений с экспериментальными данными [2]. Основная часть расчетов выполнена в сферически-симметричном приближении. Учитывались испарение, полиморфные переходы, пористость, упругопластические свойства горных пород, перенос излучения в воздухе.

Ядерный взрыв в воздушной полости

Если пренебречь давлением около 0,1 МПа в воздушной полости, то начальное упругое напряженное состояние в горной породе определяется в сферически-симметричном приближении соотношениями

$$P = P_0; \quad S_r = P_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^3, \quad (1)$$

где P_0 — литостатическое давление на данной глубине взрыва; S_r — значение радиальной составляющей дивергента тензора напряжений; r_0 — радиус полости. В том случае, когда размер полости обеспечивает полный декаплинг, т.е. окружающая среда ведет себя упруго, установившееся после взрыва со-

стояние горной породы выражается формулами

$$P = P_0; \quad S_r = P_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^3 - 4\mu \frac{\zeta}{r}, \quad (2)$$

где μ — модуль сдвига; ζ — смещение. Так как при этом статическое давление P_{00} в воздушной полости равно сжимающему радиальному напряжению в горной породе у контактной границы, то, пренебрегая изменением радиуса полости, получаем

$$P_{00} = 4\mu \frac{\zeta_0}{r_0}, \quad (3)$$

где ζ_0 — смещение границы полости. Из (3) следует выражение для статического (конечного) значения потенциала:

$$f_{00} = P_{00} \frac{r_0^3}{4\mu}. \quad (4)$$

Если полость имеет достаточно большой размер, то излученной взрывом энергией можно пренебречь, и из (4) следует, что f_{00} пропорционально мощности взрыва и эффективному значению коэффициента Грюнайзена воздуха и обратно пропорционально модулю сдвига окружающей среды. Таким образом, если бы коэффициент Грюнайзена был константой, то начиная с некоторого значения радиуса полости r_0 вытесняемый взрывом объем f_{00} не зависел бы от величины противодействия P_0 и размера полости. Зная соответствующее радиусу r_0 конечное значение давления в воздушной полости P_{00} для взрыва в одной горной породе, с помощью соотношения (4) можно определить значение f_{00} в другой горной породе. Значение f_{00} тем меньше, чем больше модуль сдвига окружающей среды.

Если взрыв производится в воздушной полости, созданной ранее проведенным взрывом, то возникает

вопрос о влиянии на коэффициент декаплинга поврежденности (ослабленности) окружающей среды. Именно ослабленностью соли в результате взрыва "Сэлмон" было объяснено расхождение расчетных данных по коэффициенту декаплинга ($\eta = 120$) с экспериментальными ($\eta = 70$) последующего взрыва "Стерлинг" в полости "Сэлмон" [3,4].

Предположим, что модуль сдвига является функцией от радиуса горной породы в окрестности воздушной полости. Рассмотрим упругое решение задачи в перемещениях. Потребуем непрерывности радиальных напряжений и перемещений. Учтем, что на каждом участке постоянства μ конечное значение давления остается постоянным (при $r \rightarrow \infty$, $P \rightarrow P_0$), а конечное значение потенциала f_{00} не зависит от радиуса. Тогда путем разбиения интервала $[r_0, \infty)$ на участки постоянства μ и соответствующего предельного перехода вместо соотношения (4) может быть получено выражение для конечного значения потенциала в среде с переменным модулем сдвига:

$$f_{00} = \frac{P_{00}}{12 \int_{r_0}^{\infty} \mu(r) r^{-4} dr}. \quad (5)$$

Из (5), в частности, следует, что f_{00} возрастает, а коэффициент декаплинга уменьшается примерно в 1,5 раза, если модуль сдвига в интервале $r_0 \leq r \leq 2r_0$ меньше в 1,6 раза модуля сдвига для $r > 2r_0$.

Рассмотрим теперь случай, когда все характеристики горной породы после первого, связанного, взрыва остались неизменными, кроме прочности на разрыв в окрестности полости. Предположим, что полость имеет такой размер r_0 , что в случае неослабленной среды обеспечивается полный декаплинг, а в случае ослабленной — происходит ее разрушение в радиусе r_1 под действием растягивающих напряжений. В предельном случае можно предположить, что разрушенная горная порода обрушивается в полость или же происходит затекание продуктов взрыва по трещинам вплоть до радиуса r_1 . При этом очевидно, что конечное давление P_{00} продуктов взрыва остается практически неизменным. Тогда из соотношений (2)-(4) получаем, что вытесненный упругий объем возрастает в $(r_1/r_0)^3$ раз и становится равным

$$f_{00} = P_{00} \frac{r_1^3}{4\mu}.$$

Таким образом, коэффициент декаплинга также снижается в 1,5 раза, если в малой окрестности $r_0 \leq r \leq 1,45r_0$ среда разрушается и приходит в гидростатическое состояние $P = P_{00}$. Отметим, что неупругая деформация приводит в данном случае к усилению сейсмической эффективности взрыва. Причиной является освобождение запасенной в поле сил тяжести упругой энергии. Очевидно также, что чем больше оказывается область разрушения, возникающая под действием растягивающих напряжений

в результате взрыва в большой полости, тем больше вытесняемый упругий объем и тем ниже коэффициент декаплинга.

Таким образом, наиболее значимыми параметрами для коэффициента декаплинга взрыва в воздушных полостях больших размеров можно считать модуль сдвига μ и прочность горной породы на разрыв.

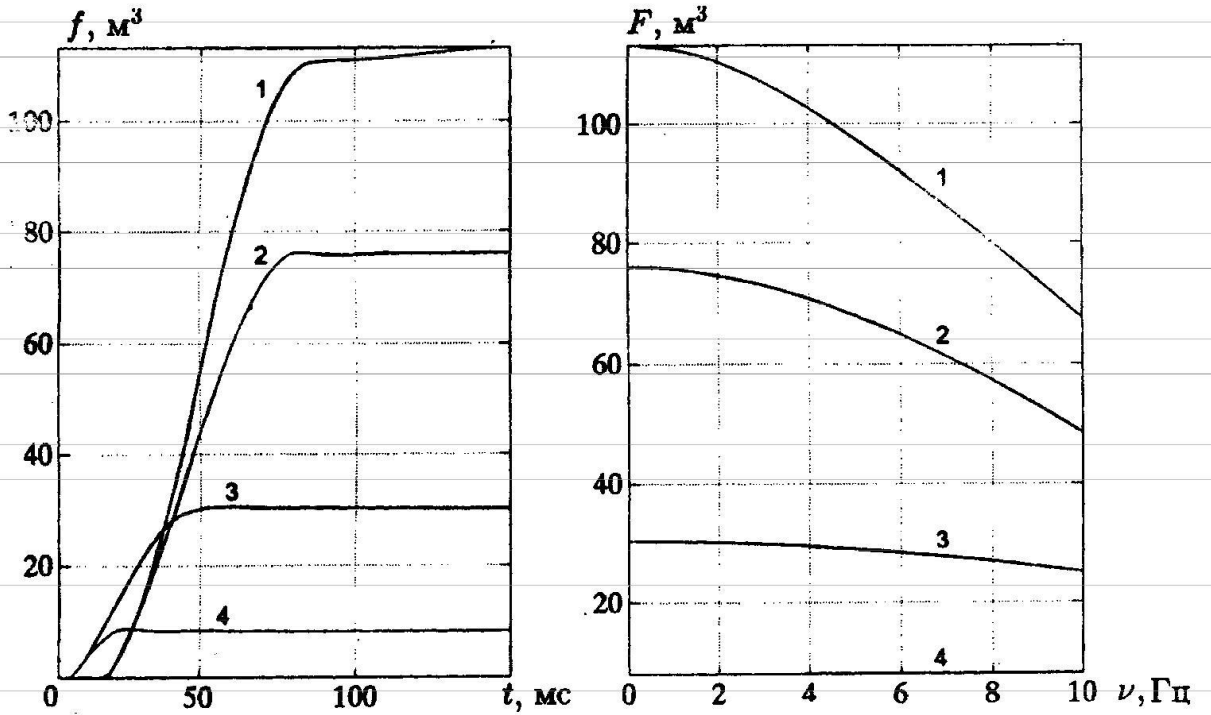
В работе [5] сделано предположение о том, что величина давления в окрестности полости "Сэлмон" на порядок ниже противодавления на данной глубине. Оно позволило получить в расчете коэффициент декаплинга взрыва "Стерлинг" существенно меньше, чем в рамках схемы упругого состояния (1). Предлагается использовать несколько иную, хотя в чем-то близкую с [5], концепцию. Считается, что в окрестности полости $r_0 \leq r \leq r_1$ горная порода ослаблена и представляет собой трещиноватую среду (модель см. в [1]). Напряженное состояние такой среды предполагается близким к гидростатическому состоянию воздушной полости. Расчеты декаплинга проводились как с начальным упругим состоянием (1), так и с ослабленной в окрестности полости $r_0 \leq r \leq 2r_0$ горной породой.

Практический интерес представляют такие размеры воздушной полости, которые обеспечивают коэффициент декаплинга порядка 10 и выше. В связи со сделанными замечаниями ниже представлены некоторые результаты расчетов ядерных взрывов в воздушных полостях средних и больших размеров для одной вмещающей среды — соли. При этом учитывались следующие обстоятельства. Во-первых, создание больших полостей в малопрочных горных породах технологически затруднительно. Во-вторых, коэффициент декаплинга большой полости может быть определен по данным расчета конечного значения давления в воздушной полости, созданной в прочной горной породе.

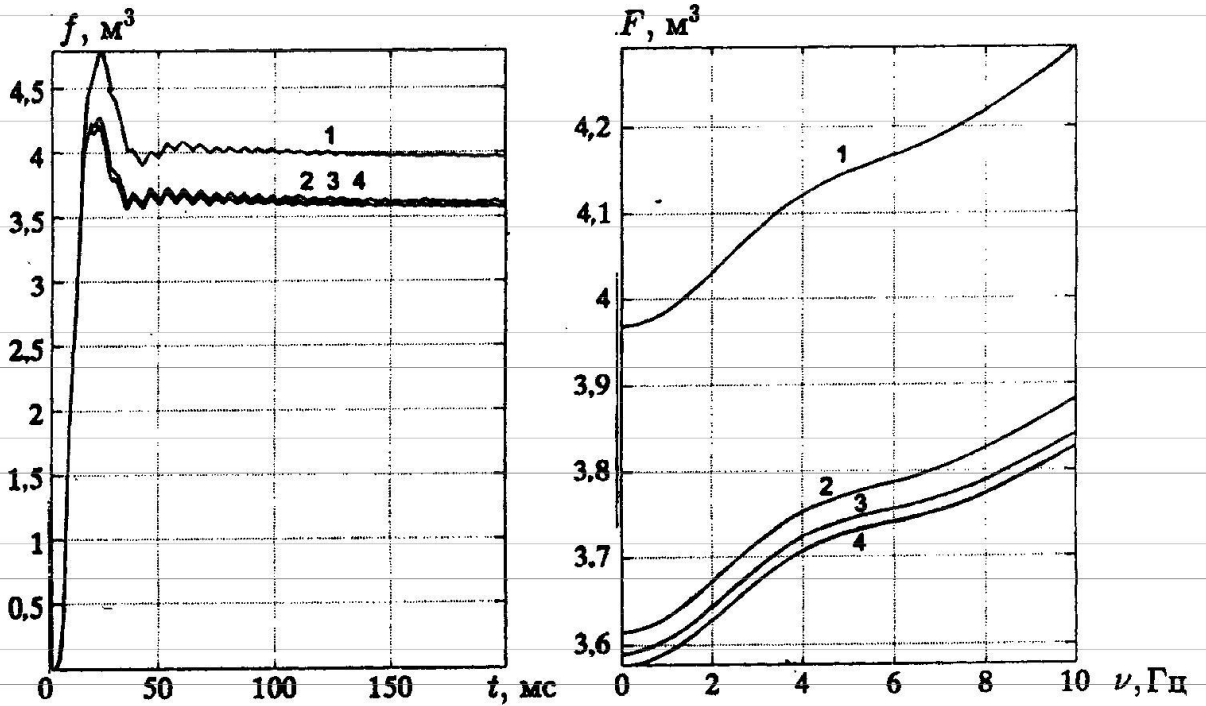
Расчеты функций сейсмического источника (ФСИ) подземного ядерного взрыва (ПЯВ) были выполнены по программе СПРУТ. Описание модели среды и методики расчета ФСИ дано в [1]. Получена следующая расчетная зависимость $P_{00}(r_0)$ конечного (статического) значения давления в полости от ее радиуса: 63,5 МПа (15 м); 22,2 МПа (20 м); 10,9 МПа (25 м); 6,0 МПа (30 м); 3,0 МПа (40 м).

На рис. 1 представлены расчетные зависимости потенциалов от времени и амплитуды спектра Фурье производной потенциала F от частоты ν для 4 значений противодавления P_0 и 2 радиусов полости в соли "Сэлмон".

Сравнение расчетных и экспериментальных данных по двум известным взрывам с декаплингом в соляных полостях иллюстрирует рис. 2. Рис. 2,а соответствует американским взрывам "Сэлмон"/"Стерлинг" [3] мощностью $W = 5,3/0,38$ кт, проведенным на глубине 830 м ($P_0 \approx 18$ МПа). Радиус полости принимался равным 16,7 м. Расчет взры-



а



б

Рис. 1. Расчетные ФСИ ПЯВ мощностью 1 кт в воздушной полости при различных значениях противодействия в соли "Сэлмон": а — $\tau_0 = 15 \text{ м}$; б — $\tau_0 = 20 \text{ м}$; 1 — $P_0 = 3 \text{ МПа}$; 2 — $P_0 = 6 \text{ МПа}$; 3 — $P_0 = 12 \text{ МПа}$; 4 — $P_0 = 24 \text{ МПа}$

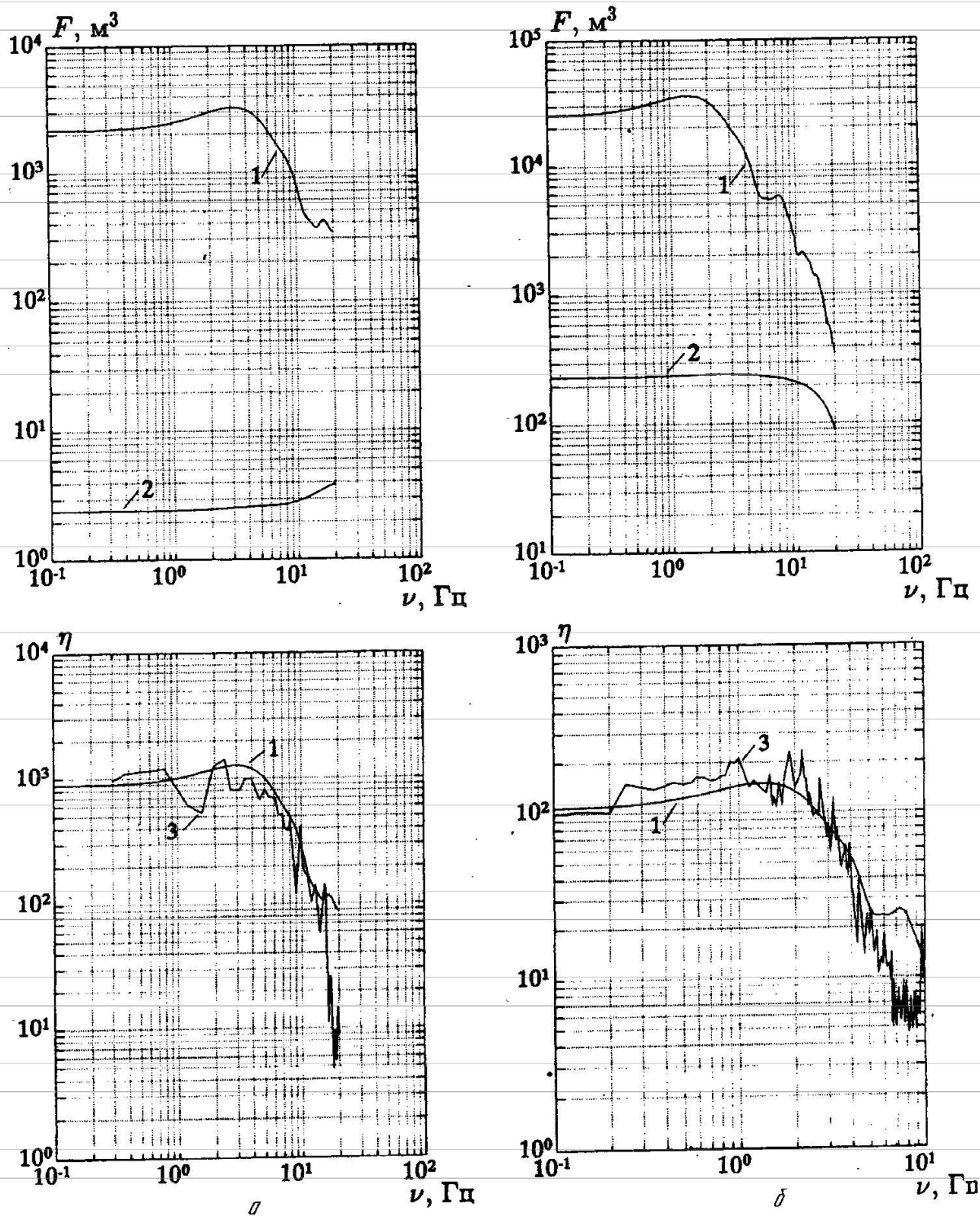


Рис. 2. ФСИ и коэффициент декаплинга ядерных взрывов "Сэлмон"/"Стерлинг" (а) и АШ/АШ-2 (б): 1,2 — расчет; 3 — эксперимент

ва "Стерлинг" осуществлен с ослабленной в радиусе $1,9r_0$ солью. Экспериментальная информация отвечает сейсмическим данным, полученным на расстояниях от 10 до 110 км. Аналогичная информация по советским взрывам АПП/АПП-2 мощностью $W = 64/11,5$ кт, проведенным на глубине 987 м ($P_0 \approx 21,3$ МПа), дана на рис. 2, б. Радиус полости принимался равным 36,2 м, а мощность взрыва АПП-2, так же как в [5], отвечала данным радиохимических измерений. Экспериментальная амплитуда спектрального отношения взрывов АПП/АПП-2 взята из [5] и соответствует сейсмическим измерениям на расстояниях от 2 до 113 км. В расчете взрыва АПП-2 ослабленная соль задавалась в радиусе $1,65r_0$. В этих условиях расчетные и экспериментальные данные хорошо согласуются. Коэффициент декаплинга η на частоте 1 Гц в расчетах оказался равным 72 ("Стерлинг") и 27 (АПП-2). Согласно экспериментальным сейсмическим данным соответствующие значения η равны 72 и 26. В расчете взрыва АПП-2 с ослабленной в радиусе $1,9r_0$ солью получен коэффициент декаплинга $\eta = 19$. Последнее значение лучше согласуется с телесеизмическими экспериментальными данными [6], согласно которым $\eta = 17$. Таким образом, в целом, модель ослабленной в окрестности $r \leq 1,9r_0$ полости приводит в хорошее соответствие расчетные и экспериментальные данные.

Наконец, на рис. 3 представлены результаты расчетов коэффициента декаплинга в соли "Сэлмон" на низких частотах $\eta_0 = (f_{00}W)_1 / (f_{00}W)_2$. Величина противодавления равнялась 21,3 МПа. Расчеты были выполнены для неослабленной и ослабленной в радиусе $1,9r_0$ соли. Здесь же для сравнения показаны данные расчетов Глена и др. с $P_0 = 21,3$ МПа [5], данные расчетов Стивенсона и др. с $P_0 = 18$ МПа [7], а также экспериментальные данные по взрывам АПП/АПП-2 и "Сэлмон"/"Стерлинг". Наилучшее согласие с экспериментальными данными дают расчеты в рамках предложенной выше модели ослабленной соли. Как это следует из рис. 3, максимальный коэффициент декаплинга в неослабленной соли (гипотетически, полости, полученной путем растворения соли), находящейся под давлением около 21 МПа, составляет примерно 120. В случае ослабленной соли максимальный коэффициент декаплинга снижается приблизительно в 1,5 раза. Исходя из соотношений (1)–(4) и соответствующих расчетов ядерных взрывов при плотной забивке можно оценить низкочастотный коэффициент декаплинга в других средах. Этот коэффициент пересчитывается из соотношения

$$\eta_{m2} = \eta_{m1} \frac{(\mu f_{00})_2}{(\mu f_{00})_1} = \eta_{m1} k_{21},$$

где $(f_{00})_{1,2}$ — конечные значения потенциала связанного взрыва при данном противодавлении.

На рис. 3 обращает на себя внимание немоно-

тонность зависимости коэффициента декаплинга от радиуса полости. При радиусах полости, больших $30 \text{ м/кт}^{1/3}$, коэффициент декаплинга имеет тенденцию к снижению. Объяснение этому можно найти, рассматривая сложную форму зависимости коэффициента Грюнайзена воздуха от термодинамического состояния (вдоль ударной адиабаты и изэнтроп) на рис. 4. Как показывает рисунок, коэффициент Грюнайзена Γ изменяется от значения 0,15 до 2/3. При малых размерах воздушной полости $\Gamma = 2/3$, однако за счет вклада давления и энергии излучения, для которых $\Gamma_{\text{изл}} = 1/3$, среднее эффективное значение Γ оказывается меньше. При увеличении радиуса полости в ней после установления равновесия реализуются более низкие температуры, которым, согласно рис. 4, отвечают меньшие значения Γ . При среднем значении удельной внутренней энергии, приблизительно равном 30 кДж/г, воздух в полости будет иметь наименьшее значение $\Gamma \approx 0,15$. Дальнейшее увеличение радиуса полости уменьшает значения температуры (~ 1500 К) и удельной внутренней энергии (~ 1 кДж/г), и коэффициент Грюнайзена в пределе возрастает до значения $\Gamma = 0,4$. Статическое значение потенциала (4) выражается через коэффициент Грюнайзена и модуль сдвига:

$$\frac{f_{00}}{W} = \frac{3 \Gamma}{16 \mu \pi}$$

Средние значения Γ в расчетах оказались равными 0,214; 0,176; 0,170; 0,162; 0,192 для соответствующих значений радиусов полости 15; 20; 25; 30; 40 м/кт^{1/3}. Таким образом, можно ожидать, что коэффициент декаплинга полости очень большого раз-

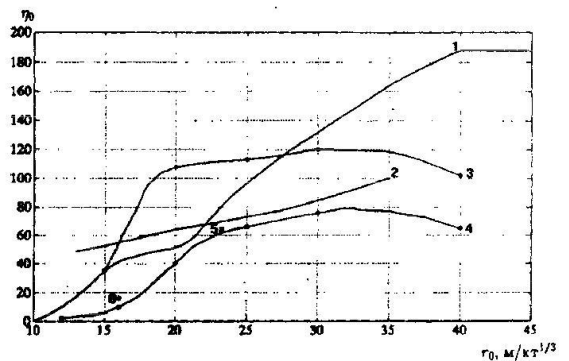


Рис. 3. Коэффициент декаплинга на низкой частоте как функция радиуса полости для ядерного взрыва в соли: 1 — расчеты Глена и др., $P_0 = 21,3$ МПа; 2 — расчеты Стивенсона и др., $P_0 = 18$ МПа; 3 — расчеты с неослабленной солью, $P_0 = 21,3$ МПа; 4 — расчеты с ослабленной в радиусе $1,9r_0$ солью, $P_0 = 21,3$ МПа; 5 — эксперимент "Стерлинг", $P_0 = 18$ МПа; 6 — эксперимент АПП-2, $P_0 = 21,3$ МПа

мера будет примерно в 2,5 раза меньше его максимального значения. Наибольший коэффициент декаплинга создает полость радиусом приблизительно 32–33 м/кт^{1/3}.

Снижение сейсмической эффективности ядерного взрыва пористыми материалами

Данные расчетов и экспериментов говорят о том, что эффективной энергопоглощающей средой является пористый материал, обладающий малым сопротивлением необратимому сжатию. Об этом же свидетельствуют, в частности, результаты расчетов ядерного взрыва в аллювии.

В соответствии с данными статических испытаний [8], проведенных в США, значение давления закрытия пор P_* в аллювии с начальной пористостью $\psi_0 = 0,07$ прием равным 20 МПа, предельное значение упругого давления — $P_e = 6,3$ МПа, а закон необратимого изменения объема — в виде

$$P = P_* (1 - \psi) \exp(-15\psi).$$

На рис. 5 показаны результаты расчетов ФСИ ядерного взрыва мощностью $W = 1$ кт в аллювии при двух значениях противодействия P_0 , равных 3 и 6 МПа. Сейсмическая энергия взрыва в аллювии оказывается на порядок ниже излученной энергии при взрывах в скальных и полускальных горных породах. Амплитуда спектра в низкочастотной области взрыва в аллювии снижается на порядок при наличии в его окружении (больше радиуса $r = 100$ м/кт^{1/3}) гранита. При этом возможно отрицательное значение конечного смещения гранита за счет большей величины выбранного объема пор в аллювии по сравнению с объемом полости. Можно предположить, что найдутся такие условия проведения взрыва в пористой мягкой горной породе, когда конечное смещение в окружающей скальной горной

породе и амплитуда спектра в низкочастотной области будут близки к нулю.

Повышение эффективности поглощения энергии ядерного взрыва может быть связано с заменой части пористой вмещающей среды в окрестности заряда на материал, обладающий высоким значением энергии сублимации. Таким материалом среди практически доступных является графит. Проведенные исследования показали, что оптимальная схема снижения сейсмической эффективности ядерного взрыва в полости примерно такова. Заряд должен быть окружен плотным графитом в радиусе около 1,5 м/кт^{1/3}. Затем располагается высокопористая среда, в частности, графит и, наконец, воздух. Практическая реализация такой схемы возможна для взрывов малой мощности в относительно небольших полостях.

В таблице представлены результаты расчетов коэффициента декаплинга $\eta(F)$ на частоте 1 Гц взрыва мощностью 1 кт в "прочном" граните с полостью, заполненной пористым раздробленным гранитом или графитом. Плотность графита в сфере радиусом 1,5 м принималась в этих расчетах равной 2,26 г/см³. Далее размещался графит с той или иной начальной пористостью. Пористость гранита в полости радиусом 10 и 20 м/кт^{1/3} принималась равной 0,25.

Отметим, что полость радиусом около 7 м/кт^{1/3}, не дающая декаплинга с воздухом, снижает сейсмическую эффективность ядерного взрыва примерно в 6 раз, если ее заполнить графитом с плотностью от 0,1 до 0,5 г/см³. Так же, как в случае воздушной полости средних размеров, эффективность энергопоглощения тем выше, чем выше прочностные характеристики основной горной породы. Влияние литостатического давления на эффективность энергопоглощения слабое.

Наконец, необходимо рассмотреть вопрос о влиянии на сейсмическую эффективность взрыва других факторов в постановке эксперимента. Проведенные в одномерной и двумерной постановках расчеты показали следующее. Нарушенная, в частности раз-

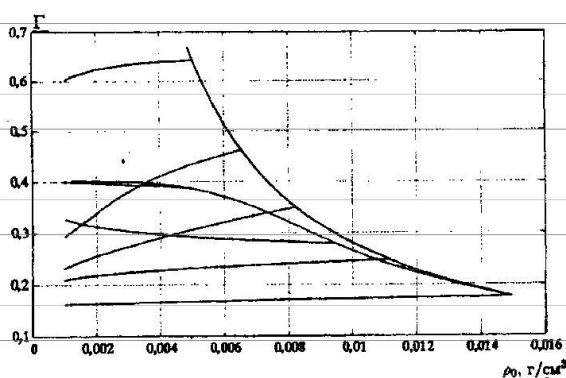


Рис. 4. Зависимость коэффициента Грюнайсена воздуха от плотности вдоль ударной адиабаты и изэнтроп разгрузки

Коэффициент декаплинга полости радиусом r_0

Энергопоглощающая среда	r_0 , м/кт ^{1/3}	Масса графита, т	$\eta(F)$
Гранит, $\psi = 0,25$	10	—	2,0
Гранит, $\psi = 0,25$	20	—	4,1
Графит, $\rho_0 = 0,5$ г/см ³	4	15,8	2,2
Графит, $\rho_0 = 0,5$ г/см ³	7	74,1	5,5
Графит, $\rho_0 = 0,5$ г/см ³	10	211,4	10,2
Графит, $\rho_0 = 0,1$ г/см ³	6,74	15,8	6,1
Графит, $\rho_0 = 0,1$ г/см ³	11,94	74,1	31,0
Графит, $\rho_0 = 0,01$ г/см ³	14,47	15,8	54,5

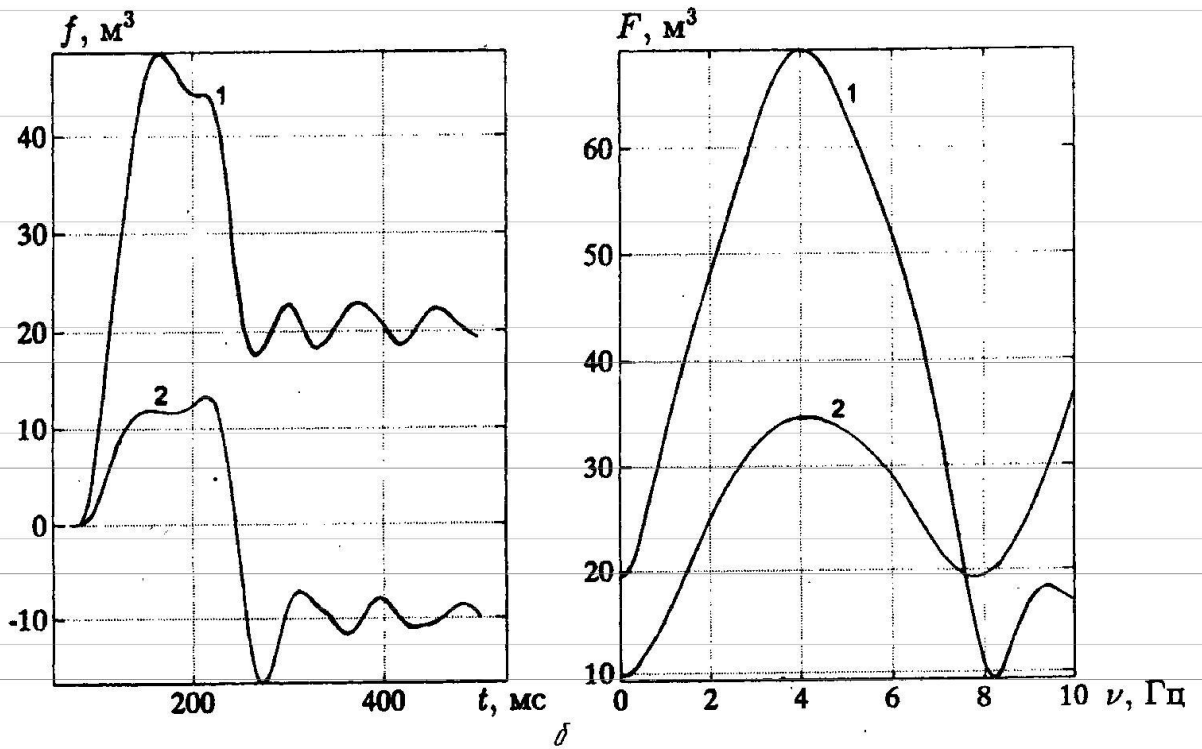
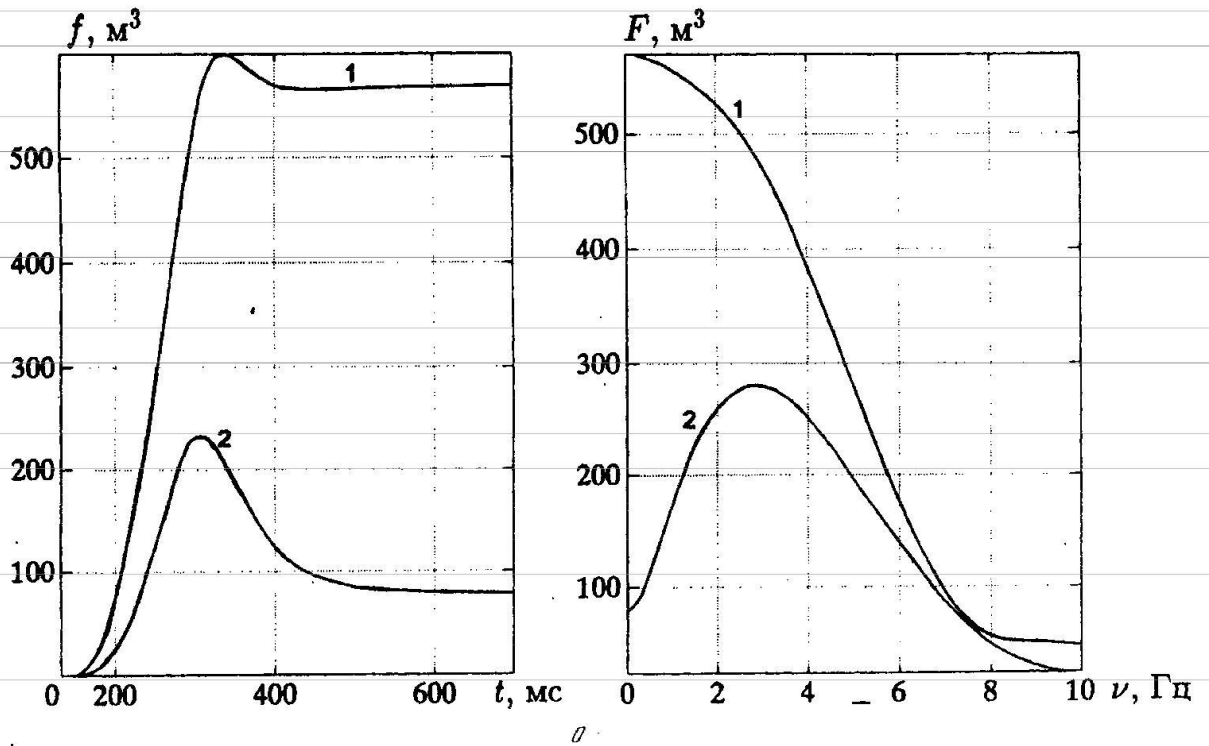
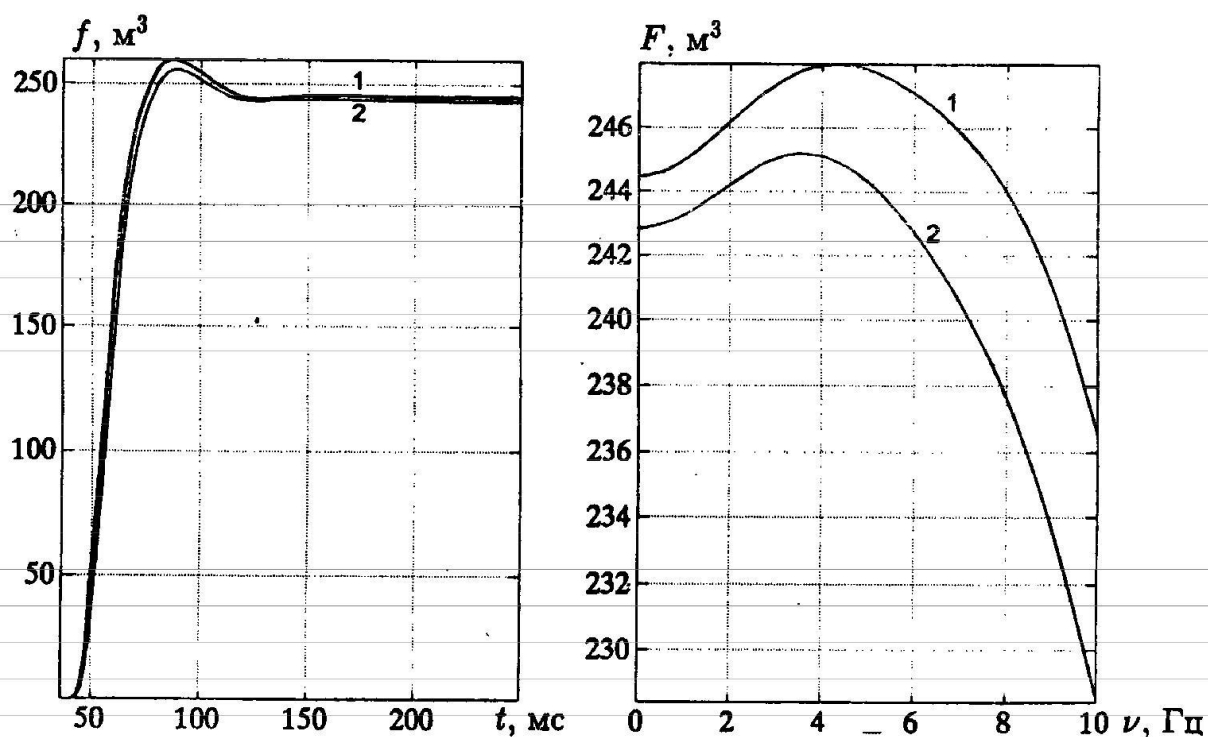
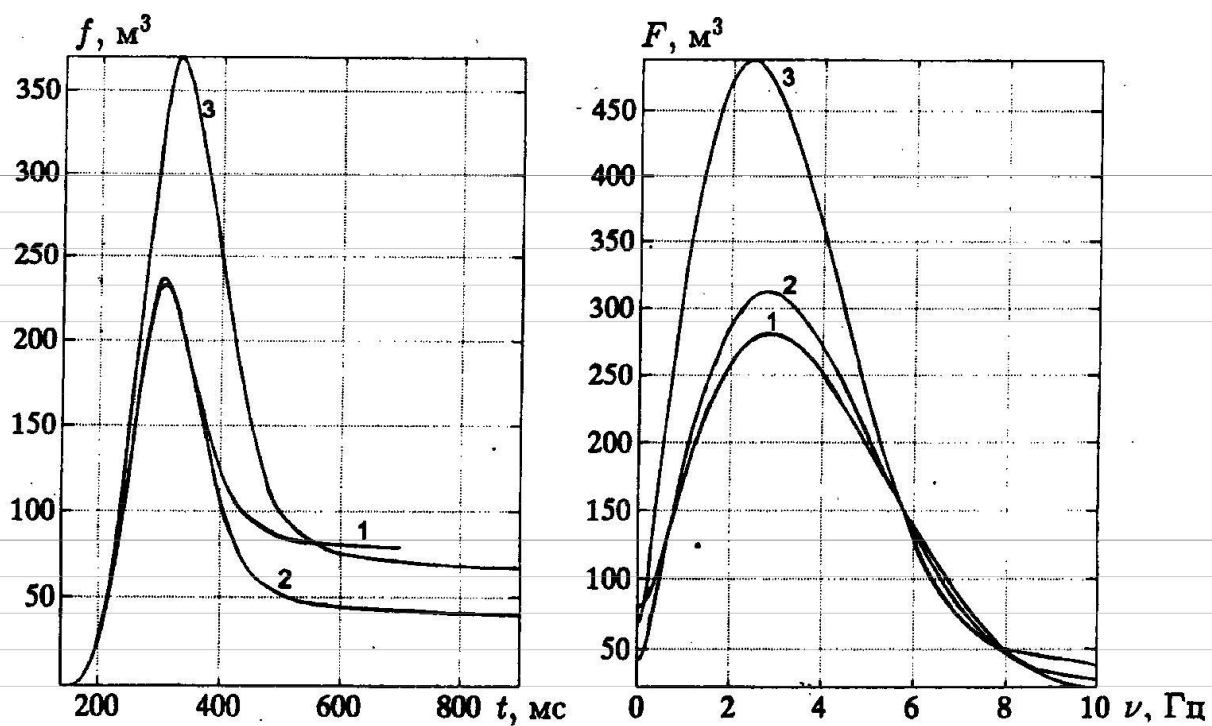


Рис. 5. Расчетные ФСИ ПЯВ мощностью 1 кт в аллювии: а — без учета слоистости горных пород; б — при наличии в окружении больше радиуса 100 м гранита; 1 — $P_0 = 3 \text{ МПа}$; 2 — $P_0 = 6 \text{ МПа}$



а



б

Рис. 6. Расчетные ФСИ ПЯВ и взрыва тротила: а — в граните: 1 — ядерный взрыв мощностью 1 кт; 2 — химический взрыв мощностью 541 т; б — в аллювии при противодействии 6 МПа: 1 — ядерный взрыв мощностью 1 кт; 2 — химический взрыв мощностью 630 т; 3 — химический взрыв мощностью 1 кт

дробленная в окрестности $50\text{--}100\text{ м/кт}^{1/3}$, среда способствует усилению сейсмического эффекта взрыва на уровне 10–20%. Осушение водонасыщенной среды типа туфа в окрестности около $10\text{ м/кт}^{1/3}$ снижает сейсмическую эффективность взрыва примерно в 1,5 раза. Полость, заполненная пористым графитом и имеющая форму вертикально вытянутого эллипсоида вращения с соотношением осей 1:5, дает сейсмический источник, практически совпадающий с источником от взрыва в сферической полости того же объема с $r_0 \approx 3\text{ м/кт}^{1/3}$.

Сравнение сейсмических источников ядерного и химического взрывов

Проводились расчеты взрыва тротила (ВВ) различной плотности и при различных условиях инициирования в скальных, полускальных и мягких горных породах. Результаты вычислений следующие. Сейсмическая эффективность взрыва тротила выше эффективности ядерного взрыва примерно в 1,5–2 раза — в зависимости от вмещающей среды, плотности тротила и условий инициирования. Так, при инициировании из центра тротила плотностью $1,6\text{ г/см}^3$ тротильный эквивалент для различных вмещающих сред, находящихся под давлением 3 МПа, составляет: 0,54 для прочного гранита; 0,60 для "прочной" соли; 0,62 для влажного туфа; 0,63 для сухого туфа; 0,65 для "непрочной" соли; 0,66 для аллювия. ФСИ ядерного и химического взрывов в целом близки друг к другу при соответствующем снижении мощности взрыва ВВ и практически совпадают, если ядерный взрыв проводить в воздушной полости радиусом около $2\text{ м/кт}^{1/3}$. Исключение составляет аллювий под давлением $P_0 = 6\text{ МПа}$. При взрыве ВВ эта среда порождает сейсмический сигнал, характер которого отличен от сигнала ядерного взрыва. Так, взрыв ВВ массой 1 кт при противодавлении 6 МПа дает потенциал, максимальное значение которого в 1,59 раза больше, чем при килотонном ядерном взрыве, т.е. соотношение, близкое к соотношению для взрывов при $P_0 = 3\text{ МПа}$. Однако статическое значение потенциала оказывается при этом в 1,18 раза меньше. На рис. 6 показано сравнение ФСИ ядерного и тротильного взрывов в прочном граните и аллювии под давлением $P_0 = 6\text{ МПа}$. Плотность ВВ равнялась $1,6\text{ г/см}^3$; а детонация рассчитывалась из центра. Масса ВВ в расчете с гранитом составляла 541 т, а в расчетах с аллювием — 630 и 1000 т.

Таким образом, сейсмические источники ядерного и химического взрывов в скальных и полускальных

горных породах практически неразличимы. В мягком грунте типа аллювия возможны такие условия проведения взрыва, при которых эти источники можно отличить.

Работа выполнена в рамках проекта МНТЦ (код проекта 001–94).

Список литературы

1. Бычков В.А., Демьяновский С.В., Коваленко Г.В., Куропатенко В.Ф., Минаева И.С., Сапожников А.Т., Симошенко В.А., Петровцев А.В. Сейсмическая эффективность камуфлетного подземного ядерного взрыва // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Теоретическая и прикладная физика. 1992. Вып. 2. С. 22–30.
2. Werth G.C., Herbst R.F. Comparison of amplitudes of seismic waves from nuclear explosions in four mediums // J. Geophys. Res. 1963. Vol. 68, N 5. P. 1463–1475.
3. Springer O., Denny M., Healy J., Mickey W. The Sterling experiment: decoupling of seismic waves by a shot-generated cavity // Ibid. 1968. Vol. 73. P. 5995–6011.
4. Rodean H.C. Nuclear-explosion seismology. U.S. Atomic Energy Commission, Division of Technical Information, 1971.
5. Glenn L.A., Goldstein P. Seismic decoupling with chemical and nuclear explosions in salt // J. Geophys. Res. 1994. Vol. 99, N B6. P. 11,723–11,730.
6. Sykes L.R. Magnitude and decoupling factor for 9-kiloton decoupled Russian explosion: implications for monitoring test ban treaties // EOS Trans. AGU. Fall Meeting suppl. 1992. Vol. 73(43). P. 359.
7. Stevens J.L., Murphy J.R., Rimer N. Seismic characteristics of cavity decoupled explosions in salt and tuff // Bull. Seismol. Soc. Am. 1991. Vol. 81. P. 1272–1291.
8. Bonner B.P., Abey A.E., Heard H.C. High-pressure mechanical properties of merline alluvium. UCRL–51252, Livermore, California, 1972.

Статья поступила в редакцию 27.06.96.