

УДК 622.235.5

ИЗУЧЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ТРАНШЕЙ ПРИ ГРУППОВЫХ ВЗРЫВАХ С ЛИНЕЙНО РАСПОЛОЖЕННЫМИ ЗАРЯДАМИ

И. М. Блинов, Ю. С. Вахрамеев

*ВНИИ технической физики,
454070 Челябинск*

С помощью разработанной во ВНИИТФ методики лабораторного моделирования исследованы групповые взрывы с целью создания длинных траншей (каналов). Получены зависимости минимальных сечений канала и других его размеров от основных параметров взрыва. Найдены условия создания каналов с минимальной волнистостью профиля по длине траншеи, выведен критерий экономичности и дан способ выбора параметров взрыва для сооружения канала заданного сечения при минимальном расходе взрывчатки. Результаты в модельных опытах сравниваются с размерами траншей при ядерных взрывах «Багги» (США) и Т-II (Россия).

Данная работа продолжает начатые в [1, 2] исследования подземных взрывов с выбросом грунта (вопросы подобия, метод лабораторного моделирования, эксперименты по решению конкретных задач). Описанный в [2] способ лабораторного моделирования выброса разработан в РФЯЦ — ВНИИТФ в те годы, когда обсуждалось применение крупных взрывов на выброс для решения разного рода хозяйственных задач, в том числе для предполагаемых работ по прокладыванию на территории России крупных каналов. По этой причине созданная методика применялась при исследовании групповых взрывов на выброс при линейном расположении зарядов. Здесь приведены результаты и обсуждение экспериментов по изучению эффекта от групповых взрывов такого рода при разных параметрах заложения зарядов. Получен критерий экономичности и дан способ выбора параметров заложения для получения канала заданного сечения при минимальном расходе взрывчатки. Проведено сравнение с натурными групповыми взрывами «Багги» и Т-II. Результаты относятся как к обычным взрывам, так и к ядерным.

Постановка опытов



Рис. 1. Общий вид моделирующей установки:
1 — вакуумная камера; 2 — емкость с имитатором грунта.

На рис. 1 показан общий вид моделирующей установки, описанной в [2]. Большие размеры размещаемой в вакуумной камере емкости ($3 \times 1,1 \times 0,6$ м) с песком или другим имитатором грунта позволяют проводить опыты с одновременным взрывом пяти линейно расположенных зарядов. Этого достаточно для получения информации о канале большой длины. Энергия взрыва одного заряда эквивалентна 0,2 г ВВ. Давление в камере снижалось до $p_0 = 130$ Па, что по условию

$\rho_0/(\rho_0 g V_{\max}^{1/3}) = \text{const}$ (V_{\max} — максимальный объем воронки при одиночном взрыве, ρ_0 — плотность грунта) соответствует моделированию натуральных взрывов в разных грунтах мощностью 2–10 кт. Однако при выбранном ρ_0 результаты можно относить и к более слабым натурным взрывам (сотни и даже десятки тонн), и к гораздо более мощным [2].

В итоге проведенных исследований [2] выбрана искусственная среда (прессованный песок с добавкой вакуумного масла), в которой воронки по форме близки к натурным. Работа с таким материалом более трудоемка, чем с обычным сухим песком. Если же проводить взрывы в насыпном песке, то воронки получаются более пологими: при том же объеме они в 1,2 раза шире и в 1,5 раза мельче, чем при крупных взрывах в реальных грунтах [2]. В то же время зависимость объема выемки от глубины взрыва h в относительных величинах $V/V_{\max} = f(h/V_{\max}^{1/3})$ передается неплохо.

Коэффициенты 1,2 и 1/1,5 довольно стабильны, поэтому прогнозы можно делать и на основе микровзрывов в песке, если вводить соответствующие поправки. Поскольку не было цели моделировать взрывы в конкретных грунтах (а лишь получение общих закономерностей), исследования проводили в насыпном песке. К тому же реальные каналы тоже могут быть пологими, когда прокладываются в песчаной пустыне или по заболоченной местности на водоразделе рек.

Пять зарядов одинаковой мощности E_0 размещали под горизонтальной поверхностью на одной глубине h с равным расстоянием l один от другого. Варьировали параметры $h = h/V_{\max}^{1/3}$ и $l = l/V_{\max}^{1/3}$ (безразмерные величины). Плотность насыпного песка $\rho_0 = 1,45 \pm 0,5$ г/см³, угол естественного откоса $\varphi = 33^\circ$. Из-за неизбежного колебания энергии отдельных микрочарядов и других факторов величина V_{\max} менялась от 2500 до 3000 см³ (в расчетах использовали значения $V_{\max} = 2750$ см³, $V_{\max}^{1/3} = 0,14$ м). Песок периодически обновляли, просеивали и провеивали для очищения от возникающих при взрывах различных примесей и пыли. Гранулометрический состав периодически контролировали.

Результаты опытов

В качестве основных параметров выемки выбраны форма и размеры поперечных сечений траншеи, от которых зависит водопрopusкная способность канала и его судоходность. В большинстве случаев продольный профиль траншеи получается в той или иной мере волнистым (рис. 2). Максимальные сечения S_{\max} , как правило, оказываются над местом заложения зарядов, а минимальные S_{\min} — посередине, между ними (сечения и линейные размеры измеряются до уровня (или по уровню) первоначальной поверхности).

Основные задачи исследований — установление зависимости $S_{\min}(h, l)$; нахождение условий, при которых S_{\max} и S_{\min} близки; определение зависимости минимальных поперечных размеров траншеи и объема выемки, приходящегося на один заряд, от h и l ; получение критерия экономичности и нахождение значений h , l и E_0 , соответствующих минимальному расходу взрывчатки на сооружение всей траншеи (черта сверху — безразмерная величина).

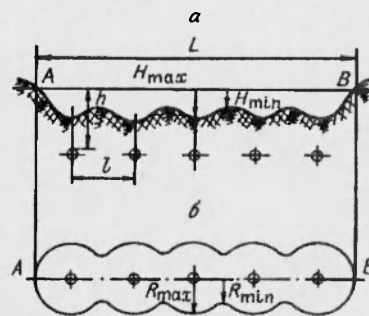


Рис. 2. Схематический рисунок траншеи:

а — вертикальный разрез вдоль оси;
б — вид сверху (контур по уровню первоначальной поверхности).

При проведении опытов глубина заложения зарядов менялась в пределах $h = 4 \div 20$ см ($\bar{h} = 0,28 \div 1,4$) с интервалом 2 см, а $l = 4 \div 28$ см ($\bar{l} = 0,28 \div 2,0$) с интервалом 4 см.

Минимальное сечение. На рис. 3 приведены зависимости $\bar{S}_{\min}(\bar{l})$ при разных \bar{h} . В исследуемом диапазоне h и \bar{l} с уменьшением \bar{l} на всех

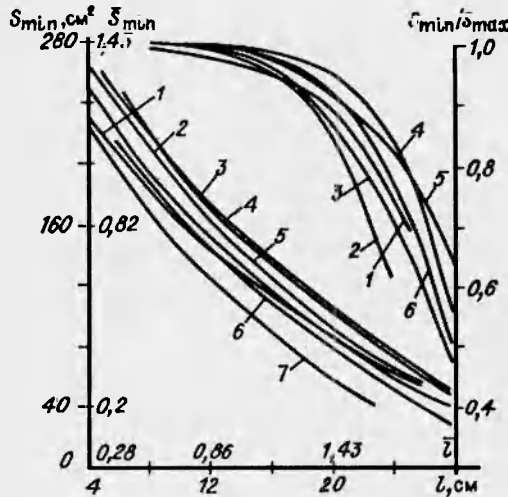


Рис. 3. Зависимости $S_{\min}(l)$ и $\frac{S_{\min}}{S_{\max}}(\bar{l})$.

h , см: 1 — 8, 2 — 10, 3 — 12, 4 — 14, 5 — 16, 6 — 18, 7 — 20.

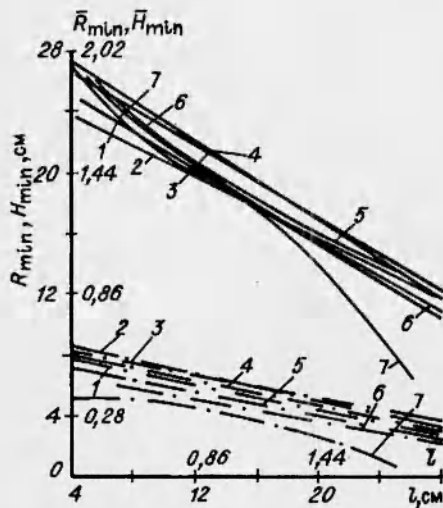


Рис. 4. Линейные выемки при разных h (обозначения см. на рис. 3).

— R_{\min} ; — — — H_{\min} .

0,5 \div 0,6. Неровность профиля отчетливо заметна после удаления навала грунта над уровнем первоначальной поверхности. Если $S_{\min}/S_{\max} \approx 1$, волнистость продольного профиля в районе дна траншеи незначительна.

Линейные размеры выемки. Для большого количества N зарядов длина траншеи $L = lN$ (при малых N на величине L сказывается эффект крайних зарядов). Для характеристики длинной траншеи важно знать ее размеры в поперечном направлении.

глубинах происходит увеличение \bar{S}_{\min} . Причина — лучшее взаимодействие зарядов при их сближении. Предельный случай $\bar{l} = 0$ соответствует взрыву одного заряда суммарной мощности, когда S_{\min} максимальна. С ростом \bar{l} не только снижается \bar{S}_{\min} , но сужается область возможных его значений при разных глубинах взрыва (кривые $\bar{S}_{\min}(h)$ становятся положе). При больших \bar{l} получаются отдельные воронки ($\bar{S}_{\min} = 0$). Величина \bar{S}_{\min} для всех \bar{l} имеет наибольшее значение при тех \bar{h} , которые оптимальны для одиночного взрыва ($\bar{h}_{\text{opt}} = 0,86$).

Волнистость профиля вдоль траншеи удобно характеризовать отношением S_{\min}/S_{\max} , приведенным на рис. 3 при разных \bar{l} и \bar{h} . Для $\bar{l} = 0,28 \div 1,1$ — это почти горизонтальные прямые на уровне $S_{\min}/S_{\max} = 0,93 \div 0,97$ практически во всем диапазоне глубин заложения. Однако сама величина S_{\min} для указанной области параметров при одном значении l отличается иногда в 1,5 раза, а при разных l — до 2,5 раз (взрывы при $l_1 = 4$ см, $h_1 = 16$ см и при $l_2 = 16$ см, $h_2 = 16$ см). Поэтому одного условия $S_{\min}/S_{\max} \approx 1$, принимаемого иногда на практике, еще недостаточно, чтобы утверждать, что взрыв проведен наилучшим образом.

С ростом \bar{l} волнистость продольного профиля увеличивается быстро: при $\bar{l} = 2$ $S_{\min}/S_{\max} =$

При $8 \leq l \leq 16$ см глубина и радиус траншеи в районе крайних зарядов заметно меньше, чем в центральной зоне (при $h = 18$ см и $l = 12$ см уменьшение по R 20 %, а по H 25 %). Когда же l лежит вне указанного диапазона, то существенного различия между средними и крайними участками по R и H не наблюдается. Линейные размеры в виде R_{\min} и H_{\min} для разных h и l показаны на рис. 4. На всех рисунках размеры приводятся для среднего участка траншеи.

Что касается полного объема выемки, то при $h > h_{\text{opt}}$ (для данного случая $h_{\text{opt}} = 12$ см) объем уменьшается с увеличением l . При $\bar{l} = 0,28 \div 1,14$ и $h \geq 1,14$ полный объем превышает пятикратную величину для одиночного взрыва при тех же глубинах заложения. Однако в любом случае пятая часть полного объема траншеи меньше величины максимального объема воронки для одиночного взрыва.

Количественная зависимость полного объема выемки от параметров заложения пяти зарядов для проектирования длинного канала не нужна и здесь не приводится. Более важно знать эффективный объем траншеи, приходящийся на один заряд.

Кроме основного навала вокруг траншеи образуются дополнительные гребни, направленные поперечно к оси траншеи (рис. 5). Крайние гребни расположены не в середине между зарядами, а смещены к концам траншеи,



Рис. 5. Дополнительные гребни в зоне навала.

к тому же при $8 \leq l \leq 14$ см их направление отклонено от перпендикулярного к плоскости симметрии на некоторый угол, величина которого для $h = 10$ см, $l = 12$ см достигает $\sim 30^\circ$. Навал имеет максимальную высоту по бокам выемки, превышающую высоту навала в торце в несколько раз.

Эффективный объем. Для данного канала удобно ввести понятие эффективного объема, приходящегося на один заряд: $v_{\text{эф}} = S_{\min} l$. В опытах с пятью зарядами S_{\min} определяется в районе среднего участка. Объем удобно вычислять, пользуясь рис. 3, где величина S_{\min} приведена в функции l при разных h . Кривая $S_{\min}(l)$ для $h = 12$ см идет выше других, если $l > 10$ см. Это позволяет легко отыскать абсолютный максимум функции $v_{\text{эф}}(h, l)$. Он соответствует точке $l = 16$ см ($\bar{l} = 1,14$) и $h = 12$ см ($h = 0,86$) при $\bar{S}_{\min} = 0,69$.

Из этих же результатов следует, что при изменении глубины заложения от $\bar{h} = 0,86$ до 1,3 величина $v_{\text{эф}}$ уменьшается всего на 15—20 %. Для ядерного взрыва (если случится их применять) переход на большие глубины важен, так как при этом очень сильно снижается выброс радиоактивных продуктов (примерно в 10 раз при увеличении \bar{h} в 1,5 раза [3]). На расходе ядерных материалов это почти не отражается.

Выбор оптимальных параметров заложения заряда ВВ

При прокладке канала с помощью обычной взрывчатки необходимо определить значения трех свободных параметров: h , l и количество (энергию) взрывчатки в каждом заряде E_0 . Выбираем их из условия наименьшего расхода ВВ на сооружение единичной длины канала с заданным S_{\min} .

(Здесь не рассматривается вопрос о судоходстве, а обеспечивается максимум сечения для лучшего прохождения воды, хотя на самом деле и форма сечения играет некоторую роль.) На практике, конечно, существуют дополнительные затраты, например на бурение скважин, которые тоже могут зависеть от данных параметров. При связи их с h , l и E_0 можно было бы решить более полную задачу на отыскание оптимума. В данной постановке эти затраты, как и форма сечения канала, не учитываются.

Считаем известными зависимости $S_{\min}(h, \bar{l})$, а следовательно, и $\bar{v}_{\text{эф}}(\bar{h}, \bar{l}) = \bar{S}_{\min}(\bar{h}, \bar{l}) \cdot \bar{l}$, и связь величины $V_{\max}^{1/3}$ с мощностью взрыва и параметрами грунта. Полученная в [6] последняя имеет вид

$$V_{\max}^{1/3} = C (E_0/\rho_0)^{1/3,6} = M \cdot E_0^{1/3,6}, \quad (1)$$

где $M = C\rho_0^{-1/3,6}$. Уточненные значения коэффициента C приведены в [1].

Первое условие поставленной задачи на оптимум — фиксирование заданного сечения канала:

$$S_{\min} = M^2 E_0^{2/3,6} \bar{S}_{\min}(\bar{h}, \bar{l}) = \text{const}. \quad (2)$$

Второе требование — максимум эффективного объема траншеи, приходящегося на единицу массы ВВ:

$$\max \frac{v_{\text{эф}}}{E_0} = \frac{M^3 E_0^{3/3,6}}{E_0} \bar{S}_{\min}(\bar{h}, \bar{l}) \cdot \bar{l}. \quad (3)$$

Подставим в (3) значение E_0 , выраженное из (2) через S_{\min} , и запишем условие (3) для данного грунта

$$\max \frac{v_{\text{эф}}}{E_0} \sim \bar{l} [\bar{S}_{\min}(\bar{h}, \bar{l})]^{1,3}. \quad (4)$$

При нахождении максимума этого произведения удобно воспользоваться зависимостями $\bar{S}_{\min}(\bar{l})$ при разных \bar{h} , приведенными на рис. 3. На основе верхней кривой семейства, отвечающей $h = h_{\text{opt}} = 0,86$, строим произведение $\bar{l} \cdot [\bar{S}_{\min}(\bar{l})]^{1,3}$ как функцию от \bar{l} . По положению максимума находим $\bar{l}_{\text{opt}} = 0,86$, при этом $\bar{S}_{\min} = 0,89$.

Далее из равенства $S_{\min} = S_{\min} M^2 E_0^{2/3,6}$ по заданной величине S_{\min} , значению $\bar{S}_{\min} = 0,89$ и параметру M для конкретного грунта определяем энергию зарядов E_0 . С помощью величин M и E_0 по (1) определяется $V_{\max}^{1/3}$, после чего находятся размерные значения h и l , соответствующие выбранному E_0 .

Оказывается, что критерий $\max(\bar{l} S_{\min}^{1,3})$ приводит к значению \bar{S}_{\min} , в $\sim 1,3$ раза большему, чем критерий $\max(\bar{l} S_{\min})$, и соответственно в $\sim 1,6$ раза меньшей мощности отдельного заряда (при заданном S_{\min} $E_0 \sim 1/S_{\min}^{1,3}$). Это явление есть следствие более эффективной работы зарядов меньшей мощности (так как $V_{\max} \sim E_0^{1/1,2}$, и это в критерии $\max(\bar{l} S_{\min}^{1,3})$ учитывается). В целом экономия в расходе ВВ при переходе от $\bar{l}_{\text{opt}} = 1,14$ к $\bar{l}_{\text{opt}} = 0,86$ незначительна, поэтому величину \bar{l}_{opt} практически можно выбирать любой в интервале $0,86-1,14$. Необходимо только, чтобы для выбранной \bar{l} находили соответствующие значения S_{\min} и E_0 .

При решении задачи на оптимум дополнительное требование $S_{\min}/S_{\max} \approx 1$ не выдвигалось. Для $\bar{l} = 0,86 \div 1,14$ оно автоматически выполняется: $S_{\min}/S_{\max} = 0,96 \div 0,98$ ($\bar{h} = 0,86$).

Сопоставление с результатами натуральных опытов

Эксперименты с несколькими (N штук) линейно расположенными ядерными зарядами проведены в США ($N = 5$, «Багги» [4]) и России ($N = 3$, опыт Т-II [5]).

На основе приведенного выше материала можно сопоставить результаты натурального опыта «Багги» в пересчете с модельных экспериментов в песке, соответствующих тем же относительным параметрам заложения зарядов. Опыт Т-II с тремя зарядами специально смоделирован в лабораторных условиях. Ниже даются результаты сравнения.

Эксперимент «Багги». Ядерные заряды мощностью 1,1 кт каждый располагались в базальте с $\rho_0 = 2,75 \text{ г/см}^3$ на глубине 41,2 м при равном расстоянии 45,7 м между соседними скважинами. В опыте получена ровная траншея с параметрами на среднем участке $D = 2R = 77,4 \text{ м}$, $H = 21,3 \text{ м}$ [4].

Расчет V_{\max} ведем по формуле (1) с уточненной величиной $C = 1,19$ (для базальта), приведенной в [1] (в (1) $V_{\max}^{1/3}$ — в м, если ρ_0 — в г/см^3 , а E_0 — в кг ВВ). Величина E_0 для ядерных зарядов уменьшается в 1,35 раза.

По этим правилам получаем для одиночного заряда в «Багги» $V_{\max}^{1/3} = 39,4 \text{ м}$, что в $k = 281,4$ раза больше, чем для микровзрывов в песке. В модели должно быть $l^m = 16,2 \text{ см}$, $h^m = 14,6 \text{ см}$ (индекс m вверху соответствует условиям модели). С помощью кривых на рис. 4 находим $R_{\min}^m = 18,6 \text{ см}$, $H_{\min}^m = 5,2 \text{ см}$. С учетом поправочного коэффициента 1,2 к R_{\min}^m и $1/1,5$ к H_{\min}^m для натурной траншеи получаем (индекс n — натурный эксперимент) $D^n = 2R_{\min}^n = 87,2 \text{ м}$, $H_{\min}^n = 21,9 \text{ м}$. Можно предположить, что поскольку при одиночных взрывах в насыпном песке отнесенные к $V_{\max}^{1/3}$ горизонтальные размеры выемки в 1,2 раза больше натуральных, то в модельных опытах следует в 1,2 раза увеличивать расстояние между зарядами. Тогда на основе тех же кривых (см. рис. 4) для натуральных выемок получается $D^n = 77,3 \text{ м}$, $H_{\min}^n = 19,0 \text{ м}$.

В обоих случаях данные неплохо согласуются с фактическими в опыте «Багги», где $D = 77,4 \text{ м}$, $H = 21,3 \text{ м}$. При этом поперечные размеры траншеи лучше воспроизводятся, когда при выборе l учитывается поправка 1,2 (при этом лучше моделируется эффект взаимного засыпания воронок). Напротив, глубина траншеи оказывается ближе к истинной, если расстояние между зарядами строго пропорционально $V_{\max}^{1/3}$.

Тройной взрыв Т-II проведен на участке, который «сложен эффузивно-осадочными породами верхнедевонского возраста, среди которых встречаются гравелиты, алевролиты и эффузивные породы ...» (цитируется из [5]). Три заряда мощностью 0,2 кт каждый размещались в скважинах на глубине 31,4 м, расстояние между скважинами 40 м. В результате образовалась выемка шириной $D = 61 \div 69$ и глубиной 16 м.

Из-за сложного состава породы трудно выбрать коэффициент C и определить V_{\max} . Однако вблизи того же места ранее проведен одиночный взрыв Т-I с таким же зарядом и на той же глубине, описанный в [5]. Объемная масса грунта $\rho_0 = 1,74 \text{ г/см}^3$. В опыте получена выемка глубиной 21 м и диаметром 68–80 м (объем не указан). Исходя из $H = 21 \text{ м}$ и среднего радиуса $R = 37 \text{ м}$, по приведенной в [6] формуле $V = 1,45R^2H$ находим $V = 4,17 \cdot 10^4 \text{ м}^3$. Принимаем это значение за V_{\max} , поскольку глубина взрыва в Т-I близка к оптимальной.

В лабораторных условиях опыт Т-II моделировался тройным взрывом в песчано-масляной смеси (при этом отпадает надобность в поправке к форме выемки). Для этой смеси $V_{\max} = 1,75 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$, коэффициент моделирования $k = 287,8$, параметры заложения микрочарядов $h^m = 10,9 \text{ см}$,

$l^m = 13,9$ см. При взрыве трех микрочарядов получена траншея с размерами в пересчете на натуру $D^m = 67 \div 71$ м и $H_{\text{мин}}^m = 18,5$ м. Согласие с реальными размерами в Т-II неплохое. Расхождение в обоих размерах — в одну сторону, что можно объяснить, например, некоторой неидентичностью грунтов на участках Т-I и Т-II.

Заключение

Экспериментальные данные по моделированию крупных групповых взрывов, полученные на лабораторной установке со взрывами микрочарядов в сухом песке, позволяют оценивать размеры выемки в натуральных условиях и давать рекомендации по параметрам заложения зарядов применительно к конкретным проектам.

Несколько замечаний по изложенному вопросу.

1. Неплохое совпадение размеров выемки в опыте «Багги» с размерами, рассчитанными по результатам модельных экспериментов, во многом обязано тому, что групповой взрыв «Багги» проведен в базальте, для которого достаточно точно определяется величина V_{max} на основе опытов с одиночными взрывами.

2. Набор формул для расчета V_{max} , приведенный в [1], ограничен, что не позволяет аккуратно рассчитать объем одиночной воронки в произвольной осадочной или горной породе. Поэтому в ряде случаев может потребоваться уточнение путем проведения одиночных взрывов в конкретных условиях.

3. Для лучшего предсказания эффекта для натуральных взрывов в плотных средах лабораторные опыты желательно проводить с применением предложенного в [2] имитатора грунта (он способен разрыхляться).

4. Характеризующее форму воронки отношение R/H для взрывов в рыхлом сухом песке и в реальных слежавшихся породах отличается в 1,8 раза. Причина этого, по-видимому, в существенной разнице эффективного коэффициента трения у насыпного песка и у способной к рыхлению среды с плотной упаковкой кусков. (Влияние пористости сыпучей среды на величину эффективного трения обсуждается в [6, 7].)

Авторы благодарят О. Г. Крусина, В. И. Куприянчука и В. П. Гомзикова за участие в проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вахрамеев Ю. С. Физические основы приближенного моделирования взрывов на выброс // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 35, № 1. С. 123–130.
2. Блинов И. М., Вахрамеев Ю. С. Способ моделирования взрывов на выброс микровзрывами ВВ // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 2. С. 102–109.
3. Израэль Ю. А., Петров В. Н., Прессман А. Я. и др. Радиоактивное загрязнение природных сред при подземных ядерных взрывах и методы его прогнозирования. Л.: Гидрометеоздат. 1970.
4. Келли Дж. Будущее проекта «Плаушер» // Атомная техника за рубежом. 1971. № 3. С. 43–45.
5. Мясников К. В., Прозоров Л. Б., Ситников И. Е. Механическое действие одиночных и групповых подземных ядерных взрывов на выброс и исследование инженерно-технических свойств выемок этих взрывов // Атомные взрывы в мирных целях. М.: Атомиздат, 1970. С. 52–74.
6. Вахрамеев Ю. С., Михельков Н. Г. О подобии взрывов в грунте и возможностях приближенного моделирования выброса // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Теор. и прикл. физика. 1988. Вып. 1. С. 63–72.
7. Вахрамеев Ю. С., Демьяновский С. В. Расширение газовой полости в рыхлящейся среде с сухим трением // Физ.-техн. пробл. разраб. полез. ископаемых. 1974. № 1. С. 38–42.

Поступила в редакцию 1/IV 1994 г.