

составляло  $\sim 10$  мкс, и полученная зависимость ПВ занимает самое верхнее положение. Не исключено, что такое расположение вызвано замораживанием некоторых химических реакций в ПВ. Нарушение равновесности ПВ при их расширении может приводить в пределах принятой модели детонационной волны к различным зависимостям в  $p - \rho$  (и других) координатах. Если выдвинутые объяснения оправданы, то для согласования данных, полученных разными методами, потребуется введение усложненной детонационной модели, учитывающей неравномерный характер расширения ПВ.

Поступила в редакцию 8/VIII 1983

#### ЛИТЕРАТУРА

1. С. М. Бахрах, А. А. Евстигнеев, В. Н. Зубарев и др. ФГВ, 1981, 17, 6.
2. Я. Б. Зельдович, А. С. Компанец. Теория детонации. М.: ГИТТЛ, 1955.
3. W. C. Davis, J. B. Ramsay. Seventh Symp. on Detonation, 1981.
4. J. B. Dzil, W. C. Davis. Los Alamos Sci. Lab. Rep., La-5926-Ms, 1975.
5. В. Н. Зубарев. ПМТФ, 1965, 2.
6. K. Burrows, D. K. Chilvers, R. Cyton e. a. Sixth Symp. on Detonation, 1976.
7. W. C. Rivard, Venable, Ficket. Fifth Symp. on Detonation, 1970.
8. В. А. Цукерман, М. А. Манакова. ЖТФ, 1957, 27, 2.
9. Ю. Д. Бакулин, В. С. Дзянков, В. П. Ковалев. ПТЭ, 1979, 2.
10. N. L. Coleburn, T. P. Liddiard. J. Chem. Phys., 1966, 44, 5.
11. М. В. Жерноклетов, В. Н. Зубарев, Г. С. Телегин. ПМТФ, 1969, 4.

#### ОБ ЭФФЕКТИВНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ СОСРЕДОТОЧЕННЫХ ЗАРЯДОВ ВЫБРОСА

*О. А. Арутюнов, С. С. Григорян, Р. З. Камалян*

*(Ташкент, Москва)*

Среди многочисленных эффектов подземного взрыва наиболее интересен с точки зрения его практического применения эффект образования воронок (выемок) выброса системой взаимодействующих зарядов. Под эффектом взаимодействия зарядов ВВ понимаются те изменения линейных параметров, объема и формы, которые характеризуют выемку, образовавшуюся в результате совместного действия взрывов. Данной проблеме посвящены как теоретические [1, 2], так и экспериментальные работы [3—6]. Однако несмотря на это, многие вопросы, связанные с практическим применением взаимодействующих зарядов, до сих пор не решены. Возможности решения некоторых из этих вопросов посвящена настоящая работа.

1. Взрыв одиночного заряда, рассчитанного на выброс грунта, сопровождается расширением газовой полости, образованием волны сжатия и поля скоростей движущихся частиц, формированием контуров истинной воронки, перемещением грунта в сторону дневной поверхности и его выбросом за пределы воронки. По окончании выброса происходит стабилизация откосов воронки, приводящая к уменьшению первоначальной глубины и изменению ее формы [7]. Однако объем воронки при этом остается неизменным [7], так как при взрыве заряда выброса обратное падение грунта исключается [8], а разрыхление среды при стабилизации откосов незначительно.

Очевидно, что при взрыве двух одинаково заглубленных и равных по массе взаимодействующих зарядов картина движения грунта, а следовательно, и результат выброса будут отличаться от взрыва одиночного заряда. Вопрос о том, насколько эффективно взаимодействие зарядов в зависимости от расстояния между ними, представляет до сих пор нерешенную проблему. Сразу отметим, что основной положительный эффект взаимодействующих зарядов зависит от конкретно поставленной задачи. Например, при строительстве протяженных профильных выемок положительный эффект заключается в осуществлении направленного выброса

грунта с соблюдением условия максимального соответствия фактических параметров выемки проектным и отсутствием перемычек по ее дну между зарядами. Для ответа на эти важные с практической точки зрения вопросы проанализируем результаты некоторых теоретических и экспериментальных исследований с последующим сопоставлением их с данными по крупномасштабным взрывам.

В плане теоретических исследований наиболее интересны, по-видимому, работы [1, 2], где на основе гидродинамической модели проведены расчеты воронки выброса от взрыва двух поверхностных зарядов. Авторами выбор поверхностных зарядов объясняется тем, что в этом случае исключается влияние глубины их заложения.

Напомним основные положения гидродинамических моделей действия взрыва в грунтах: среда является идеальной и несжимаемой, поле скоростей создается в области мгновенно и определяется соотношениями

$$\bar{v} = \text{grad } \varphi, \quad \varphi = -1/\rho \cdot p, \quad p = \int_0^{\tau} p(t) dt,$$

где  $\rho$  — плотность среды;  $\varphi$  — потенциал скоростей;  $p$  — давление;  $v$  — скорость;  $\tau$  — время существования значительных величин  $p(t)$ . Основная задача и состоит в определении  $\varphi$  при данной конфигурации зарядов и заданных геометрии среды и размещения зарядов.

Действие двух сосредоточенных поверхностных зарядов в гидродинамической модели описывается диполями с моментом  $M$ . Величина  $M$  для поверхностного заряда определяется формулой  $M = \rho l$ , где  $l$  — длина заряда. Так как  $\varphi$  пропорциональна толщине зарядов, то  $M$  пропорциональна энергии заряда. В соответствии с теорией размерностей характерный размер воронки от такого заряда пропорционален  $\sqrt{M/c_*}$ , где  $c_*$  — некоторая «критическая» скорость движения жидкости, а площадь воронки пропорциональна энергии ВВ. Отсюда следует, что при слиянии двух сосредоточенных поверхностных зарядов площадь воронки  $S$  оказывается равной суммарной площади невзаимодействующих зарядов.

В жидкостной постановке комплексный потенциал, создаваемый при взрыве двух одинаковых зарядов на поверхности грунта, определяется выражением [2]

$$w(z) = Mi[(z-a)^{-1} + (z+a)^{-1}], \quad (1)$$

где  $2a$  — расстояние между зарядами. Для получения координат края воронки необходимо продифференцировать (1) и приравнять его  $c_*$  [2]. В результате таких операций получено

$$x_1 = \sqrt{2M/c_*} \cdot [1/2 + a^2 c_*/2M + (1/4 + a^2 c_*/M)^{1/2}]^{1/2}. \quad (2)$$

Из (2) следует, что при  $a = 0$   $x_1 = \sqrt{2M/c_*}$  (сдвоенный заряд). При удалении зарядов одного от другого ширина воронки несколько увеличивается, а глубина уменьшается: Площадь профиля при этом сначала уменьшается, а затем, когда образуются отдельные воронки, суммарная площадь снова равна первоначальной [2]. Аналогичный результат получен и в [1] при рассмотрении задачи в струйной постановке (рис. 1). Несколько позже предложенный результат распространить и на действие заглубленных зарядов [3]. Таким образом, в соответствии с упомянутыми теоретическими исследованиями взаимодействие зарядов приводит к уменьшению объема воронки выброса.

Выводы, вытекающие из указанных работ, кажутся парадоксальными и логично было бы усомниться в них, учитывая достаточную приближенность метода. Однако прежде обратимся к результатам экспериментальных модельных исследований взрывов. Наиболее полно, на наш взгляд, механические эффекты взаимодействующих зарядов изучены в работе [4], результатами которой воспользуемся. Взрывы зарядов тэна массой 0,2 г и диаметром 6,3 мм проводили во влажном песке. Объем воронки  $V$  от

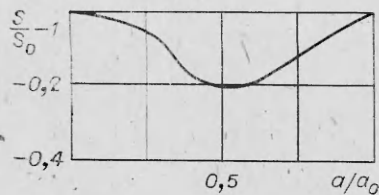


Рис. 1. Зависимость площади воронки от расстояния между зарядами.

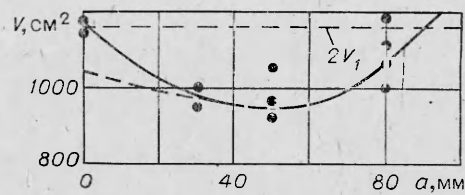


Рис. 2. Зависимость объема воронки от расстояния между зарядами.

взрыва одиночного заряда на оптимальной глубине  $h = 50$  мм составил  $580 \text{ см}^3$ . Значение показателя простреливаемости для использованного в работе песка ( $\rho = 1,5 \text{ г/см}^3$ , влажность  $W = 5\%$ )  $K_{\pi} = 1250 \text{ см}^3/\text{г}$ . Радиус котловой полости  $R_0 = 40$  мм. Зависимость  $V = V(a)$  представлена на рис. 2. Видно, что при увеличении расстояния между зарядами величина объема уменьшается от  $V = 2V_1$  ( $V_1$  — объем воронки от взрыва одиночного заряда) до некоторого  $V_{\min}$  при  $a = 50$  мм, затем начинает возрастать и достигает  $2V_1$  при  $a = 90$  мм. Таким образом, качественно кривая  $V(a)$  для заглубленных зарядов походит на  $S(a)$ . Однако вызывает сомнение равенство  $2V_1 = V_2$  ( $V_2$  — объем воронки выброса от сдвоенного заряда  $2Q$ , расположенного на той же глубине  $h$ ). В этом прежде всего можно убедиться, сопоставив объемы  $2V_1$  и  $V_2$  с помощью расчетных формул. В работе [7] зависимость между объемом воронки и массой заряда  $Q$  представлена в виде

$$V = 0,85K_{\pi}Q + bQ^{0,75}. \quad (3)$$

В выражении (3) первое слагаемое представляет собой часть объема видимой воронки, которая образована за счет котловой полости, второе слагаемое — собственно объем выброшенного грунта. Расчет проведем для исходных данных [4]:  $K_{\pi} = 1250 \text{ см}^3/\text{г}$ ,  $Q = 0,2 \text{ г}$ ,  $V = 580 \text{ см}^3$ , расчетное значение  $b = 1225 \text{ см}^3/\text{г}$ . Тогда

$$\frac{2V_1}{V_2} = \frac{2 \cdot 580}{0,85K_{\pi}(2Q) + b(2Q)^{0,75}} = 1,18 > 1.$$

Аналогичный результат можно получить, если воспользоваться примененным в [3] методом, т. е. построением функции вида

$$2V_1/V_2 = f(n_1), \quad (4)$$

где  $n_1$  — показатель действия взрыва одиночного (невзаимодействующего с соседним) заряда.

Функция (4) оказывается монотонно возрастающей, т. е. при всех  $n_1 > 1$  двойной взрыв невзаимодействующих зарядов выбрасывает больше грунта, чем одиночный взрыв заряда удвоенной массы. Разумеется, сопоставить можно объемы при взрыве зарядов  $Q$  на оптимальной глубине  $h$ . При меньших глубинах коэффициент полезного использования энергии заряда  $Q$  уменьшается, а при больших — энергии для полного выброса недостаточно и наблюдается обратное падение грунта, что нарушает принцип постоянства объема после стабилизации бортов [7].

Неправомерность равенства  $2V_1 = V_2$  вытекает и из следующих очевидных соображений. При взрыве заряда массы  $Q$  на оптимальной для нее глубине  $h$  образуется воронка максимального объема. Для заряда же массы  $2Q$  глубина не является оптимальной и соответственно объем образующейся воронки меньше максимального, т. е. КПД по выбросу грунта заряда массы  $2Q$  на глубине  $h$  меньше КПД заряда массы  $Q$ . Поэтому соотношение  $2V_1 > V_2$  для одних и тех же грунтов является естественным. В связи с этим правильнее было бы начальный участок кривой, приведенный на рис. 2, представить так, как показано штриховой кривой. Совпадение же экспериментальных точек с  $2V_1$  можно объяснить или погрешностью измерений, тем более, что разница между  $2V_1$  и  $V_2$  невелика,

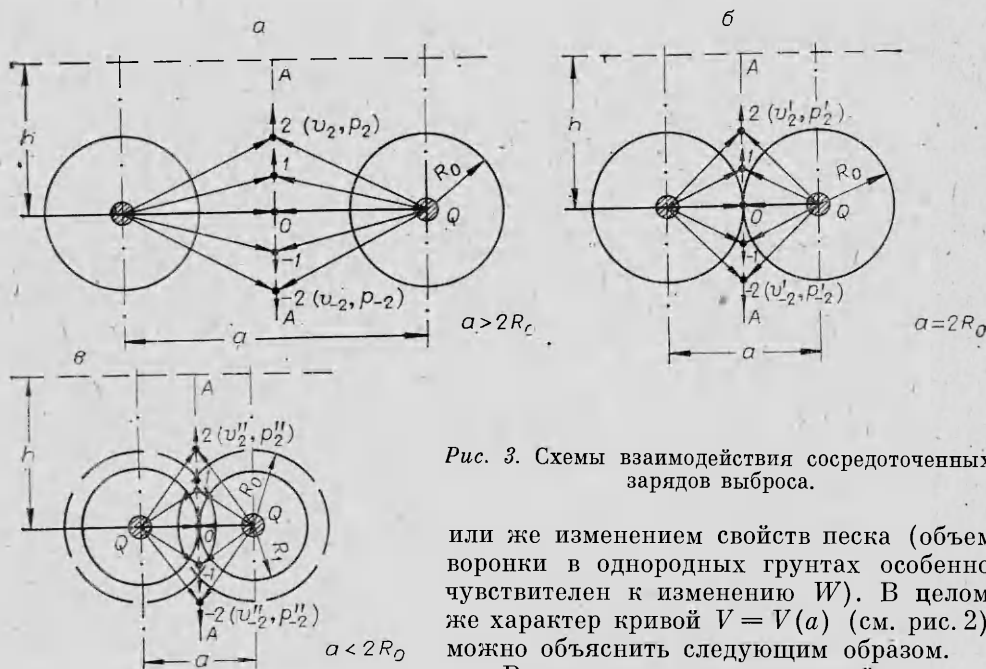


Рис. 3. Схемы взаимодействия сосредоточенных зарядов выброса.

или же изменением свойств песка (объем воронки в однородных грунтах особенно чувствителен к изменению  $W$ ). В целом же характер кривой  $V = V(a)$  (см. рис. 2) можно объяснить следующим образом.

Рассмотрим схему взаимодействия зарядов массы  $Q$ , расположенных на оптимальной глубине  $h$  и удаленных друг от друга на различные расстояния (рис. 3). Очевидно, что

$$v_i < v'_i < v''_i,$$

$$p_i < p'_i < p''_i \quad (i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots).$$

Пусть  $R_0$  — максимальный радиус полости при взрыве заряда  $Q$  на глубине  $h$  к моменту окончания симметричной стадии взрыва. При увеличении расстояния между зарядами от нуля до некоторого значения  $a_k$  возникает область усиленного взаимодействия  $AA$ , в направлении которой действие продуктов детонации взаимно компенсируется и тем самым ослабляется действие взрыва во внешних областях общего купола. Причем, при  $a_k < 2R_0$  соединение полостей происходит раньше, чем они достигнут максимальных размеров. В результате такого взаимодействия резко возрастают скорости движения частиц грунта в области  $AA$  [4, 5], что свидетельствует об увеличении кинетической энергии выбрасываемой среды в этой области. Одновременно, благодаря перераспределению энергии продуктов детонации, возникает интенсивное встречное движение возрастающих масс грунта, приводящее к резкому повышению необратимых потерь энергии ВВ. При  $a > a_k$  давление газов к моменту встречи полостей успевает снизиться до некоторого значения  $p_{кр}$  (соответственно снижаются и скорости встречного движения масс грунтов), начиная с которого происходит уменьшение необратимых потерь в области взаимодействия зарядов и соответственно увеличивается объем воронки, достигая величины  $2V_1$  при значениях  $a$  порядка  $2R_0$ .

Таким образом, при близком расположении зарядов их взаимодействие протекает неэффективно, так как, вообще говоря, грунт из области  $AA$  может быть выброшен и одним зарядом, действие же второго в этом случае выражается в дополнительном ускорении движения среды. Отсюда следует, что для уменьшения области неэффективного взаимодействия необходимо располагать заряды на таком расстоянии, чтобы развитие каждого взрыва было максимальным. Следует отметить, что объем общей воронки (выемки) при увеличении расстояния между зарядами продолжает возрастать и достигает некоторого максимального значения  $V_{max} > 2V_1$ . Однако в этом случае в области  $AA$  возникает перемычка, высота которой

Таблица 1

Пикеты	Ширина канала по верху, м	Глубина канала, м
66—194	35—44	7—10
194—227	44—59	10—15
227—330	29—44	5—10
330—356	44—50	10—12

Примечание. Коэффициент заложения откосов  $m = 1,5$ , ширина по дну канала 14 м.

Таблица 2

Пикеты	$h$ , м	$Q$ , кг	$a$ , м	$R_0$ , м	Величина $a$ в долях глубины заложения $h$
88—36	10,6	5200	8,0	3,17	0,75
70—00	11,2	4200	7,0	2,05	0,62
323—00	12,4	6100	6,0	3,34	0,48

в зависимости от свойств грунтов может достигнуть существенной величины. Учитывая, что начало возникновения перемычки, согласно [4], соответствует расстоянию  $a = 2R_0$ , наиболее оптимальным (в смысле качества образующейся воронки) следует считать расстояние, равное  $2R_0$ , значение которого можно определить следующим образом. Согласно [7], к моменту окончания стадии симметричного развития взрыва объем образующейся сферической полости равен  $0,85K_{\pi}Q$ , т. е.

$$\frac{4}{3} \pi R_0^3 = 0,85K_{\pi}Q,$$

откуда

$$R_0 = \sqrt[3]{\frac{2,55K_{\pi}Q}{4\pi}}. \quad (5)$$

Отсюда для оптимального расстояния между зарядами получаем

$$a = 2R_0 = 2 \sqrt[3]{\frac{2,55K_{\pi}Q}{4\pi}}.$$

Сопоставим приведенные выше результаты с некоторыми данными по крупномасштабным взрывам.

2. Крупномасштабные взрывы приурочены к строительству крупного канала АБМК-3 в Средней Азии, проектные параметры которого приведены в табл. 1. В соответствии с техническим заданием необходимо было взрывом осуществить 100-процентный выброс грунта из пределов проектного контура канала. Для обеспечения проектной ширины выемки по дну, равной 14 м, применена двухрядная схема расположения сосредоточенных зарядов выброса. В связи с этим возникла задача по определению оптимального расстояния между зарядами с целью получения более ровного рельефа по дну и бортам выемки. Для решения этой задачи по трассе канала было выделено три участка для проведения опытных взрывов. При среднем значении  $K_{\pi} \approx 0,03 \text{ м}^3/\text{кг}$  расстояние между зарядами изменялось от 8 до 6 м. Исходные параметры на отдельных пикетах приведены в табл. 2.

Характерные результаты взрывов (маркшейдерские съемки поперечных профилей) представлены на рис. 4. Здесь же показаны центры масс расположения зарядов, а также контуры взрывной полости к моменту окончания симметричной стадии взрыва, рассчитанные по формуле (5). Видно, что наилучший результат проработки взрывом дна и бортов получен при  $a = 6$  м, что соответствует приблизительно значению  $a \approx 2R_0$ . Отметим, что протяженность участков с  $a = 8, 7$  и  $6$  м составила 100 м,  $\sim 3$  км и более 2,5 км соответственно. В дальнейшем протяженность участков канала, взорванных с  $a = 6$  м, составила более 20 км.

Представляет интерес сопоставить полученные результаты с экспериментальными данными [5], где исследованы взрывы рядных сосредоточенных зарядов. Согласно [5], образование единого купола грунта без видимых перегибов наблюдалось при очень близком расположении зарядов

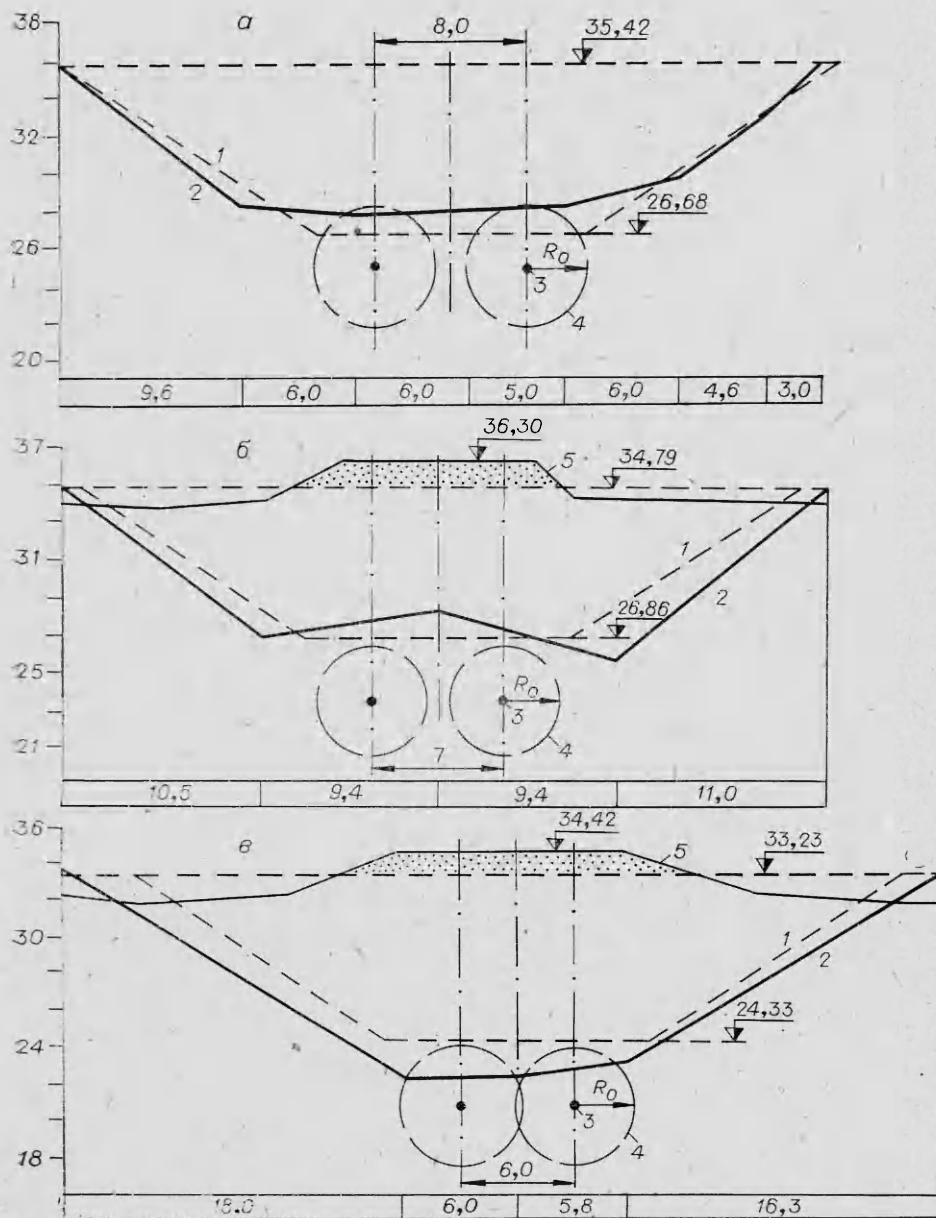


Рис. 4. Результаты взрывов на выброс взаимодействующими зарядами с  $a = 8$  (а), 7 (б) и 6 м (в).

1 — проектный контур выемки; 2 — фактический профиль; 3 — центры масс зарядов; 4 — полости; 5 — контур дневной поверхности после обваловки шурфов грунтом.

в ряду (при  $a = 0,54h$ ), когда получались выемки эллиптической формы. По мнению авторов [5], в этих случаях полости объединялись, и выброс грунта происходил практически так же, как при взрыве удлиненного заряда. При увеличении расстояния между зарядами, в том числе и при так называемом оптимальном расстоянии, определяемом по формуле  $a = -0,6h(n + 0,8)$  ( $n$  — показатель выброса), купол рядного взрыва сохранял характерную «трехгорбную» форму все время движения, и выемка получалась с четко выраженными перемычками. Из табл. 2 видно, что наилучшее соответствие между данными работы [5] и описанными результатами по крупномасштабным взрывам наблюдается при  $a = 6$  м, что подтверждает правильность изложенных выше соображений относительно эффективного взаимодействия зарядов ВВ.

Поступила в редакцию 30/V 1984



## ЛИТЕРАТУРА

1. В. М. Кузнецов, Э. Б. Поляк, Е. Н. Шер. ПМТФ, 1975, 5.
2. В. М. Кузнецов. Математические модели взрывного дела. М.: Недра, 1977.
3. Э. А. Кошелев, В. М. Кузнецов, Э. Б. Поляк и др.— В кн.: Взрывное дело, № 81/38. М.: Недра, 1979.
4. А. П. Сухотин, М. В. Селиванов. Там же.
5. В. В. Адушкин, Н. Д. Скоморохов.— В кн.: Взрывное дело, № 82/39. М.: Недра, 1980.
6. К. В. Мяеников, Л. Б. Прозоров, И. Е. Ситников.— В кн.: Атомные взрывы в мирных целях. М.: Атомиздат, 1970.
7. А. Н. Ромашов. Особенности действия крупных подземных взрывов. М.: Недра, 1980.
8. Механический эффект подземного взрыва/Под ред. акад. М. А. Садовского. М.: Недра, 1971.

## ИНИЦИИРОВАНИЕ ТЭНА МОЩНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

*А. И. Быхало, Е. В. Жужукало, Н. Г. Ковальский,  
А. Н. Коломыйский, В. В. Коробов, А. Д. Рожков,  
А. И. Юдин*  
(Москва)

1. Проблема лазерного инициирования взрывчатых веществ интересует специалистов с момента появления первых лазерных систем и их внедрения в практику лабораторных исследований. К настоящему времени опубликовано значительное количество теоретических и экспериментальных работ, посвященных взаимодействию лазерного излучения с инициирующими и бризантными ВВ [1—4], в которых показана перспективность использования лазеров для подобных целей. Однако сколько-нибудь подробные экспериментальные исследования механизмов инициирования бризантных ВВ лазерным излучением не проводились, и вопрос о критических параметрах излучения остается открытым.

Это связано как с отсутствием до недавнего времени достаточно мощных лазеров, так и с трудностями диагностирования и интерпретации сложных процессов, протекающих в горячей плазме у облучаемой поверхности и в самом облучаемом образце. Создание мощных лазерных систем [5, 6] позволяет осуществить постановку экспериментов по проверке возможностей лазерного инициирования бризантных ВВ.

Оценки показывают, что, облучая образцы мощными наносекундными импульсами с плотностями световых потоков  $10^{13} \div 10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup>, можно значительно превысить критические значения давлений и температур, необходимых для инициирования.

2. Эксперименты проводили на установке «Мишень» [5], включающей в себя лазерную систему на неодинаковом стекле ( $\lambda \approx 1,06$  мкм), вакуумную камеру взаимодействия и комплекс диагностической аппаратуры. Энергия пучка на выходе оконечного каскада с активным элементом прямоугольного сечения  $4 \times 24 \times 72$  см достигала 300 Дж в импульсе длительностью  $\tau \approx 3$  нс (рис. 1), энергетический контраст был не хуже  $10^5$ .

Излучение фокусировалось на поверхность образца, размещавшегося в центре вакуумной камеры, объективом с фокусным расстоянием  $f \approx 172$  см. До 90% всей энергии лазерного пучка попадало в пятно с диаметром  $d_f \approx 250$  мкм, при этом максимальная плотность светового потока на мишени составляла  $q \approx 10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup>. Облучали образцы взрыв-



Рис. 1. Форма лазерного импульса (период синусоиды 1 нс).