

## 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).

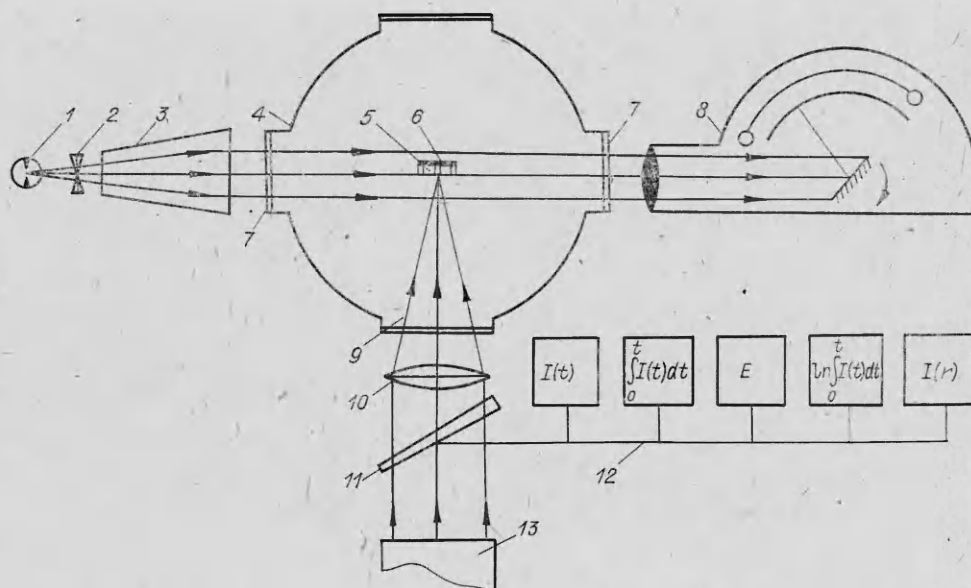


Рис. 2. Оптическая схема диагностического комплекса для исследования процесса детонации взрывчатых веществ.  
 1 — источник света (лампа-вспышка ИПШ-400); 2 — рассеиватель; 3 — коллимирующий объектив; 4 — камера взаимодействия; 5 — образец ВВ; 6 — кассета с образцами ВВ; 7 — иллюминаторы; 8 — СФР-2; 9 — инициирующий луч лазера; 10 — фокусирующий объектив; 11 — делительный клин; 12 — средства измерения выходных параметров лазерного пучка; 13 — выходной усилительный каскад лазерной системы.

чатого вещества (нормально флегматизированный тэн,  $\rho = 1,700 \text{ г/см}^3$ ), представляющие собой цилиндры с диаметром 7 и высотой  $\approx 18 \text{ мм}$ . Образцы помещали в камеру взаимодействия кассетами по 7 штук и поочередно без разгерметизации камеры вводили в фокальную область фокусирующего объектива. Давление остаточного газа в камере поддерживалось на уровне  $10^{-5} \text{ мм рт. ст.}$

Для изучения процесса детонации использовали схему теневой фотографии. Динамику процесса исследовали скоростным фоторегистратором СФР-2, работающим в режиме покадровой съемки с экспозицией кадра  $0,5 \text{ мкс}$  и скоростью регистрации  $1,5 \cdot 10^6 \text{ кадр/с}$ . В каждом эксперименте фиксировались выходные параметры лазерного пучка: энергия, форма импульса, контраст излучения, распределение энергии в «дальней» зоне. Оптическая схема измерений представлена на рис. 2.

Проведены одномерные гидродинамические расчеты, моделирующие взаимодействие мощного лазерного излучения с твердой мишенью. Поглощение лазерного излучения и процессы переноса в плазме, образующейся у поверхности облучаемой мишени, предполагались классическими. В результате абляции вещества с поверхности облучаемого образца возникает импульс давления, и в твердом веществе возбуждается ударная волна, распространяющаяся в глубь образца.

Проведено математическое моделирование на ЭВМ процессов инициирования тэна мощным лазерным излучением. Уравнения состояния твердого ВВ, продуктов взрыва и горячей плазмы брались из работ [7, 8]. В расчеты вводилась реальная форма импульса лазерного излучения установки «Мишень» [5].

Проведенные расчеты показали, что при  $q \approx 10^{13} \text{ Вт/см}^2$  к моменту времени  $t = 1,5 \text{ нс}$  от начала лазерного импульса давление на поверхности ВВ достигает  $\approx 5 \text{ Мбар}$ . В реальном эксперименте характер взаимодействия в значительной степени неодномерен. Это означает, что достижимая величина давления может быть существенно меньше расчетной, но и в этом случае при  $q \approx 10^{13} \text{ Вт/см}^2$  давления будут значительно превышать критические значения, необходимые для инициирования бри-

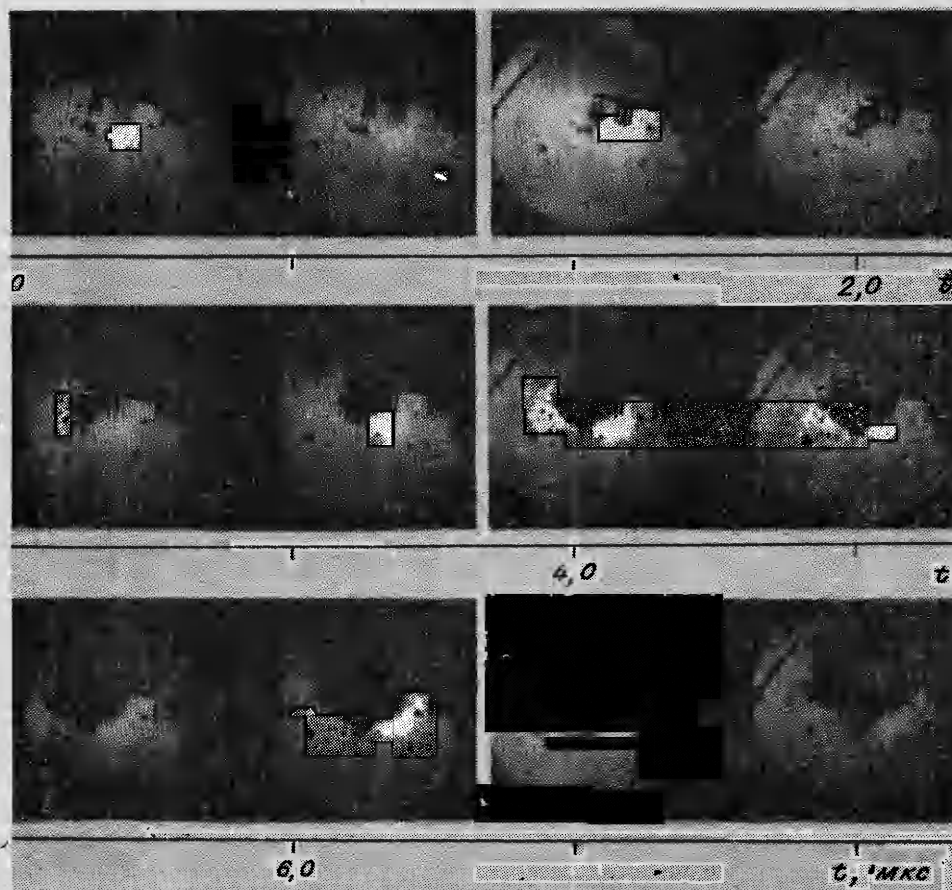


Рис. 3. Теневая картина развития детонации тэна в интервале времени от 0 до 7,3 мкс (кадры следуют через 0,66 мкс).

зантных ВВ (температура в твердом ВВ за фронтом ударной волны составляет в соответствии с расчетами  $\sim 1$  эВ).

Таким образом, параметры лазерного импульса на установке «Мишень» позволяют создать необходимые условия для инициирования бризантных ВВ.

3. При увеличении диаметра фокального пятна до  $0,5 \div 1,0$  мм детонация флегматизированного тэна наблюдалась при энергиях лазерного импульса  $\epsilon_d \approx 30 \div 100$  Дж. На рис. 3 приведена характерная теневая кинограмма разлета продуктов взрыва. Уже на начальной стадии ( $t \leq 2$  мкс) наблюдается сферический разлет продуктов, что свидетельствует об объемном характере инициирования. Скорость разлета составляет  $v_p \approx 9 \cdot 10^5$  см/с. В дальнейшем зона непрозрачности на кадрах кинограммы приобретает коническую форму, что связано с отражением продуктов взрыва от стенки зарядной кассеты. При  $t \geq 10$  мкс скорость движения границы зоны непрозрачности заметно снижается. Такое уменьшение скорости движения зоны непрозрачности можно объяснить переходом основной массы продуктов взрыва в газообразное состояние и существенным уменьшением плотности в процессе расширения. Следовательно, достоверные сведения о скоростях разлета вещества при использовании метода теневой фотографии можно получить только на начальных стадиях процесса ( $t < 2 \div 3$  мкс).

В экспериментах варьировались как энергия лазерного импульса, так и диаметр пятна фокусировки. При острой фокусировке ( $d_f \approx 250 \div 300$  мкм) детонация ВВ не наблюдалась во всем диапазоне энергий до 200 Дж, причем при  $\epsilon_d \approx 100$  Дж образец разрушался без взрыва.

Резкая зависимость от условий фокусировки связана с тем, что и здесь при лазерном инициировании существует некоторый критический размер возбуждаемого ВВ, как и в традиционном случае с использованием взрывных детонаторов. Однако этот критический размер оказывается в несколько раз меньшим, что связано, по-видимому, с много большей интенсивностью ударных волн, возбуждаемых при инициировании бризантных ВВ мощными лазерными импульсами наносекундной длительности. Строгие количественные соотношения могут быть получены при детальном экспериментальном исследовании динамики ударных волн в облучаемых лазерными пучками образцах твердого ВВ.

Таким образом, эксперименты показали, что бризантные ВВ (флегматизированный тэн) могут быть инициированы мощными наносекундными ( $\sim 3$  нс) импульсами неодимового лазера с энергией порядка нескольких десятков джоулей при плотностях светового потока на поверхности образца  $10^{12} \div 10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup>.

Поступила в редакцию 14/II 1984

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Бриш, И. А. Галеев и др. ФГВ, 1969, 5, 4, 475.
2. Е. П. Александров, А. Г. Вознюк. ФГВ, 1978, 14, 4, 86.
3. J. E. Kennedy, I. W. Nunsiato. J. Mech. Phys. Solids, 1976, 24, 107.
4. А. А. Волкова, А. Д. Зинченко, Н. В. Санин и др. ФГВ, 1977, 13, 5, 760.
5. V. N. Belousov, V. L. Borzenko, I. N. Burdonsky e. a. Study of the acceleration of thin metal foils acted on by high-power laser emission. Proc. of an advisory group meeting on the technology of inertial confinement experiments. IAEA, Dubna, USSR, 19—23 July, 1976.
6. Н. Г. Басов, Н. Е. Быковский, А. Е. Данилов и др.— В кн.: Мощные лазеры и взаимодействие излучения с плазмой. Тр. ФИАН, т. 103. 1978.
7. С. Н. Брагинский.— В кн.: Вопросы теории плазмы. Вып. 1. М.: Физматгиз, 1963.
8. А. А. Волкова, В. Ф. Куропатенко и др.— В кн.: Химическая физика горения и взрыва. Детонация. Черногоровка, 1978.

### ОСОБЕННОСТИ ВЗРЫВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПРОБОЕ ПРОЧНЫХ СРЕД

*В. В. Буркин*

(Томск)

Применение электроимпульсного способа разрушения прочных сред при рудоподготовке, проходке скважин, дроблении некондиционного железобетона [1] вызвало интерес к характеристикам взрывного воздействия искрового канала на разрушаемую среду. В [2—4] расчетно-экспериментальным путем установлено, что уровень механических напряжений при пробое ПММА и некоторых ионных кристаллов достигает 5 ГПа, а коэффициент преобразования энергии, выделяемой в разрядном промежутке, в энергию возмущений составляет 0,1—0,25.

В настоящей работе на основе численного анализа обсуждаются особенности динамического поля напряжений вокруг искрового канала, сформированного в упругопластической среде. Рассматривается влияние количества энергии и длительности ее выделения на параметры возмущений, анализируется энергобаланс процесса.

1. Динамика волновых возмущений вокруг длинного цилиндра, моделирующего разрядный канал, описывалась уравнениями сохранения импульса, массы, энергии для упругопластической среды, приведенными в [5]. Для шаровой части напряжений принят степенной закон вида [6]

$$\frac{p}{\rho_0 c_e^2} = \left( \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right) \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^n, \quad n = 1,7 \div 2.$$