

столь ярко, что оно перекрывает возможные неточности. Поведение грунта приближенно можно описать моделью, учитывающей объемную вязкость и пластические свойства.

*Институт механики  
МГУ*

*Поступила в редакцию  
12/III 1976*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Г. М. Ляхов. Основания, фундаменты и механика грунтов, 1966, 3.
2. Г. М. Ляхов. Основы динамики взрывных волн в грунтах и горных породах. М., «Недра», 1974.
3. С. К. Годунов, П. С. Козин. ПМТФ, 1974, 5.
4. Г. Д. Бабе, Э. А. Бондарева и др. Изв. АН СССР, МТТ, 1975, 4.
5. Э. Л. Кошелев. ПМТФ, 1975, 2.
6. Akoi Koichi, Hozumi Masayuki. Proc. 16 Jap. Cong. Mater. Res. Kyoto, 1973.
7. R. N. Long, J. C. Dutertre, R. J. Krizek. Trans. Soc. Rheol, 1974, 18, 3.
8. M. P. Zabinski, A. Phillips. Acta Mech., 1974, 20, 3—4.
9. С. С. Григорян. ПММ, 1960, 24, 6.
10. Х. А. Рахматуллин, А. Я. Сагомоян, Н. А. Алексеев. Вопросы динамики грунтов. М., Изд-во МГУ, 1964.
11. Г. М. Ляхов, Н. И. Полякова. Волны в плотных средах и нагрузки на сооружения. М., «Недра», 1967.

#### ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНИЦИИРОВАНИЯ ТЭНА ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

*А. А. Волкова, А. Д. Зинченко, Н. В. Санин, В. И. Таржанов,  
Б. Б. Токарев*

В [1—3] при инициировании ВВ использовались два режима работы лазера — импульсный пиковый ( $\tau \sim 1$  нс) и режим модуляции добротности резонатора ( $\tau = 30 \div 50$  нс). Иницирование вторичных ВВ достигнуто лишь во втором режиме, причем исследования проведены при одном значении длительности инициирующего светового импульса. Опыты проводились в прозрачных для излучения оболочках, однако их влияние на процесс инициирования не рассматривалось.

В данной работе исследовалась зависимость пороговой энергии инициирования тэна от длительности лазерного импульса и от толщины прозрачной для лазерного излучения подложки (оболочки) на инициируемой поверхности.

#### Постановка экспериментов

Схема экспериментов изображена на рис. 1. Лазер на неодимовом стекле, работающий в режиме модуляции добротности резонатора, генерирует импульсы колоколообразной формы с длительностью на полувысоте  $\sim 30$  нс и энергией до 4,5 Дж. Длина волны излучения 1,06 мкм. Для укорочения длительности лазерного импульса использовалось явление экранировки лазерного излучения плазмой, образующейся при пробое воздуха в фокусе положительной линзы [4, 5]. Обостритель лазерного импульса состоит из двух софокусных линз с фокусным расстоянием 36 мм. Для удлинения импульса в резонатор лазера устанавливалась положительная линза с фокусным расстоянием 4 м, изменяющая

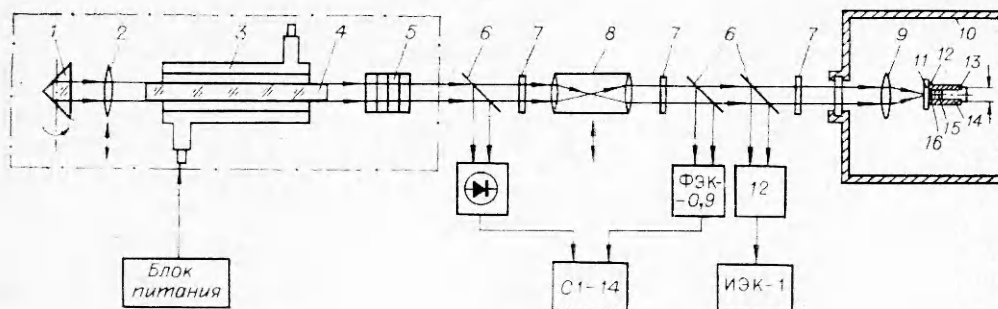


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 — призма модулятора добротности резонатора; 2 — линза ( $f=4$  м); 3 — лампа накачки; 4 — активный элемент; 5 — выходной отражатель лазера; 6 — плоскопараллельные стеклянные пластины; 7 — светофильтры; 8 — обостритель лазерного импульса; 9 — фокусирующая линза; 10 — экспериментальная сборка; 11 — прозрачная для излучения подложка, 12 — клей, 13 — пробка, 14 — корпус (оргстекло), 15 — навеска ВВ, 16 — металлическая пленка (в части сборки отсутствует).

кинетику генерации импульса, при этом работа проводилась вблизи порога накачки лазера.

Энергия лазерного излучения измерялась с помощью измерителя энергии ИЭК-1, лазерный импульс регистрировался осциллографом С1-14 и коаксиальным фотоэлементом ФЭК-09.

Схема экспериментальной сборки показана на рис. 1, 11. В качестве материала прозрачной для лазерного излучения подложки использовались стекло К-8, фотостекло (ГОСТ 683—52) и слюда. В части опытов на поверхность подложки, контактирующей с ВВ, наносилась пленка Мп толщиной  $300 \text{ \AA}$ . Исследовался тэн дисперсностью  $7800 \text{ см}^2/\text{г}$  при плотности  $0,9 \text{ г/см}^3$ . Размер области воздействия излучения на ВВ варьировался изменением расстояния между сборкой и фокусирующей линзой и фокусного расстояния фокусирующей линзы.

Для построения распределения плотности энергии излучения на поверхности ВВ в каждой серии опытов проводилась дополнительная серия измерений в той же постановке. В этих измерениях навеска ВВ в сборке отсутствовала. Поверхность пленки, контактирующей с подложкой, выжигалась под действием лазерного импульса. Проводилась серия облучений таких сборок при различных значениях энергии  $E_n$  в импульсе, при этом диаметр пятен выжигания измерялся с помощью измерительного микроскопа. Строилась зависимость

$$E^*/E_n = f(r),$$

где  $E^*$  — значение энергии в импульсе, при котором диаметр пятна выжигания равен нулю. Эта зависимость отождествлялась с зависимостью безразмерной плотности энергии (за импульс)  $W/W_{\max}$  от координаты  $r$ . Правомомерность такого отождествления легко доказывается при очевидном допущении, что граница пятна выжигания соответствует некоторому постоянному уровню плотности энергии (за импульс). Чтобы характеризовать размер области облучения при плавном распределе-

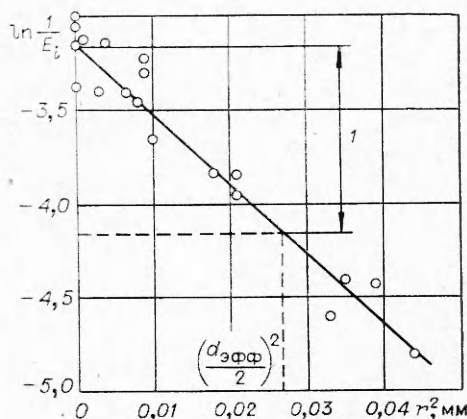


Рис. 2. Получение распределения плотности энергии в области облучения и нахождение ее эффективного диаметра.

нии плотности энергии по координате, вводилось понятие эффективного по энергии диаметра, который определялся из условия:

$$\frac{\pi d_{\text{эфф}}^2}{4} W_{\text{max}} = \iint W(r, \varphi) r dr d\varphi,$$

где  $W$  и  $W_{\text{max}}$  — текущее и максимальное (при  $r=0$ ) значения плотности энергии;  $\varphi$  — полярный угол.

Полученные экспериментально реальные распределения плотности энергии по координате аппроксимировались гауссовой функцией. Процедура аппроксимации и нахождения эффективного диаметра показана на рис. 2.

### Экспериментальные результаты

Поскольку инициирование ВВ вблизи пороговой энергии инициирования носит вероятностный характер (см., например [6]), существует область энергий, в которой наблюдаются как отказы, так и инициирование навесок ВВ. Пороговая энергия инициирования  $E_{0,5}$  определяется как энергия, соответствующая 50%-ной вероятности подрыва при большом числе опытов. Обработка результатов «инициирование—отказ» в зависимости от энергии инициирующего импульса, полученных в серии из  $n$  опытов, велась по методу максимального правдоподобия (см., например [7, 8]) с использованием ЭВМ. Среднее квадратичное отклонение  $\sigma_{E_{0,5}}$  определялось по снижению функции правдоподобия в  $e$  раз по сравнению с максимальным значением и соответствует 68%-ному доверительному интервалу [9].

Зависимость пороговой энергии инициирования  $E_{0,5}$  от длительности лазерного импульса показана на рис. 3. Пороговая энергия инициирования  $E_{0,5}(\tau)$  при длительности лазерного импульса  $\tau$  отложена в отношении к пороговой энергии инициирования  $E_{0,5}(\tau=0)$  при мгновенном энергоотводе ( $\tau=0$ , экстраполяция). Видно, что  $E_{0,5}(\tau)$  растет с увеличением  $\tau$  и этот рост в пределах точности измерений не зависит от эффективного диаметра области облучения в исследованном диапазоне диаметров. При изменении длительности импульса от 7,5 до 100 нс относительный рост энергии инициирования составляет 1,4 и 1,8 для случаев прямого инициирования его с помощью взрывающейся световой пленки марганца соответственно.

Не было обнаружено заметного влияния формы инициирующего импульса (пологий «хвост» в нормальном и удлиненном импульсах и крутой в укороченном) на пороговую энергию инициирования при заданной длительности импульса.

Зависимость пороговой энергии инициирования от толщины прозрачной подложки исследовалась при  $\tau=28$  нс и  $d_{\text{эфф}}=0,4$  и 0,7 мм. Пропускание всех типов подложек измерялось при тех же значениях  $W$ , что и в экс-

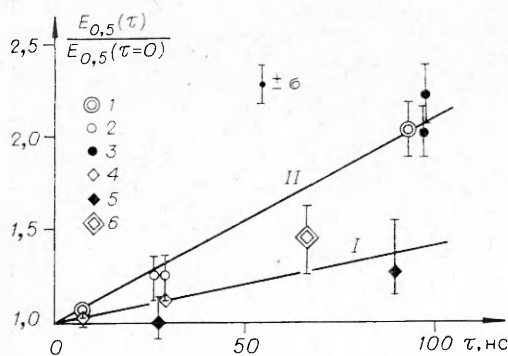


Рис. 3. Относительная пороговая энергия инициирования  $E_{0,5}$  в зависимости от длительности инициирующего лазерного импульса.

I — прямое инициирование  $E_{0,5}$  лазерным излучением, II — с помощью взрывающейся световой металлической пленки.  $d_{\text{эфф}}$  мм: 1, 4 — 0,7, 2 — 0,6, 3, 5 — 0,3, 6 — 0,2.

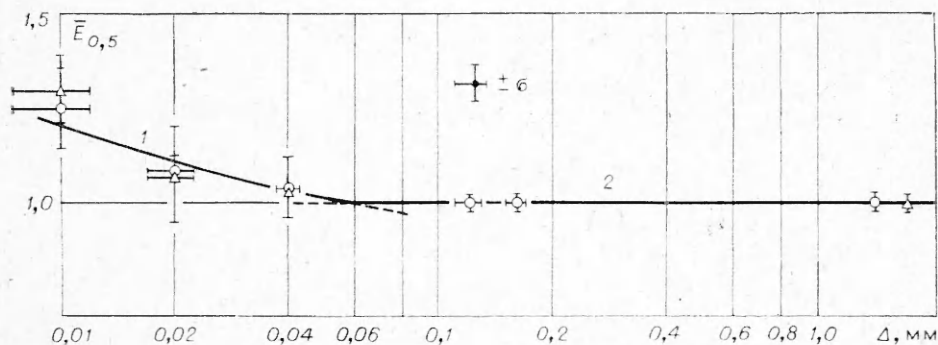


Рис. 4. Относительная пороговая энергия прямого инициирования тэна лазерным излучением в зависимости от толщины прозрачной подложки  $\Delta$ .  
1 —  $\Delta = \Delta_0 \exp(b, \bar{E}_{0,5})$ .

периментах, с использованием методики фотометрического шара [10].

Полученные результаты представлены на рис 4. Видно, что при уменьшении толщины подложки от 1,7 до  $\approx 0,1$  мм пороговая энергия инициирования тэна, отнесенная к ее значению при  $\Delta > 0,1$  мм ( $\bar{E}_{0,5}$ ), остается постоянной, при дальнейшем уменьшении толщины подложки она растет.

Не было получено инициирования тэна при отсутствии подложки на его инициируемой светом поверхности ( $\Delta = 0$ ) при энергии, в 40 раз превышающей пороговую энергию инициирования со стеклянной подложкой толщиной 1,7 мм.

### Обсуждение результатов

Полученная слабая зависимость пороговой энергии подрыва тэна от длительности и формы инициирующего импульса свидетельствует о том, что параметром, определяющим инициирование ВВ (в исследованном диапазоне длительностей импульсов), является плотность энергии в объеме инициирования или энергия в импульсе, а не мощность. Рост энергии инициирования с длительностью лазерного импульса говорит о существовании потерь энергии за время энерговодвда, увеличивающихся с длительностью импульса.

Пороговая энергия инициирования навесок тэна через подложки с толщиной 0,12 ÷ 1,7 мм постоянна. Это говорит о том, что такое уменьшение толщины подложки не сказывается на динамике инициирования. В противоположность этому уменьшение толщины подложек от 0,1 до 0,01 мм влияет на динамику инициирования. Толщиной подложки задается (ограничивается) время процесса, который определяет инициирование ВВ, так как подложка обеспечивает поддерживающую функцию в течение времени, примерно равном времени волновой циркуляции в ней.

Время циркуляции в тонких (0,01 мм) подложках мало ( $t_{\text{ц}} = 2\Delta/c \approx \approx 5$  нс)<sup>1</sup> по сравнению с длительностью лазерного импульса ( $2\tau = 56$  нс), поэтому слой ВВ, прилегающий к подложке, разгружается в течение всего времени введения световой энергии, и характер разгрузки приближается к характеру разгрузки открытой поверхности ВВ. Тем не менее энергия инициирования тэна при таких подложках лишь в 1,2 раза выше энергии инициирования при толстых ( $\sim 1,5$  мм) подложках. Откры-

<sup>1</sup> Изотермическая скорость звука в слюде, вычисленная по данным [11],  $c = 3,85 \cdot 10^5$  см/с.

тая поверхность тэна не инициируется при энергиях, много больших энергии инициирования тэна с подложками.

Эти факты свидетельствуют, во-первых, о том, что на инициирование навески ВВ влияет ее тонкий слой, прилегающий к подложке и, во-вторых, о том, что прямое волнообразование в навеске вследствие светового энерговода не является основным процессом, приводящим к инициированию навески.

На основании сказанного можно предположить следующий механизм инициирования тэна лазерным излучением, позволяющий увязать полученные экспериментальные данные.

1. Вводимая в навеску ВВ через подложку световая энергия носит активирующий характер по отношению к химической реакции разложения ВВ. Волнообразование в ВВ и в инертном веществе<sup>2</sup>, возникающее вследствие светового энерговода, есть механизм потерь энергии в объеме инициирования.

2. Химическая энергия реакции разложения ВВ выделяется в узкой зоне вблизи подложки там, где значения плотности энергии, введенной светом, максимальны. Характерное время протекания химической реакции определяется этой энергией.

3. Образовавшийся пик химической энергии есть одновременно и пик давления. Химический пик давления при «распаде» формирует ударную волну в ВВ, за фронтом которой также идет химическая реакция разложения ВВ. Полученная таким образом «реакционная» волна развивается далее в детонационную по обычному механизму [13]. Такой механизм может быть назван двухстадийным механизмом инициирования с поджиганием. Положения 1 и 2 присутствуют в модели Росса [14], предложенной для интерпретации результатов по инициированию светом азида свинца.

В рамках описанного механизма можно объяснить полученные экспериментальные результаты.

**Влияние толщины подложки на энергию инициирования.** Если принять аррениусовскую кинетику разложения ВВ, то характерное время химической реакции в объеме инициирования можно записать в виде

$$\tau_x = 1/A \exp(a \cdot E/E_r),$$

где  $A$  — предэкспонент;  $E$  — энергия активации химической реакции;  $E_r$  — удельная тепловая энергия, введенная в ВВ;  $a$  — безразмерная теплоемкость ВВ. Поскольку толщиной подложки  $\Delta$  задается время реакции, то

$$\Delta = \Delta_0 \exp(aE/E_r).$$

Переходя далее от удельных энергий к энергиям, вводимым за импульс, получим

$$\Delta = \Delta_0 \exp(b\bar{E}_{0,5}).$$

Параметры  $\Delta_0$  и  $b$  определяются при аппроксимации экспериментальных данных (см. рис. 4). Пересечение аппроксимирующей функции с прямой  $\bar{E}_{0,5} = 1$  дает верхнее значение толщины подложки  $\Delta_{гр}$ , влияющей на динамику инициирования ВВ.

Пользуясь этим значением, можно провести оценку характерного времени химической реакции  $\tau_x$  в тэне, реализующегося в опытах с толстыми подложками

$$\tau_x = t_{ц} = 2\Delta_{гр}/c \sim 30 \text{ нс};$$

здесь  $t_{ц}$  — время волновой циркуляции в подложке,  $c$  — скорость звука

<sup>2</sup> О газодинамике взаимодействия лазерного излучения с инертными веществами см., например, [12].

в материале подложки. Время реакции в опытах с подложками толщиной 0,01 мм, оцениваемое аналогично, равно  $\sim 5$  нс.

**Влияние длительности инициирующего импульса на энергию инициирования.** Считая, что волнообразование — механизм потерь энергии из области инициирования, и привлекая соображения теории размерностей и подобия [15] к рассматриваемому случаю, получим следующую функциональную связь между пороговой плотностью энергии инициирования  $W$  тэна и длительностью инициирующего импульса (в безразмерном виде):

$$\frac{(1-R)W - W_*}{\rho_{\text{ВВ}} c_{\text{ВВ}}^2 \delta} = F(\tau \cdot c_{\text{ВВ}} / \delta, E / c_{\text{ВВ}}^2).$$

Здесь  $R$  — отражательная способность навески,  $\rho_{\text{ВВ}}$  и  $c_{\text{ВВ}}$  — плотность и скорость звука в ВВ,  $\delta$  — эффективная глубина проникновения излучения в ВВ,  $W_*$  — значение плотности поглощенной энергии, не приводящее к заметным газодинамическим эффектам.

Представление экспериментальных данных в этих безразмерных координатах позволяет получить в первом приближении аппроксимирующую функцию:

$$\frac{W}{W_{\tau=0}} = 1 + \frac{c_{\text{ВВ}}^3}{E \left( \frac{W_*}{\rho_{\text{ВВ}} E} + \delta \right)} \tau.$$

Аналогичное рассмотрение случая инициирования тэна металлической пленкой, взрываемой светом, дает аппроксимирующую функцию

$$\frac{W}{W_{\tau=0}} = 1 + \frac{\rho_{\text{ВВ}} c_{\text{ВВ}}^3}{W_*} \tau.$$

В этом случае часть потерь может носить радиационный характер (переизлучение), поскольку температура пленки весьма высока ( $\sim 10\,000$  К [16]).

### Выводы

1. Исследована зависимость пороговой энергии инициирования тэна от длительности инициирующего лазерного импульса ( $\lambda = 1,06$  мкм) в диапазоне  $7,5 \div 100$  нс при прямом инициировании навески светом и с помощью взрывающей светом металлической пленки ( $300 \text{ \AA}$ ). Пороговая энергия инициирования растет с ростом длительности импульса для этих случаев соответственно в 1,4 и 2,1 раза.

2. Изучена зависимость пороговой энергии инициирования тэна от толщины контактирующей с ним прозрачной подложки толщиной  $0,01 \div 1,7$  мм;  $E_{0,5}(\tau)$  не зависит от толщины подложки при  $\Delta > 0,06$  мм и растет при  $\Delta < 0,06$  мм.

3. На основании анализа полученных экспериментальных данных предложен механизм инициирования тэна лазерным излучением, в рамках которого полученная слабая зависимость энергии инициирования от длительности инициирующего импульса объясняется существованием газодинамических потерь энергии из области инициирования за время энерговода. В рамках предложенного механизма оценено характерное время химической реакции разложения тэна, реализующееся в различных условиях эксперимента.

Поступила в редакцию  
30/VII 1976

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Бриш, И. А. Галеев и др. ФГВ, 1966, 2, 3.
  2. А. А. Бриш, И. А. Галеев и др. ФГВ, 1969, 5, 4.
  3. L. C. Jang, V. J. Menichelli. Appl. Phys., Lett., 1971, 19, 11.
  4. А. С. Маркин. Тр. ФИАН СССР. Т. 56. М., «Наука», 1971.
  5. Ю. П. Райзер. Лазерная искра и распространение разрядов. М., «Наука», 1974.
  6. Г. Т. Афанасьев, В. К. Боболев. Инициирование твердых взрывчатых веществ ударом. М., «Наука», 1968.
  7. Д. Худсон. Статистика для физиков. М., «Мир», 1967.
  8. Н. П. Клепиков, С. Н. Соколов. Анализ и планирование экспериментов методом максимума правдоподобия. М., «Наука», 1964.
  9. Х. Шенк. Теория инженерного эксперимента. М., «Мир», 1972.
  10. А. А. Бриш, И. А. Галеев и др. ФГВ, 1969, 5, 3.
  11. Адамс, Вильямсон.—В кн.: Справочник физических констант горных пород. Под ред. С. Кларка. М., «Мир», 1969.
  12. Ю. В. Афанасьев, О. Н. Крохин.—В сб.: Физика высоких плотностей энергии. Под ред. П. Кальдиролы и Г. Кнокфеля. М., «Мир», 1974.
  13. D. Stizpe, J. Johnson, J. Wackorly. J. Appl. Phys., 1970, 41, 9.
  14. J. Roth. J. Chem. Phys., 1964, 41, 7.
  15. Л. И. Седов. Методы подобия и размерности в механике. М., Гостехиздат, 1957.
  16. А. А. Калмыков, Г. Н. Розенталь. Квантовая электроника, № 2 (14), М., «Сов. радио», 1973.
-