

7. Г. С. Писаренко, А. А. Лебедев. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. Киев: Наукова думка, 1976.
8. А. П. Ващенко. Проблемы прочности, 1978, 1, 87.
9. П. Ф. Кошелев, С. Е. Беляев. Прочность и пластичность конструкционных материалов при низких температурах. М.: Машиностроение, 1967.
10. В. М. Butcher, L. M. Barker et al. AIAA, J., 1964, 2, 6, 3.
11. Л. В. Альшулер, С. А. Новиков, И. И. Дивнов. Докл. АН СССР, 1966, 166, 1, 67.
12. L. J. Cohen, H. M. Berkowitz. Internat. J. Fract. Mech., 1971, 7, 2, 183.
13. А. Г. Иванов, В. Н. Минеев. ФГВ, 1979, 15, 5, 70.
14. В. R. Breed, C. L. Mader, D. Venable. J. Appl. Phys., 1967, 38, 8, 3271.
15. D. W. Blinkov, D. W. Keller. ASTM Spec. Techn. Publ., 1962, 336, 252.
16. R. G. McQueen, S. P. Marsh. J. Appl. Phys., 1962, 33, 2, 654.
17. J. H. Smith. ASTM Spec. Techn. Publ., 1962, 336, 264.
18. S. Cochran, D. Banner. J. Appl. Phys., 1977, 48, 7, 2729.

УДК 533.6.071.8+533.9.03.15

ИССЛЕДОВАНИЯ И НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ ВЗРЫВНЫХ УДАРНЫХ ТРУБ

*И. А. Стадниченко, В. М. Титов, В. П. Чистяков,
Г. А. Швецов
(Новосибирск)*

Использование конденсированных взрывчатых веществ для генерации сильных ударных волн и высокоскоростных газовых потоков значительно расширило возможности ударных труб как аппаратуры для многочисленных задач высокоскоростной газодинамики и нестационарной магнитной гидродинамики. В настоящее время разработано несколько конструкций взрывных ударных труб, позволяющих получать в воздухе при нормальных условиях скорости ударных волн более 10 км/с при высокой плотности кинетической энергии в газовом потоке [1]. Несколько основных схем взрывных ударных труб, наиболее изученных в настоящее время, приведены на рис. 1.

В генераторе А. Е. Войтенко (рис. 1, а) [2] при взрыве заряда ВВ металлическая пластина ускоряется по направлению к вершине камеры сжатия. При движении пластины газ в камере сжимается несколькими сильными ударными волнами и выталкивается в канал ударной трубы. В воздухе при нормальных условиях скорость ударной волны достигает 40 км/с.

Во взрывной ударной трубе, разработанной Гиллом с сотрудниками (рис. 1, б) [3], при взрыве расположенной в геометрическом центре полусферы тонкой медной проволоки в стехиометрической кислородно-водородной смеси возбуждается детонация. Детонационная волна движется к периферии сферы и возбуждает детонацию в полусферической оболочке из тэна. Это порождает сходящийся к центру поток продуктов детонации, который сжимает газ в камере и выталкивает его в канал ударной трубы. Характерные скорости ударной волны в канале 10—20 км/с. В предложенной Гиллом и другими взрывной ударной тру-

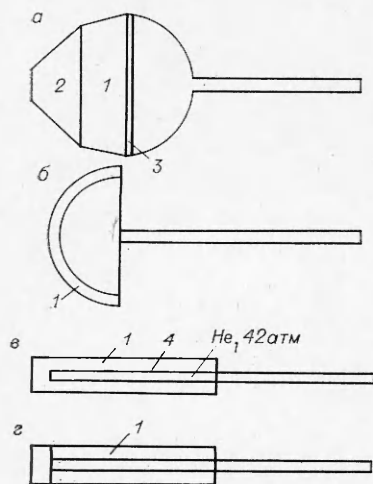


Рис. 1. Схема взрывных ударных труб.

а) труба Войтенко; б) труба УТИАС Гласса и др.; в) труба Гилла и др.; г) трубчатый газонакопительный заряд ВВ. 1 — взрывчатое вещество; 2 — генератор детонационной волны; 3 — металлическая пластина; 4 — тонкостенная трубка.

бе (рис. 1, *в*) [4] в полость цилиндрического заряда ВВ помещен металлический контейнер, содержащий газ при высоком давлении (обычно гелий). При детонации заряда ВВ контейнер сжимается и действует на находящийся в нем газ как высокоскоростной поршень. Лучшие результаты отмечены на ударной трубе, в которой гелий находился при давлении 42 атм. В экспериментах получены скорости ударной волны 14—16 км/с при давлении воздуха в канале ударной трубы 0,25—0,4 торр.

На рис. 1, *г* изображен трубчатый газокумулятивный заряд ВВ. При детонации заряда в его полости за счет кумулятивных эффектов образуется высокоэнтальпийный поток продуктов детонации — газокумулятивная струя. В воздухе при нормальном давлении скорость ударной волны достигает 12—14 км/с. Детонация трубчатых зарядов ВВ и течение газа в полости заряда изучались в [5—9].

Рассмотрение особенностей работы указанных взрывных ударных труб, их достоинств и недостатков выходит за рамки настоящей статьи. Здесь мы ограничимся сравнением возможностей рассматриваемых взрывных ударных труб с точки зрения следующего требования: необходимо устройство, позволяющее получать скорость ударной волны 10—15 км/с в канале больших поперечных размеров (сотни — тысячи квадратных сантиметров) при высоком КПД преобразования энергии ВВ в направленную кинетическую энергию газового потока. Это требование важно, в частности, при использовании взрывных ударных труб в импульсных МГД-генераторах [9], при разработке взрывных инжекторов плазмы для исследования околоземного космического пространства [10] и др.

КПД преобразования энергии ВВ в энергию плазмы (включая внутреннюю и кинетическую энергии) в генераторе Войтенко, по данным работы [11], оценивается в 6%. КПД линейного ускорителя оценивается в 7% [4]. Сравнение ударных труб, изображенных на рис. 1, *а*, *б*, *в*, по эффективности преобразования энергии ВВ в энергию газового потока проведено в работе [3]. По мнению авторов [3], характеристики взрывной трубы УТИАС превышают характеристики линейного ускорителя, но уступают генератору Войтенко.

Эффективность преобразования энергии ВВ в газокумулятивном заряде ВВ в направленную кинетическую энергию газового потока, по данным [9], оценивается в 8—10% при $d_2/d_1 = 2,4$ (d_2 , d_1 — наружный и внутренний диаметры заряда ВВ). В [12] КПД преобразования энергии ВВ в кинетическую энергию газокумулятивной струи при детонации трубчатого заряда ВВ в воздухе при нормальных условиях оценивается в 13,6% (при $d_2/d_1 = 3,3$). Поскольку в цитированных работах авторы не ставили целью оценить максимальные КПД устройств, корректно сравнивать эффективность работы рассматриваемых взрывных ударных труб не представляется возможным. Здесь можно заметить только, что КПД преобразования энергии ВВ в кинетическую энергию газового потока у трубчатого газокумулятивного заряда ВВ, по-видимому, выше. Очевидное достоинство взрывной ударной трубы с трубчатым зарядом ВВ состоит в ее простоте.

Наиболее трудно обеспечить работу рассматриваемых взрывных ударных труб при больших поперечных размерах канала ударной трубы. В ударных трубах Войтенко и УТИАС диаметр полусферы для эффективной работы устройств должен быть в 8—10 раз больше диаметра канала ударной трубы [2, 3]. Следовательно, если диаметр канала ударной трубы 30 см, то диаметр полусферы (как и диаметр заряда ВВ) составит 2,5—3 м, что практически исключает возможность использования таких ударных труб в лабораторных условиях. Не лучше обстоят дела и с линейными системами (см. рис. 1, *в*, *г*). Как следует из работы [9] и результатов экспериментов, полученных в настоящей работе (см. ниже), трубчатые заряды ВВ эффективно работают, если длина заряда $l_0 \geq 5d_1$. Следовательно, для $d_1 = 30$ см длина заряда должна быть больше 1,5 м, что также делает проблематичным использование этих устройств в лабораторных условиях из-за большой массы ВВ.

Цель данной работы — разработка взрывной ударной трубы, удовлетворяющей приведенным выше требованиям.

Экспериментальные результаты

Основная идея при разработке взрывной ударной трубы базировалась на экспериментальном результате, что в трубчатом заряде ВВ существует некоторый активный слой ВВ, который определяет образование и величину энергии газокумулятивной струи [9]. Наружный слой ВВ по отношению к этому слою является, по существу, инертной оболочкой. Замена пассивного слоя ВВ инертной оболочкой привела к увеличению КПД преобразования энергии ВВ в направленную кинетическую энергию газокумулятивной струи до 40% [9]. Для уменьшения количества ВВ, выполняющего роль пассивной оболочки, предложено использовать ячеистую структуру заряда ВВ (рис. 2). Изменяя число одиночных трубчатых зарядов ВВ n , можно перекрыть любое сечение канала ударной трубы. При этом длина зарядов будет определяться диаметром d_1 одиночного заряда. Кроме этого, при расположении трубчатых зарядов, как показано на рис. 2, в промежутках между зарядами будут возникать каналные течения продуктов детонации, что также увеличит кинетическую энергию газового потока.

Работа ударной трубы с зарядом ВВ ячеистой структуры зависит от l_0 , d_1 , d_2 и n . Скорость ударной волны в канале будет также зависеть от отношения площади канала трубы к площади отверстий в заряде и ряда других параметров.

Для решения этой многопараметрической задачи выбран простой метод оценки кинетической энергии газового потока по объему кратера, образующегося при соударении высокоскоростного газового потока с твердой мишенью. Как показывают многочисленные исследования по высокоскоростному удару и взаимодействию кумулятивных струй с преградами, объем кратера пропорционален кинетической энергии ударника [13]. Следовательно, измеряя объем кратера, можно проследить влияние каждого из названных параметров на кинетическую энергию газового потока. Абсолютную величину коэффициента преобразования энергии ВВ в кинетическую энергию газового потока можно оценить, пронормировав полученные результаты на объем кратера от трубчатого заряда, для которого известны массовая скорость, плотность и КПД преобразования энергии ВВ в кинетическую энергию [9]. Характерные значения параметров газокумулятивной струи для заряда с $\dot{a}_2/\dot{a}_1 = 2,4$, $l_0/d_1 = 25$ следующие: массовая скорость потока 10 км/с [15], плотность 0,17—0,20 г/см³ [16], коэффициент преобразования энергии ВВ в кинетическую энергию струи $\eta^* = 8—10\%$ [9]. На это значение η^* и пронормированы полученные результаты по эффективности работы одиночного и ячеистого зарядов ВВ. Во всех опытах использовались заряды из ТГ 50/50 (тротил 50%, гексоген 50%). Твердость материала мишени во всех опытах одинакова.

На рис. 3 показана зависимость коэффициента преобразования энергии ВВ в кинетическую энергию струи η от длины заряда l_0 ($d_2 = 15$ мм, $d_1 = 5$ мм). Начальный участок кривой связан с установлением течения газа в канале. При изменении l_0/d_1 от 10 до 45 η/η^* остается примерно постоянным. Уменьшение η при $l_0/d_1 > 45$, по-видимому, связано с торможением струи на стенке канала и влиянием присоединенной массы воздуха [8].

На рис. 4 изображена зависимость скорости ударной волны от пройденного расстояния x , отмеряемого от торца заряда ВВ ($d_2/d_1 = 2,4$, $l_0/d_1 = 15$). График позволяет выбрать величину для допустимого уменьшения скорости на заданной длине канала ударной трубы. Зависимость скорости волны от расстояния x для зарядов ВВ при $\dot{a}_1 = 5$ мм, $d_2 = 15$ мм, $l_0/d_1 = 15$ при полном заполнении трубы зарядами показана на рис. 5.

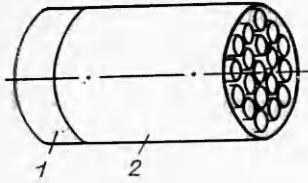


Рис. 2. Ячеистый заряд ВВ.
1 — генератор плоской детонационной волны; 2 — взрывчатое вещество.

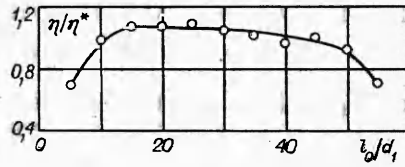


Рис. 3. Зависимость коэффициента преобразования энергии ВВ в кинетическую энергию струи от длины заряда.

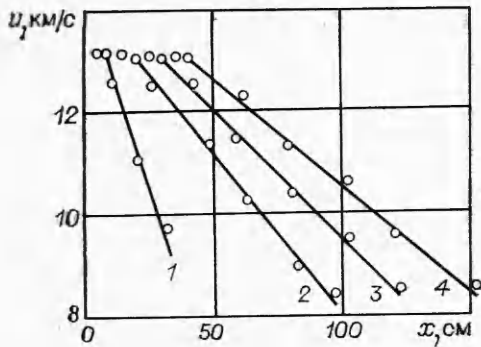


Рис. 4. Зависимость скорости ударной волны от пройденного расстояния x от начала заряда ВВ.
 d_1 , мм: 1 — 5, 2 — 10, 3 — 15, 4 — 20.

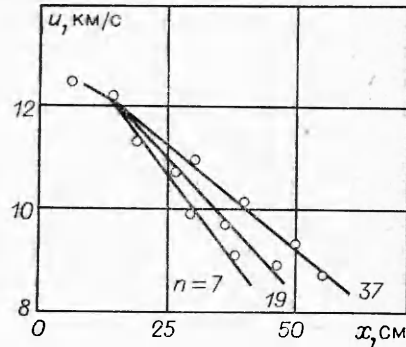


Рис. 5. Зависимость скорости ударной волны от пройденного расстояния x для ячеистых зарядов.

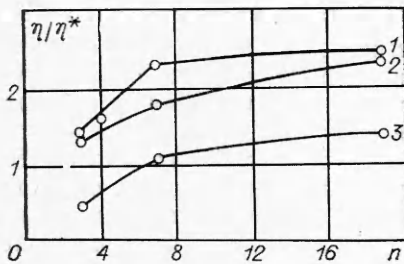


Рис. 6. Зависимость коэффициента преобразования энергии ВВ в кинетическую энергию струи от числа n одиночных трубчатых зарядов.
1 — $d_2=15$ мм, $d_1=5$ мм, $l_0=15d_1$; 2 — $d_2=12$ мм, $d_1=5$ мм, $l_0=15d_1$; 3 — $d_2=20$ мм, $d_1=12,5$ мм, $l_0=15d_1$.

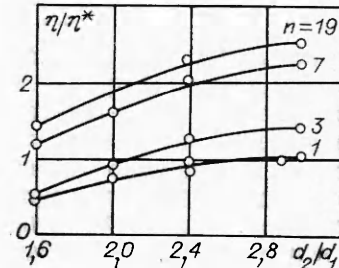


Рис. 7. Зависимость коэффициента преобразования энергии ВВ в кинетическую энергию струи ячеистого заряда.

На рис. 6 приведена зависимость нормированного КПД ячеистого заряда η/η^* от количества одиночных зарядов n , из которых он формировался. Результаты экспериментов показывают, что при ячеистой структуре заряда КПД преобразования энергии ВВ в кинетическую энергию газового потока можно значительно увеличить по отношению к последовательному действию n одиночных зарядов. На рис. 7 показана зависимость η/η^* от d_2/d_1 при $n = 1, 3, 7, 19$.

Обсуждение результатов газодинамических измерений

Экспериментальные результаты показывают, что ячеистая структура заряда может повысить КПД преобразования энергии ВВ в направленную кинетическую энергию газового потока в 2,5—3 раза по отношению

к одиночному заряду. Объем образованного кратера

$$V = nV_1 + mV_2. \quad (1)$$

Здесь V_1 — объем кратера от одиночного трубчатого заряда; V_2 — объем кратера от воздействия потока газа, возникающего в промежутке между трубчатыми зарядами; m — число промежутков. В исследованном диапазоне изменения d_1, d_2, l_0, n, m измеренные величины V и вычисленные по формуле (1) по измеренным значениям V_1 и V_2 совпадают с точностью, лучше чем 20%. Если обозначить $\eta = V/nE_{ВВ}$, $\eta_1 = V_1/E_{ВВ}$, то из выражения (1) следует

$$\eta = \eta_1(1 + m/n \cdot V_2/V_1). \quad (2)$$

Здесь $E_{ВВ}$ — энергия одиночного заряда ВВ; η — КПД преобразования энергии ячеистого заряда в кинетическую энергию газового потока; η_1 — КПД преобразования энергии одиночного трубчатого заряда в кинетическую энергию газокумулятивной струи.

Величины V_1 и V_2 измеряются непосредственно, а m и n при упаковке по треугольнику при замкнутой структуре равны: $m = 6k^2$, $n = 3k(k+1) + 1$, где k — порядок построения ($k = 0, 1, 2, 3, \dots$). Для заряда с $d_2 = 15$ мм, $d_1 = 5$ мм и $l_0/d_1 = 15$ $V_2/V_1 = 1,22$. При $k = 2$ расчет по формуле (2) дает $\eta/\eta_1 = 2,54$, что хорошо согласуется с экспериментальными результатами: $\eta/\eta_1 = 2,5$ (см. рис. 6). При $k = 5$ $\eta/\eta_1 \approx 3$, а при $k \rightarrow \infty$ $\eta/\eta_1 \rightarrow 3,45$.

Приведенные исследования показывают, что на основе ячеистого заряда ВВ могут быть построены взрывные ударные трубы, удовлетворяющие указанным выше требованиям.

Применение взрывных ударных труб

Взрывные ударные трубы с трубчатыми зарядами использованы в экспериментах по преобразованию энергии взрыва в электромагнитную в импульсных МГД-генераторах для изучения структурных и фазовых превращений на поверхности стальных деталей при воздействии на них высокоэнтальпийного газового потока. На основе ячеистого заряда ВВ разработан импульсный источник света для получения мощных световых импульсов в видимой и ультрафиолетовой областях спектра, созданы кумулятивные ускорители барьерной плазмы для исследования околоземного космического пространства.

В экспериментах с модельными импульсными МГД-генераторами основное внимание уделялось определению предельных электрических характеристик линейного кондукционного МГД-генератора и получению максимального отношения энергии, выделившейся в нагрузку генератора к энергии начального магнитного поля в МГД-канале w_0 . Эксперименты показали, что использование трубчатых зарядов ВВ позволяет получать в нагрузке энергию, в 1,5—2 раза превышающую w_0 [9], что, по-видимому, является рекордным в настоящее время для взрывных МГД-генераторов с газообразным рабочим телом. Для сравнения укажем, что при использовании в качестве рабочего тела генератора плазмы, образующейся при выходе детонации на плоский торец заряда ВВ, при сравнимых размерах МГД-канала величина энергии, переданной в омическую нагрузку, не превышала 0,25 w_0 [17]. Коэффициент преобразования энергии взрыва в электромагнитную достигал 5%.

Проведены эксперименты по исследованию возможности использования взрывных ударных труб с трубчатыми зарядами ВВ для поверхностного упрочнения стальных деталей. Тепловые потоки на поверхность деталей при контакте с ней высокоэнтальпийного газового потока достигают 10^5 — 10^6 Вт/см². При таких плотностях теплового потока в поверхностных слоях деталей из железоуглеродистых сплавов происходят необратимые

структурные и фазовые ($\alpha \rightarrow \gamma\text{Fe}$) превращения, приводящие к значительному упрочнению поверхностного слоя на глубину 10—100 мкм.

Эксперименты выполнены с трубчатыми деталями из Ст. 3, Ст. 45 и др. Микротвердость Ст. 3 достигала 700—900 кг/мм² при исходных значениях 100—230 кг/мм². Микротвердость Ст. 45 возрастала с 200—250 до 800—1000 кг/мм². Аналогичное повышение микротвердости достигается при воздействии на стальные детали лазерного излучения большой мощности [18]. Однако использование плазмы, генерированной взрывом, для упрочнения поверхностей стальных деталей может оказаться в ряде случаев более перспективным, чем применение лазеров, так как в отличие от последних позволяет обрабатывать одновременно большие поверхности, т. е. не требует сканирования детали и позволяет обрабатывать внутренние поверхности, труднодоступные для прямолинейного луча лазера.

На основе ячеистых зарядов ВВ разработаны импульсные источники света для получения мощных световых импульсов в видимой и ультрафиолетовой областях спектра. Полная энергия излучения, измеренная калориметрическим датчиком в области спектра длин волн 380—2600 нм, изменялась от единиц до десятков килоджоулей. Величина энергии излучения существенно зависит от n и длины участка ударной трубы до баллона высвечивания. За время работы светового источника яркостная температура, измеренная по методике, описанной в [19], изменялась от 18 000 до 6000 К. Следовательно, виновский максимум излучения лежит в ближней ультрафиолетовой области спектра, и значительная часть энергии излучения взрывной лампы указанным калориметрическим датчиком не регистрировалась. Полное время свечения взрывной лампы около 600 мкс, однако основная часть энергии (~60%) высвечивается в первые 200 мкс. Световые источники применены для высокоскоростной оптической съемки в отраженном свете разрушения при взрыве металлических конструкций.

Ячеистая структура заряда ВВ оказалась весьма удобной для разработки взрывных инжекторов бариевой плазмы, предназначенных для исследования околоземного космического пространства. Основные требования к взрывным инжекторам бариевой плазмы [20]: импульс струи должен быть сконцентрирован в одном направлении; скорость струи должна превышать 10 км/с; выход пара бария к массе инжектора и его объему должен быть максимальным; струя по своей длине должна обладать минимальным градиентом скорости.

В экспериментах [20, 21] применялись кумулятивные снаряды с конической полостью. Выход пара бария для угла конуса 30° составил 12%, максимальная скорость струи достигала 15 км/с. Однако в струе имелся большой градиент в скорости по длине струи, что приводило к быстрому ослаблению яркости головной части струи и, следовательно, уменьшению длины высвечивания магнитной силовой линии. По данным [20], только 2% пара бария движется со скоростью более чем 10 км/с. На рис. 8 приведена осциллограмма профиля массовой скорости газокумулятивной струи, образующейся при детонации трубчатого заряда ВВ. Массовая скорость в струе определялась по величине ЭДС, наводимой при движении ионизированного газа в поперечном однородном магнитном поле [15]. Скорость головной части струи 16,5 км/с (давление окружающего газа 1 мм рт. ст.), скорость в области плато 10,9 км/с. Основная масса струи приходится на область плато и имеет малый градиент скорости. Ячеистый кумулятивный инжектор впервые использован в эксперименте «Сполах-2»

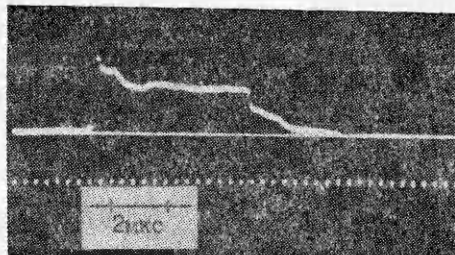


Рис. 8. Осциллограмма профиля массовой скорости струи, образующейся при детонации трубчатого заряда ВВ.

[22, 23]. Он содержал 3,5 кг ВВ и 0,6 кг металлического бария в виде шести тонкостенных цилиндрических вкладышей ячеистого заряда. Примерно 8% массы бария имела скорость более 10 км/с.

Одним из важных результатов этого эксперимента было обнаружение [24, 25] стимулированного выпадения захваченных электронов из внутреннего радиационного пояса Земли, вызванное кумулятивной инжекцией бариевой плазмы. По мнению авторов, это связано с приблизительно прямоугольным распределением массовой скорости в бариевой плазме от ячеистого кумулятивного инжектора. Более подробная информация об эксперименте «Сполах-2» содержится в работах [22—25].

Поступила в редакцию 21/X 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. Shock Tubes. Proc. 7-th Intern. Shock Tube Symp., 23—25 June 1969, Toronto, Canada.
2. А. Е. Войтенко. ЖТФ, 1966, XXXVI, 1.
3. I. I. Glass et al. AIAA J., 1974, 12, 3.
4. S. P. Gill, W. V. Simpkinson. 7-th Intern. Shock Tube Symp., 23—25 June 1969, Toronto, Canada.
5. D. W. Woodhead. Nature, 1947, 160, 4071.
6. В. М. Титов, Ю. И. Фадеев, И. С. Титова. Докл. АН СССР, 1968, 180, 5.
7. И. Ф. Жариков, И. В. Немчинов, М. А. Цикулин. ПМТФ, 1967, 1.
8. А. С. Загуменнов, И. С. Титова и др. ПМТФ, 1969, 2.
9. В. М. Титов, Г. А. Швецов. ФГВ, 1980, 16, 5.
10. Ю. Я. Ружин, В. С. Скомаровский, Г. А. Швецов.— В сб.: Исследование космической плазмы. М.: Наука, 1980.
11. А. Е. Войтенко, В. И. Кирко. ФГВ, 1975, 11, 6.
12. J. Teno, O. K. Sonju. Tech. Rep. AFAPL — TR — 74—48, 1974.
13. Физика быстротекающих процессов. М.: Мир, 1971.
14. Ф. А. Баум, Л. П. Орленко и др. Физика взрыва. М.: Наука, 1975.
15. Г. В. Пряхин, В. М. Титов, Г. А. Швецов. ПМТФ, 1971, 3.
16. В. В. Сильвестров, В. П. Урушкин.— В сб.: Динамика сплошной среды. Вып. VII. Новосибирск, 1971.
17. M. S. Jones, C. N. McKinnon. Proc. Confer. Megagauss Magnetic Field Generation by Explosives and Related Experiments. Frascati, Italy, 1965.
18. Н. Н. Рыкалин, А. А. Углов, А. Н. Кокора. Лазерная обработка материалов. М.: Машиностроение, 1965.
19. И. Ш. Модель. ЖЭТФ, 1957, 32, 4.
20. G. Haerendal. Space Res., XIII, 1973.
21. E. M. Weskott et al. J. Geophys. Res., 1972, 77, 16.
22. И. А. Жулин, А. С. Лоевский и др. Тр. VI Всесоюз. конф. по динамике разреженных газов. Ч. III. Новосибирск, 1979.
23. Yu. Ya. Ruzhin, V. S. Skomarovsky, G. A. Shvetsov. Proc. XV Inter. Confer. on Phenomena in Ionized Gases. Minsk, 1981.
24. И. А. Жулин, Ю. Я. Ружин и др. Препринт ИЗМИР АН СССР, 1979.
25. Космические исследования, выполненные в СССР в 1978 году. М.: Наука, 1979.

УДК 532.593

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ УДАРНОМ ИНИЦИИРОВАНИИ ТНТ

*В. Ф. Лобанов, С. М. Караханов, С. А. Бордзиловский
(Новосибирск)*

Наряду с экспериментальными методами при исследовании процессов возбуждения детонации в конденсированных ВВ в настоящее время широко используется метод математического моделирования. При построении математической модели инициирования гетерогенных ВВ вещество в зоне химической реакции за фронтом ударной волны, как правило, представляется в виде смеси непрореагировавшего ВВ и продуктов детонации (ПД). Современные экспериментальные методы не позволяют обес-

90