

УДК 662.4

## СИСТЕМЫ ИНИЦИИРОВАНИЯ НА ВТОРИЧНЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВАХ

Л. А. Лукьянчиков

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск

Изложены основные итоги работ по созданию систем инициирования и средств взрывания для промышленного использования, прежде всего в металлообработке, начатых в Институте гидродинамики в 1961 г. и длительное время проводившихся под руководством академика М. А. Лаврентьева. В рамках данного направления проведены фундаментальные исследования начальных стадий детонационного превращения, обнаружен и изучен абляционный механизм сгорания плавящихся взрывчатых веществ, в частности, отличающий их от бездымных порохов. Предложен метод динамического инициирования, позволяющий стабильно реализовывать этот механизм. Результаты исследований применены при создании промышленных средств взрывания для металлообработки и систем инициирования для механизированного подрыва зарядов при гидровзрывной штамповке и синтезе ультрадисперсных алмазов.

Классические результаты, полученные М. А. Лаврентьевым в теории кумуляции, создали новые подходы, позволяющие успешно решать многие фундаментальные и прикладные задачи о движении вещества под действием взрывных нагрузок. Естественно, что исследования в этой области стали одним из основных направлений научной деятельности в созданном им Институте гидродинамики.

Работы в этом направлении под руководством М. А. Лаврентьева начались еще в 1956 г. в Московском физико-техническом институте. Изучалась кумуляция, течения при взрывах в воде и грунте, разрабатывались методы высокоскоростного разгона частиц для задач космической техники. В 1957 г. большая часть творческого коллектива перешла во вновь созданный Институт гидродинамики Сибирского отделения, но до 1958 г. продолжала проводить исследования на экспериментальной базе Московского физико-технического института.

Для проведения большинства взрывных экспериментов была необходима жесткая синхронизация, требующая применения микросекундных детонаторов. Такой детонатор был создан на основе порошкового гексогена, инициируемого импульсным искровым разрядом. Он был прост по конструкции и обладал низкой чувствительностью к внешним воздействиям.

В 1961 г. Институт ЦНИИПодземшахтострой обратился к М. А. Лаврентьеву с предложением использовать кумулятивные заряды для разрушения прочных горных пород. В течение короткого времени были проведены предварительные эксперименты, которые подтвердили эффективность такого метода разрушения. Поэтому возникла необходимость создания принципиальной схемы взрывного рабочего органа, который позволил бы осуществить последовательный подрыв большого числа простых зарядов, доставляемых в заданные точки рабочего пространства. Такая система инициирования была создана на основе применения высоковольтных сильноточных детонаторов на вторичных ВВ.

Вскоре было предложено использовать кумулятивные заряды и для решения другой задачи — создания механизированной взрывной установки для взрывной штамповки деталей

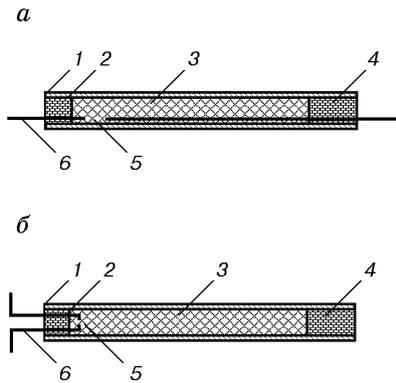


Рис. 1. Схема экспериментальных сборок для исследования искрового инициирования гексогена:

*а* — искровой промежуток на поверхности оболочки, *б* — на торце уплотняющей пробки; 1 — оболочка из стекла или оргстекла, 2 — пробка из изолятора, 3 — заряд гексогена насыпной плотности, 4 — заряд из литого ВВ, 5 — искровой промежуток, 6 — подводящие провода

корпуса самолета МиГ-25. В планере этой машины были использованы новые сверхпрочные нержавеющие стали, которые из-за их низкой пластичности удавалось формовать только последовательным взрывом большого числа малых зарядов. Реализовать такую технологию могли только взрывные автоматы, обеспечивающие низкую стоимость каждого взрыва. В работе по созданию таких устройств принимали участие Институт гидродинамики СО АН СССР, Научно-исследовательский институт авиационных технологий, Новосибирский и Горьковский авиационные заводы. Было выполнено большое количество научно-исследовательских и проектно-конструкторских работ, в основном завершившихся в 1968 г. Институт гидродинамики вел разработку системы инициирования, в которую входили оконечный каскад рабочего органа, производящий подрыв заряда под водой, и генераторы инициирующих импульсов, позволяющие осуществлять индикацию момента достижения зарядом ВВ рабочей области гидровзрывного бассейна и взрывать в этот момент в заданной точке безопасные детонаторы на вторичных ВВ, инициирующие основной заряд.

Для реализации данной программы в Институте гидродинамики СО АН СССР были развернуты работы по следующим направлениям:

1. Исследование механизма инициирования вторичных ВВ импульсным искровым разрядом.
2. Создание конструкции безопасного детонатора для промышленного использования.
3. Разработка принципиальных схем рабочего органа и конструкций генераторов поисковых и инициирующих импульсов.

Первое направление посвящено исследованию одной из важных проблем физики взрыва. Работы в этой области продолжаются в Институте гидродинамики до настоящего времени. Наряду с искровым разрядом изучены и другие источники энергии, формирующие очаг инициирования, а само такое инициирование получило название динамического.

**1. Динамическое инициирование вторичных порошковых ВВ.** Изучение развития детонационного превращения в порошковом гексогене стандартного промышленного фракционного состава было начато в 1961 г. Исследовалось возбуждение детонации в зарядах насыпной плотности, помещенных в оболочки из стекла или оргстекла при прохождении импульса тока через инициирующий искровой промежуток. Этот промежуток располагался на поверхности оболочки (рис. 1, *а*) или на торце уплотняющей пробки (рис. 1, *б*). Импульс тока формировался при разряде конденсатора емкостью  $C = 0,1$  мкФ через индуктивность  $L = 10$  мкГн. Напряжение конденсатора  $U_0$  варьировалось в пределах 9–13 кВ. Проводились оптическая съемка камерой СФР и осциллографирование тока и напряжения.

На типичной фоторазвертке переходного процесса в гексогене, приведенной на рис. 2, выделяются три стадии. На первой (очаговой) свечение локализовано в области разряда. При благоприятном прогнозе на второй стадии в очаге формируется фронт, перемещаю-

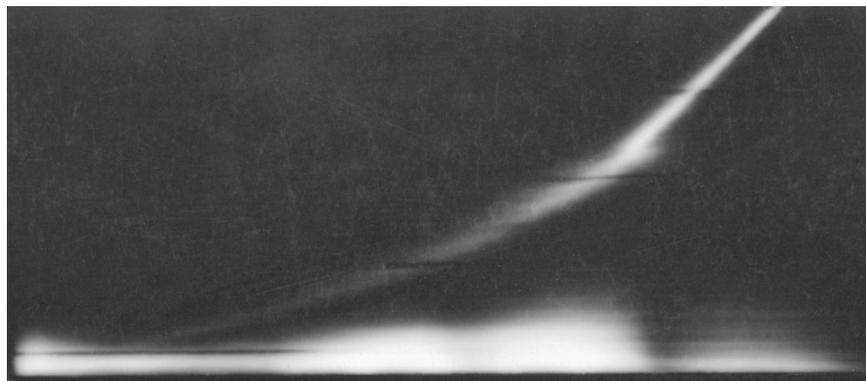


Рис. 2

Рис. 2. Фоторазвертка переходного процесса в гексогене насыпной плотности

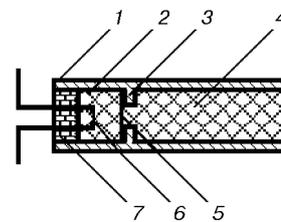


Рис. 3

Рис. 3. Схема устройства для инициирования порошкового ВВ при распаде разрыва:

1 — корпус из тонкой стали, 2 — заряд бездымного пороха, 3 — опорный выступ корпуса, 4 — заряд насыпного тэна, 5 — калиброванная мембрана, 6 — мостик накаливания, 7 — уплотнительная пробка из пластика

щийся со скоростью порядка 1 км/с. Этот фронт постепенно ускоряется и переходит в нормальную детонацию. Низкоскоростной переходный процесс был отнесен к детонационным и, по существу, являлся детонацией с малой скоростью, которая должна обязательно вестись ударной волной. Очаговая стадия переходила во вторую, если за время 3–5 мкс в искровом промежутке выделялась энергия 1,0–1,5 Дж. Увеличение мощности источника за счет роста  $U_0$  сокращало время существования первой стадии. Подобные результаты получены в работе [1], где инициирование гексогена такой же плотности осуществлялось при взрыве медных и нихромовых проводников. Здесь также полагалось, что возникновение неидеальной детонации связано с формированием ударной волны достаточной интенсивности, а само возникновение этой волны является основной стадией инициирования.

Быстрый ввод энергии в канал разряда способствовал формированию ударной волны, так как позволял быстро спрессовать порошковое ВВ. При этом его свойства соответствовали участку диаграммы состояния, где скорость звука растет с увеличением давления [2]. Дальнейшее развитие возникшего разрыва должно было происходить в результате взаимодействия волн разгрузки, возникающих из-за разлета при разрушении оболочки, и волн сжатия, генерируемых вспыхнувшим ВВ, массовая скорость сгорания которого полагалась пропорциональной давлению.

С целью проверки данной гипотезы в 1962 г. были проведены эксперименты, в которых ударная волна и зона горения за ее фронтом формировались по классической схеме ударной трубы (рис. 3). Стальная тонкостенная гильза с внутренним диаметром 6 мм, герметизированная с одного конца пробкой, разделялась на две части мембраной, опертой на выступ в корпусе. Между пробкой и мембраной помещался небольшой заряд бездымного мелкозернистого пороха. Сразу за мембраной находился заряд гексогена насыпной плотности ( $\rho \approx 1 \text{ г/см}^3$ ). После поджига пороха с помощью мостика давление в камере начинало возрастать до тех пор, пока мембрана не разрушалась. Предполагалось, что при этом в порошке формировалась ударная волна, а некоторая часть гранул ВВ за ее фронтом поджигалась и начинала гореть со скоростью, пропорциональной давлению. Таким образом, реализовывались условия для формирования заключительной стадии классического перехода горения во взрыв, описанного в работе [3].

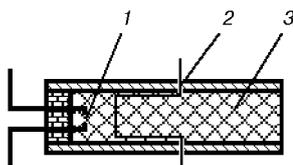


Рис. 4

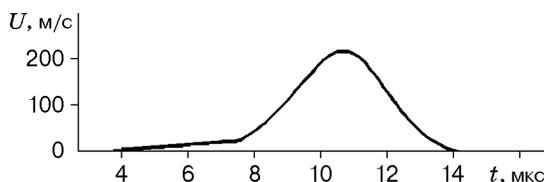


Рис. 5

Рис. 4. Схема экспериментальной сборки для измерения массовой скорости при искровом инициировании с помощью электромагнитного метода:

1 — искровой промежуток, 2 — П-образный датчик из алюминиевой фольги, 3 — заряд тэна насыпной плотности

Рис. 5. Профиль массовой скорости вблизи искрового промежутка в насыпном полидисперсном тэне

В проведенных экспериментах зарегистрировано устойчивое развитие детонации в заряде гексогена, если давление в формирующей камере перед разрушением мембраны было не ниже 20 МПа. При этом в гексогене вначале возникал тот же переходный процесс, что и при инициировании искрой. Низкий уровень давления за фронтом начальной ударной волны исключал возможность непосредственного инициирования за счет начального сжатия и предопределял необходимость возникновения горения для реализации заключительных стадий взрывного превращения. Результаты этих экспериментов не противоречили исходной гипотезе.

Более детальное изучение формирования неидеальной детонации при искровом и динамическом инициировании было продолжено в начале 70-х гг. Исследовался достаточно крупный полидисперсный тэн, площадь поверхности гранул которого составляла приблизительно  $500 \text{ см}^2/\text{г}$ . Основные переходные процессы сохранились, но стали более медленными, чем в гексогене. В итоге удалось подобрать такую геометрию заряда, при которой скорость процесса на втором этапе оставалась постоянной и равной приблизительно  $800 \text{ м/с}$  на достаточно большой длине заряда [4, 5].

Возможность применения известной электромагнитной методики для измерения массовой скорости  $U$  перемещения гранул тэна была проверена в контрольных экспериментах, в которых с помощью рентгеновской съемки аппаратами ПИР-4 зафиксирована динамика движения плоских кусочков алюминиевой фольги, помещенных внутри порошкового ВВ по нормали к оси заряда. Показано, что при прохождении кусочками фольги пути, равного диаметру заряда ВВ (порядка 4 мм), они остаются параллельными и движутся поступательно. Поэтому данная методика позволяет достоверно определить характер изменения плотности порошкового ВВ при его сжатии в стационарной волне по известному соотношению

$$\rho = \rho_0 \frac{D}{D - U}. \quad (1)$$

Здесь  $\rho_0$  — начальная плотность насыпного ВВ;  $D$  — скорость распространения фронта самосвечения. Осциллограмма, полученная с датчика, расположенного на расстоянии 4 мм от искрового инициирующего промежутка так, как показано на рис. 4, приведена на рис. 5 [4]. Зафиксирован пологий профиль с максимумом при  $U = 240 \text{ м/с}$ , который достигается через 7 мкс после начала перемещения гранул. На первом этапе в течение 5 мкс вещество ускорялось лишь до  $50 \text{ м/с}$ , этот участок трактовался как предвестник. Затем скорость увеличивалась быстрее. Давление определялось по известному соотношению

$$p = \rho_0 U D, \quad (2)$$

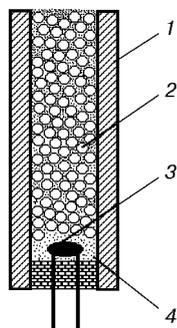


Рис. 6

Рис. 6. Схема заряда тэна с каркасом из металлических шариков:

1 — тонкостенная стальная оболочка, 2 — медные шарики, 3 — электровоспламенитель, 4 — заряд тэна

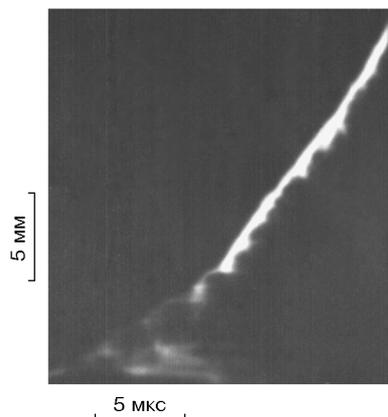


Рис. 7

Рис. 7. Фоторазвертка инициирования детонации в заряде тэна с металлическими шариками

справедливого и для двухфазной реагирующей среды в том случае, когда течение одномерно и степень разложения конденсированной фазы составляет несколько процентов. Рассчитанное с учетом этих условий максимальное давление в волне оказалось равным 200 МПа. Проведенные позднее (см. [7]) непосредственные измерения давления пьезодатчиками с погрешностью не более 10% совпали с этими результатами. Согласно [8] сжатие в такой волне не может вызвать образования эффективных очагов химической реакции. Нами сделано предположение (см. [4]), что данный переходный режим является специфической скоростной формой конвективного горения, а его появлению при классическом переходе горения в детонацию препятствует преждевременное уплотнение вещества волнами сжатия, генерируемыми областью горения. В 1975 г. это предположение было подтверждено экспериментально при исследовании перехода горения в детонацию в заряде, схема которого представлена на рис. 6. Сжимаемость тэна в этом заряде была значительно снижена за счет введения внутрь ВВ прочного каркаса, состоящего из контактирующих между собой медных шариков диаметром 1 мм. Заряд, помещенный в стальную гильзу с толщиной стенки 0,25 мм, поджигался стандартным электровоспламенителем электродетонатора ЭД-8. По сравнению с обычным зарядом содержание ВВ в единице объема заряда при этом заметно уменьшилось, а теплоотвод из зоны возбуждаемой реакции существенно возрос. На фоторазвертке переходного режима (рис. 7) в таком заряде зафиксировано быстрое развитие процесса до скорости, соответствующей второй стадии, а в дальнейшем до предельных для такого заряда стадий взрывного превращения. Таким образом, после введения каркаса вторичное ВВ приобретает свойства инициирующего.

Уменьшение уплотнения ВВ в свою очередь замедляет уменьшение газопроницаемости. Поэтому возрастает и количество горячих газообразных продуктов горения, проникающих внутрь ВВ. Однако остается неясным, как изменение баланса энергии влияет на механизм сжигания конденсированной фазы. О важности этого процесса свидетельствует тот факт, что незначительная флегматизация тэна, получаемая при нанесении на его поверхность тонкого защитного слоя (например, вазелинового масла), предотвращает возникновение второй стадии как в заряде с каркасом, так и при искровом и динамическом инициировании. Не возникает этот процесс и в бездымном пироксилиновом порохе. К тому же массовая скорость послыного горения, известная из экспериментов при постоянном

давлении [6], оказалась недостаточной для обеспечения необходимого для этой волны газовыделения.

Нами предположено, что при разрушении к-фазы существенное влияние приобретают абляционные эффекты, возникающие при обдуве поверхности ВВ высокоскоростным потоком газа, значительно увеличивающие скорость сгорания гранул. Эта гипотеза предложена в [7] для объяснения аномально высокой скорости горения. В соответствии с ней итоговая скорость регрессии к-фазы определяется скоростью разрушения испаренного слоя из-за возникающих в нем неустойчивостей при обтекании скоростным потоком продуктов сгорания. Недостатком данного подхода является исключение из рассмотрения самого процесса возникновения этого слоя. В дальнейшем эта концепция получила развитие в [9], где изучалось взаимодействие отдельных кристаллов тэна с волной газовой детонации в стехиометрической смеси ацетилена с кислородом. При разработке данной методики учитывался уже известный факт, что газовая детонация может возбудить тот же переходный процесс, который имеет место при искровом и динамическом инициировании [10]. В такой постановке имеется возможность подвергать отдельные частицы конкретного размера воздействию газодинамического потока, параметры течения которого известны и могут легко варьироваться за счет изменения начального давления газовой смеси.

Для того чтобы точно регистрировать начало горения ВВ на фоне свечения продуктов газовой детонации, с помощью фотоумножителей фиксировались интенсивность излучения на длине волны  $\lambda_1 = 589$  нм, где спектр излучения горящего тэна имеет характерный максимум на фоне относительного минимума в спектре продуктов детонации газовой смеси, и интенсивность излучения на длине волны  $\lambda_2 = 475$  нм, контролирующего свечение детонационной волны. Данная методика позволила определить область исходных давлений смеси, при которых ВВ начинает реагировать, и время, необходимое для развития этой реакции. В экспериментах установлено, что продукты горения тэна фиксируются только в том случае, если начальное давление газовой смеси превосходит 0,3 МПа, и регистрируются приблизительно через 5 мкс после прохождения ударной волны. При более низких давлениях смеси соответствующая реакция не наблюдается в течение всего времени регистрации (30 мкс). В [9] показано, что такой характер вступления тэна в реакцию может быть объяснен развитием неустойчивостей микронного слоя расплава на поверхности гранул ВВ при обтекании этого слоя продуктами газовой детонации. Для условий эксперимента [9] теплофизические параметры продуктов детонации таковы, что возможен прогрев и плавление именно на такую глубину. Сорванный слой расплава быстро перемешивается с налетающими продуктами, пары ВВ нагреваются до температуры, значительно превышающей 1000 °С, и реагируют в этих условиях за доли микросекунды. Если такой поток создан внутри заряда тэна с исходной насыпной плотностью 0,9 г/см<sup>3</sup> и суммарной площадью поверхности частиц 500 см<sup>2</sup>/г, то он способен сжечь в волне примерно 1 % этого ВВ, что близко к значению, характерному для волны скоростного конвективного горения.

Конвективный характер волны переходного режима подтверждают эксперименты по передаче этой волны через инертную преграду из вещества с близкой пористостью. Преграда с толщиной порядка диаметра заряда не меняет характеристик волны. Реакция за преградой возникает не позднее чем через 0,1 мкс после проникания горячего потока. Тэн, флегматизированный 1 % вазелинового масла, и пироксилиновый порошок ведут себя в преграде как инертные вещества. Действительно, развитие неустойчивости и разрушение микронных слоев масла не могут привести к возникновению облака смеси, способной к быстрой вспышке. Порошок же не образует расплавленного слоя и до начала горения должен частично разложиться в конденсированной фазе. Таким образом, рассматриваемый абляционный механизм устанавливает различие между плавящимися вторичными ВВ и порохами.

Включение абляционного механизма резко увеличивает скорость газообразования и на фоторазвертках выглядит как микровзрыв, вызывающий затем распространение волн более быстрого горения как в прямом, так и в обратном направлениях. В свою очередь это свидетельствует о том, что скорость регрессии конденсированной фазы вплоть до разрушения слоя расплава остается сравнительно невысокой. Вероятно, это обусловлено уменьшением теплового потока в к-фазу при закипании расплавленного слоя. На возможность реализации подобного механизма указывал автор работы [11], экспериментальное подтверждение получено в опытах [12], где исследовалось зажигание гексогена и октогена лазерным излучением при мощности поджигающего источника, превышающей  $3 \cdot 10^2$  Вт/см<sup>2</sup>.

Инициирование детонации через стадию абляционного горения проходит в два этапа. На первом этапе должен быть сформирован поток газа и расплавлен поверхностный слой гранул ВВ, на втором происходит эволюция самого скоростного горения. Условия реализации этих этапов различны. На первом этапе основным сдерживающим фактором, как показано выше, является уплотнение слоя гранул, затрудняющее фильтрацию горячего газа внутрь основного массива ВВ. Для преодоления уплотнения необходимо ускорить горячий газ. Если этот газ формируется при разложении самого вещества заряда внешним энерговодом, то важно создать высокую плотность мощности и по возможности ограничить боковой разлет, который ведет к прямым потерям. Выполнение этих условий для веществ с нормальными термодинамическими характеристиками способствует более быстрому формированию ударной волны, но для двухфазных сред типа частицы — газ проникающий газ увеличивает противодавление в порах и замедляет перемещение гранул. Иницирующая ударная волна формируется на третьем этапе перехода, который не является определяющим, так как абляционное горение само способно распространяться в зарядах без оболочки и в итоге переходить в нормальную детонацию при достаточно большом диаметре заряда. На основе рассмотренного механизма распространения должен существовать и критический диаметр для абляционного горения, но исследования в данном направлении не проводились. Очевидно, что его значение не связано с критическим диаметром нормальной детонации.

Динамику возникновения скоростного конвективного горения и его развития в неидеальную детонацию можно проследить по профилям массовых скоростей в заряде порошкового тэна, помещенном в трубку из оргстекла, при инициировании волной пересжатой газовой детонации той же смеси, что использовалась ранее. Детонационная волна пада-

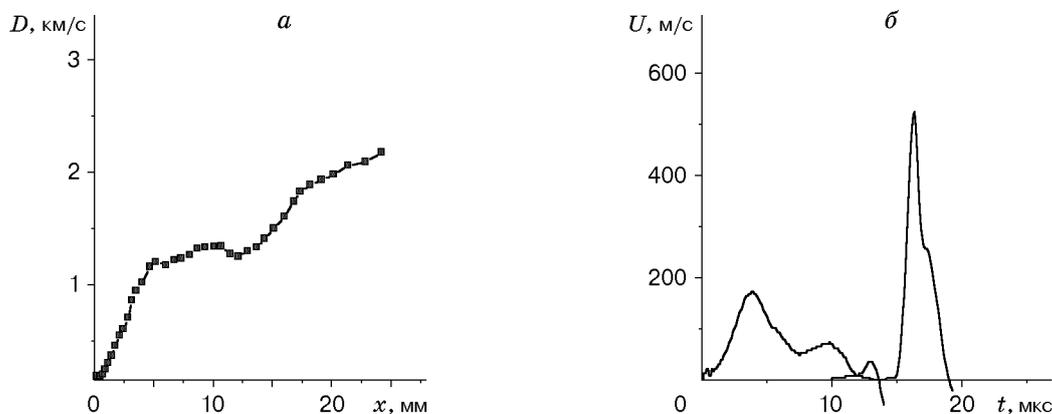


Рис. 8. Инициирование насыпного тэна пересжатой газовой детонацией при начальном давлении смеси 0,08 МПа:

*a* — скорость фронта; *б* — временные развертки массовой скорости на глубине 1,5 и 8,7 мм от начала заряда

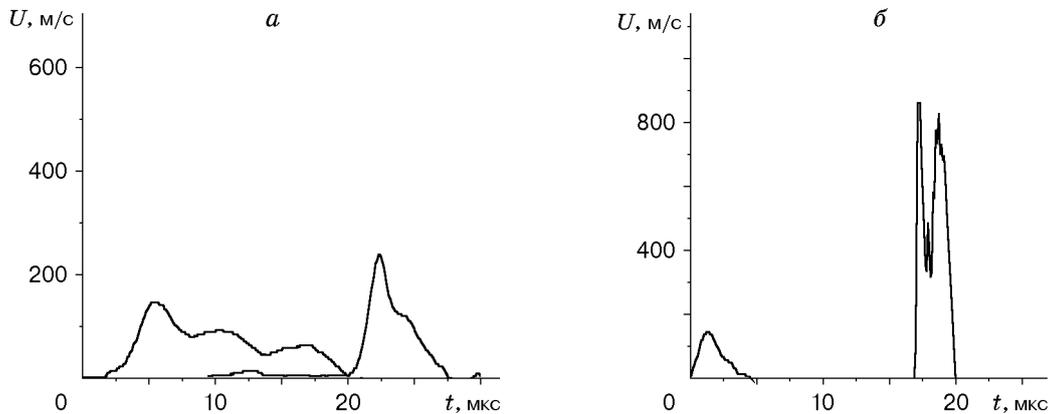


Рис. 9. Временные развертки массовых скоростей при инициировании пересжатой газовой детонацией:

*a* —  $\delta = 3$ ; 8 мм при  $P_0 = 0,08$  МПа; *б* —  $\delta = 0$ ; 15 мм при  $P_0 = 0,1$  МПа

ла по нормали на свободный торец насыпного заряда, перпендикулярный оси трубки. На рис. 8, *a* представлена зависимость скорости распространения самосвечения  $D$  от расстояния  $x$  от торца заряда. Профили массовых скоростей в этой волне, записанные фольговыми датчиками, расположенными на глубине 1,5 и 8,7 мм от начала заряда, приведены на рис. 8, *б*. Первый датчик, скорость  $D$  вблизи которого меньше 1 км/с, регистрирует пологий фронт, характерный для скоростного абляционного горения. Сигнал второго датчика имеет крутой фронт, близкий к ударному. При этом волна ускоряется до 1,5 км/с. На рис. 9 представлены профили массовых скоростей, полученные в двух экспериментах на разных расстояниях  $\delta$  до плоскости инициирования. Эволюция этих профилей в целом соответствует полученной в [5] для искрового инициирования, однако предвестник, зарегистрированный при искровом инициировании на осциллограмме рис. 5, при том же значении  $D$  в волне, запускаемой пересжатой детонацией, отсутствует. В остальном, как следует из рис. 10, эти профили с учетом сдвига по времени накладываются друг на друга. Фронт с предвестником регистрировался датчиком, расположенным на расстоянии 5 мм от искрового промежутка заряда, собранного по схеме, представленной на рис. 4. Длительность этого предвестника равна времени существования очаговой стадии разряда, когда абляция еще не успела развиваться и поток тепла в конденсированную фазу ограничивают пары ВВ.

Приведенные результаты позволяют предполагать, что абляционный режим является основным и для других источников энергии, формирующих запускающий импульс. Для взрывающихся проводников это будет показано ниже. Имеющаяся информация о развитии детонации при инициировании лазерным излучением (см., например, [13]) относится к ВВ

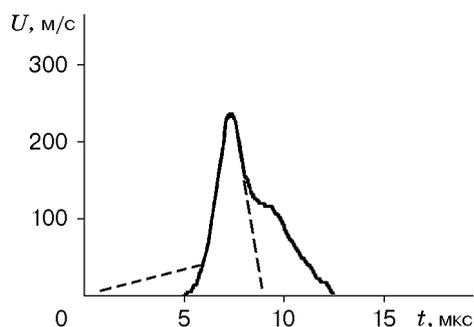


Рис. 10. Профили массовых скоростей при инициировании искрой (штриховая кривая) и пересжатой детонацией (сплошная кривая)

с очень высокой дисперсностью, где формирование волны происходит за короткое время, что затрудняет сопоставление.

**2. Промышленный детонатор ЭДВ.** Детонатор ЭДВ (рис. 11) создан в 1966–1968 гг. в результате совместной работы Института гидродинамики и новосибирского завода “Искра” и применен на Новосибирском и Горьковском авиационных заводах для механизированной (многоимпульсной) и обычной гидровзрывной штамповки деталей планера самолетов из прочных труднодеформируемых материалов. В 1972 г. он был допущен к постоянному применению в металлообработке при штамповке, сварке и упрочнении деталей из металла, а затем и в строительстве при проведении взрывных работ в черте города. По сравнению с известными детонаторами такого типа (см., например, [14]) он имеет больший разброс срабатывания по времени, достигающий  $\pm 5$  мкс, а его габариты соответствуют стандартам для промышленных детонаторов.

Инициирование детонации в ЭДВ проходит через абляционную стадию и осуществляется электрическим взрывом проводника. Требования к току, вызывающему гарантированное срабатывание, будем называть условиями инициирования. Электрическая схема для определения условий инициирования приведена на рис. 12. Постоянная времени  $RC$  выбиралась настолько большой, чтобы за весь промежуток времени до возникновения скоростного горения ток в цепи спадал не более чем на 5%, если при этом не срабатывал разрядник УР2. Ограничение тока по длительности происходило за счет поджига этого разрядника сигналом с предварительно установленной задержкой по времени. Ток и напряжение разряда определялись осциллографированием с использованием токовых шунтов и омических делителей напряжения с компенсацией реактивной составляющей по методу, изложенному в [15].

При обработке экспериментальных данных сопротивление проводника удобно рассматривать как функцию интеграла действия тока  $J(t)$ , определяемую соотношением

$$J(t) = \int_0^t I^2(t) dt, \quad (3)$$

так как вплоть до начала взрыва проводника эта зависимость однозначна. В силу этого момент  $\tau_B$  начала взрыва проводника можно определить из соотношения  $J(\tau_B) = J_0 = \text{const}$ . В детонаторе ЭДВ использован медный проводник диаметром 90 мкм, для которого  $J_0 = 4,8 \text{ A}^2 \cdot \text{с}$ .

Эксперименты без включения разрядника УР2 показали, что инициирование с небольшим процентом реализации начинается при  $I \approx 300 \text{ A}$ , а при  $I = 800 \text{ A}$  становится безотказным. Этот ток назовем гарантийным и обозначим  $I_G$ . При таком токе с поверхности проводника в момент  $\tau_B$  начинает слетать полупрозрачный слой паров меди (рис. 13), скорость переднего фронта которого составляет 800 м/с. Скоростное горение возникает не более чем через 0,5 мкс после момента  $\tau_B$ , если  $I(\tau_B) = I_G$ .

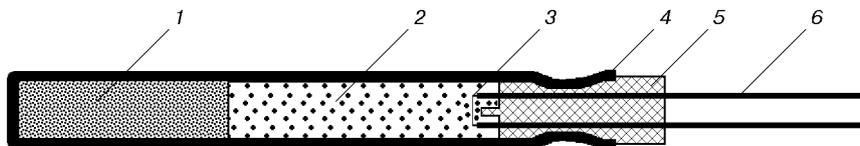


Рис. 11. Схема промышленного детонатора ЭДВ:

1 — заряд прессованного гексогена, 2 — заряд тэна насыпной плотности, 3 — проволочный мостик, 4 — стальная гильза, 5 — пластмассовая пробка, 6 — подводящие провода

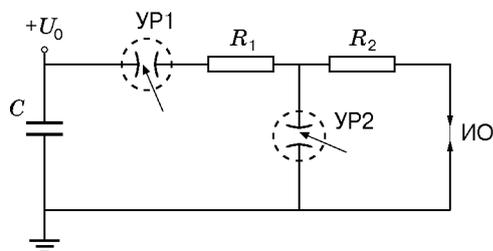


Рис. 12

Рис. 12. Схема устройства для исследования чувствительности ЭДВ к токовому импульсу: УР1, УР2 — управляемые сильноточные разрядники,  $R_1 = 10$  Ом,  $R_2 = 5$  Ом, ИО — место подключения объекта исследования

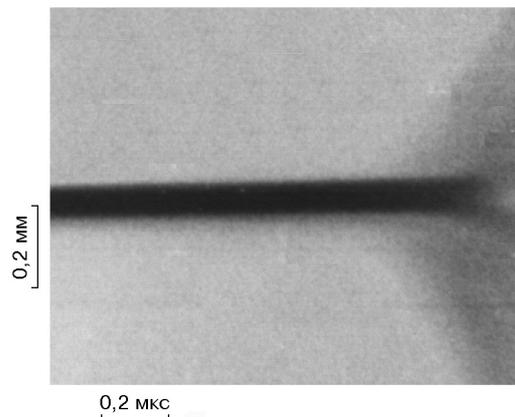


Рис. 13

Рис. 13. Разлет медного проводника в момент начала его электрического взрыва

Если шунтирующий разрядник включают до момента  $\tau_B + 0,5$  мкс, то это приводит к появлению отказов. При более позднем включении реализуется стопроцентное инициирование. Скорость разлета паров металла при этом также остается неизменной, что дает основания полагать, что именно данный поток обеспечивает возбуждение взрыва. На основании этих результатов условия инициирования для цепей с сосредоточенными параметрами с индуктивностью больше 5 мкГн приобретают вид

$$J(\tau_B) = J_0, \quad I(\tau_B) = I_T. \quad (4)$$

Предложенные условия справедливы в том случае, если ток до момента  $\tau_B$  не проходит через нуль.

На основе (4) для последовательной  $(R, L, C)$ -цепи с сосредоточенными параметрами и идеальным коммутатором проведены расчеты для трех конкретных цепей, позволившие установить зависимость напряжения зарядки  $U_0$  от емкости конденсатора  $C$ , для обеспечения гарантированного подрыва. Результаты, представленные на рис. 14, показывают, что для коротких взрывных магистралей, обычно применяемых в металлообработке, инициирование обеспечивают взрывные приборы с напряжением порядка 1 кВ.

**3. Системы инициирования для гидровзрывной штамповки.** Детонатор ЭДВ из-за низкой чувствительности к сторонним воздействиям позволяет механизировать все операции, связанные с транспортировкой заряда в зону подрыва, без применения каких-либо предохранительных устройств, что существенно уменьшает стоимость этого заряда.

При создании рабочего органа основной проблемой являлось подключение цепи заряда с предварительно вмонтированным в него детонатором к цепи источника инициирующего тока. Эта задача была успешно решена при создании системы высоковольтного бесконтактного инициирования, позволившей отказаться от монтажа стационарной взрывной электросети.

Принципиальная схема рабочего органа, иллюстрирующая этот метод, приведена на рис. 15. Заряд состоит из шашки прессованного тротила массой порядка 50 г, в которой полностью утоплен детонатор ЭДВ. Концевики детонатора имеют длину от 30 до 80 см в зависимости от глубины подрыва, выбираемой в соответствии с технологией изготовления

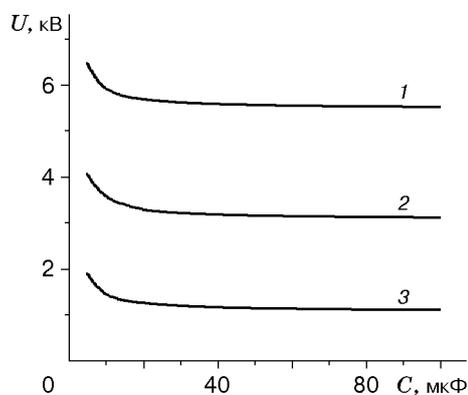


Рис. 14

Рис. 14. Зависимость напряжения на конденсаторе от его емкости:

1 —  $L = 10^{-5}$  Гн,  $R = 1$  Ом; 2 —  $L = 5 \cdot 10^{-5}$  Гн,  $R = 2$  Ом; 3 —  $L = 10^{-4}$  Гн,  $R = 3$  Ом

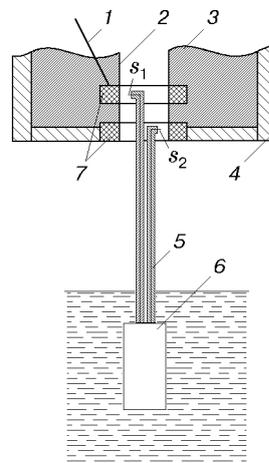


Рис. 15

Рис. 15. Схема рабочего органа установки для механизированного подрыва при гидровзрывной штамповке:

1 — токоподвод от генератора инициирующих импульсов, 2 — канал для транспортировки заряда, 3 — изолятор, 4 — металлический корпус, 5 — подводящие провода, 6 — заряд ВВ, 7 — электроды зоны коммутации

конкретной детали. Концы проводов зачищаются, и им придается форма, близкая к показанной на рис. 15. Основным элементом рабочего органа является узел коммутации, содержащий сквозной канал, по которому движется заряд, и контактные кольца-электроды, закрепленные в изоляторе и подключенные к генератору импульсов высокого напряжения. Импульсы подаются непрерывно с частотой  $f \approx 400 \div 800$  Гц. Узел коммутации может быть расположен над поверхностью воды или же заглублен. В этом случае вода вытесняется из него сжатым воздухом. Заряд подают в канал из загрузочного устройства, и он движется к месту подрыва под действием силы тяжести. Подача инициирующего импульса в движущийся заряд происходит в тот момент, когда оголенные концы подводящих проводов оказываются в зоне коммутации. При этом в процессе его движения в течение некоторого времени коммутации  $\tau_k$  длина суммарного воздушного промежутка  $S = S_1 + S_2$  между подвижными и неподвижными электродами проходит через минимум и остается близкой к минимальной. За это время к промежутку  $S$ , заполненному воздухом, несколько раз подводится напряжение, достаточное для его пробоя. Если генератор способен сформировать в этой вновь образованной цепи импульс тока, удовлетворяющий условиям (4), то заряд подрывается в заданной точке рабочего объема.

При отработке установки выяснилось, что рабочий орган должен быть компактным, а расстояние между стационарными электродами зоны коммутации не должно превышать 3–4 см. При этом длина промежутка  $S$  должна быть не меньше 2 см. Для выполнения этих условий поисковые импульсы генератора, обеспечивающего коммутацию, должны иметь длительность не более 1 мкс при напряжении 30–40 кВ.

В то же время стоимость заряда должна быть минимальной, что не допускает применения изоляции, исключающей возможность преждевременного пробоя подводящего провода в воду, обязательно его окружающую. В случае ложного разряда пробивается только промежуток  $S_1$ , а сопротивление разрядной цепи не падает ниже 1 кОм, так как ток обя-

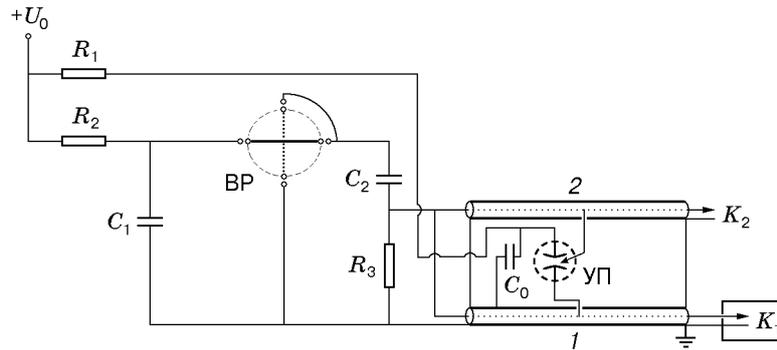


Рис. 16. Схема генератора инициирующих импульсов для механизированного подрыва:  
 $C_1, C_2, C_0$  — конденсаторы емкостью 1 мкФ, 2 нФ, 0,5 мкФ;  $R_1 = 20$  кОм,  $R_2 = 20$  кОм,  $R_3 = 1$  кОм;  
 BP — вращающийся разрядник; УП — управляемый разрядный промежуток

зательно проходит через жидкость. Такой разряд не может вызвать срабатывания сильноточного детонатора.

Решить указанные проблемы удалось с помощью специального генератора поисковых и инициирующих импульсов, схема которого приведена на рис. 16. Поисковые импульсы формируются при зарядке и разрядке конденсатора  $C_2$  емкостью порядка 2 нФ на два одинаковых коаксиальных кабеля типа РК-50 длиной 150 м, подключенных параллельно. Частота следования импульсов задается угловой скоростью ротора вращающегося разрядника. При отражении сигнала на конце каждого кабеля формируются импульсы напряжения с амплитудой около 50 кВ и длительностью порядка 1 мкс. Один из кабелей подключается к стационарным электродам зоны коммутации рабочего органа, второй остается разомкнутым. В середине каждого кабеля в точках 1 и 2 сделаны выводы с центральной жилы, подключенные к поджигающему промежутку управляемого разрядника УП. Если промежуток зоны коммутации (точка  $K_1$ ) не пробивается, то волны напряжения в обоих кабелях одинаковы и на поджигающем промежутке разрядника УП напряжение не возникает. При пробое промежутка  $S$  зоны коммутации сопротивление в точке  $K_1$  становится намного меньше волнового сопротивления кабеля и отраженный сигнал меняет свою полярность. Вследствие этого между точками 1 и 2 возникает большой перепад напряжений, что приводит к пробое поджигающего промежутка и срабатыванию разрядника УП. Заряженный до напряжения источника питания конденсатор  $C_0$  емкостью 1 мкФ, разряжаясь через сформированную цепь, подрывает детонатор и весь заряд. При ложном пробое разрядник УП не поджигается.

Рассмотренная система инициирования позволила создать простые и устойчиво функционирующие рабочие органы, выдерживающие значительные ударные нагрузки и обеспечивающие инициирование без применения дополнительной электрической изоляции цепи электродетонатора.

Таким образом, в результате проведенных исследований обнаружен новый механизм развития детонационного превращения в пороховых ВВ, в основе которого лежат абляционные эффекты, обусловленные разрушением тонкого слоя расплава, возникающего в высокоэнтальпийном потоке на поверхности гранул плавящегося вторичного ВВ. Эти эффекты обеспечивают быстрое газообразование за время порядка микросекунд, когда общий прогрев конденсированной фазы мал и не может обеспечить выполнения условий зажигания, сформулированных в работе [16]. Справедливость данного условия при быстром нагреве подтверждена в работе [12]. Следует отметить, что по такому механизму не могут гореть пороха, которые не плавятся, поэтому именно абляционный механизм устанавли-

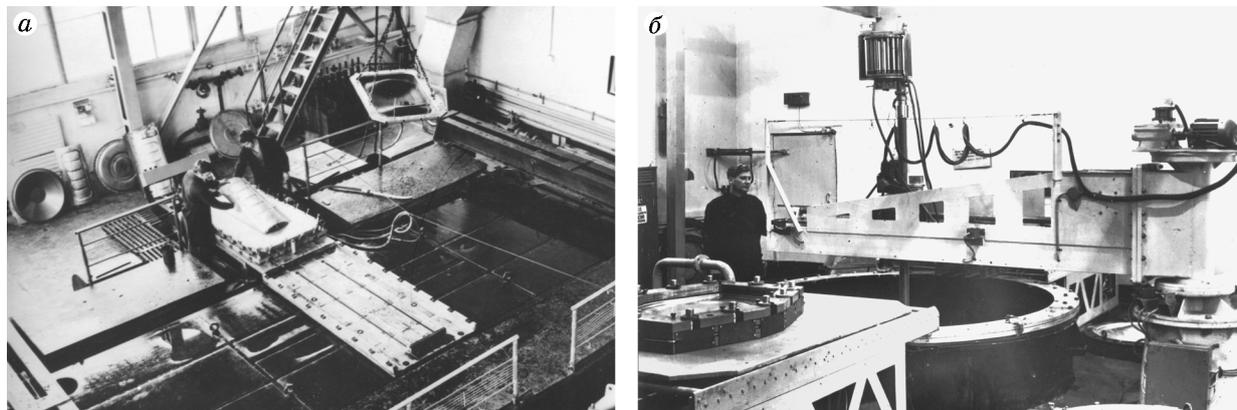


Рис. 17. Цех гидровзрывной штамповки на Новосибирском авиационном заводе им. В. П. Чкалова:

*а* — прямоугольный взрывной бассейн, *б* — установка ВУ-2,5 с механизированным подрывом зарядов массой 50 г

ваит различие между данными унитарными топливами. Известно, что свойства порохов и вторичных ВВ значительно различаются. Поэтому чувствительность всех указанных материалов к внешнему энергетическому воздействию должна проверяться способом, позволяющим определить вероятность возникновения абляционного механизма. В настоящее время такие испытания для унитарных топлив не проводятся. Несомненно, такие проверки необходимы.

От внедрения указанных разработок получен большой экономический эффект. Устройства с механизированным подрывом успешно используются на Новосибирском и Горьковском авиационных заводах для изготовления деталей планера современных истребителей. На рис. 17 представлен общий вид участка гидровзрывной штамповки авиационного завода им. Чкалова, где эти детонаторы были применены впервые.

Инициирование заряда в свободном падении было применено и для автоматизации подрыва при синтезе ультрадисперсных алмазов. В этом случае заряд перемещался в газовой атмосфере взрывной камеры, что позволило стабильно возбуждать детонацию быстролетящим телом через промежуточный заряд порошкового тэна.

Кроме того, детонаторы ЭДВ широко применяются при проведении взрывных работ по обычным схемам во взрывных камерах при обработке металлов, а также в строительстве при рыхлении мерзлых грунтов в стесненных условиях.

Установленные механизмы развития детонационного перехода открывают возможности создания детонаторов, срабатывающих от очага воспламенения, содержащих только вторичные ВВ. Такие детонаторы могут быть применены при проведении взрывных работ в горной промышленности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Muller G. M., Moore D. B., Bernstein D. Growth of explosion in electrically initiated RDX // J. Appl. Phys. 1961. V. 32, N 6. P. 1065-1075.
2. Ляхов Г. М., Покровский Г. И. Взрывные волны в грунтах М.: Гостехиздат: Недра, 1962.
3. Беляев А. Ф., Боболев В. К., Коротков А. И. и др. Переход горения конденсированных систем во взрыв. М.: Наука, 1973.

4. Андреев В. В., Зубков П. И., Киселев Г. И., Лукьянчиков Л. А. Об одном из режимов распространения детонации в порошковых ВВ малой плотности // Динамика сплошной среды: Сб. науч. тр. / АН СССР. Сиб. отд-ние. Ин-т гидродинамики. 1972. Вып. 10. С. 183–188.
5. Андреев В. В., Лукьянчиков Л. А. К механизму распространения детонации с малой скоростью в порошковом тэне при искровом инициировании // Физика горения и взрыва. 1974. Т. 10, № 6. С. 912–919.
6. Андреев К. К. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ. М.: Наука, 1966.
7. Андреев В. В., Ершов А. П., Лукьянчиков Л. А. Двухфазная низкоскоростная детонация пористого ВВ // Физика горения и взрыва. 1984. Т. 20, № 3. С. 89–93.
8. Seay G. I., Seely L. V. Initiation of a low-density PETN pressing by a plane shock wave // J. Appl. Phys. 1961. V. 3, N 6. P. 140–145.
9. Григорьев В. В., Лукьянчиков Л. А., Прууэл Э. Р. Поджигание частиц тэна волной газовой детонации // Физика горения и взрыва. 1997. Т. 33, № 2. С. 133–138.
10. Андреев В. В., Лукьянчиков Л. А., Митрофанов В. В., Тесленко В. С. Возбуждение детонации порошковых ВВ взрывом газовых смесей // Физика горения и взрыва. 1980. Т. 16, № 4. С. 153–155.
11. Либрович В. Б. О воспламенении порохов и взрывчатых веществ // ПМТФ. 1963. № 6. С. 74–79.
12. Старковский Л. Г., Уляков П. И., Фролов Е. И. Воспламенение некоторых вторичных ВВ лазерным излучением // Горение конденсированных систем: Сб. науч. тр. Черноголовка: Ин-т хим. физики АН СССР, 1977. С. 8–12.
13. Быстрое инициирование ВВ. Особые режимы детонации. Снежинск: Всерос. науч.-исслед. ин-т техн. физики, 1998.
14. Кнопфель Г. С. Сверхсильные магнитные поля. М.: Мир, 1972.
15. Лукьянчиков Л. А., Киселев Г. И. Компенсационный метод измерения импульсного тока и напряжения // Приборы и техника эксперимента. 1974. № 4. С. 99, 100.
16. Аверсон А. Э., Барзыкин В. В., Мержанов А. Г. Приближенный метод решения задач тепловой теории зажигания // Докл. АН СССР. 1968. Т. 178, № 1. С. 131–134.

*Поступила в редакцию 13/IV 2000 г.*

---