

## Зажигательное действие кумулятивных зарядов по жидкому топливу

© В.И. Васюков, Ю.М. Дильдин, С.В. Ладов, Л.П. Орленко

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Рассмотрен процесс воспламенения и развития горения жидкого топлива при попадании на него макроскопических источников воспламенения. В качестве таких источников могут быть нагретые диспергированные частицы различных металлов и сплавов, образуемые в результате пробития кумулятивной струей прочной стальной преграды конечной толщины и топливного бака, находящегося в замкнутом объеме. Выявлены основные физические факторы, обуславливающие зажигательное действие при взрыве кумулятивных зарядов на различных этапах их взаимодействия с топливным баком. Подробно исследован механизм загорания жидкого топлива при попадании в него нагретых диспергированных частиц из разных материалов. Определена зависимость времени задержки горения жидкого топлива от температуры частиц металла и их массы для различных материалов. Исследовано влияние температуры жидкого топлива на эффективность его загорания. Предложены конструктивные решения кумулятивных узлов, позволяющие повысить эффективность забронированного действия кумулятивных зарядов без снижения их бронепробития за счет усиления зажигательного эффекта.*

**Ключевые слова:** кумулятивный заряд, кумулятивная струя, диспергированная частица, жидкое топливо, зажигательное действие, воспламенение, горение, температура, масса

Повышение эффективности забронированного действия кумулятивных зарядов (КЗ) является в настоящее время актуальной задачей на пути дальнейшего совершенствования кумулятивных боеприпасов [1]. В результате взрыва КЗ на преграде конечной толщины (например, корпус бронетехники) в запреградное пространство проникают элементы кумулятивной струи (КС) и поток осколков от тыльной поверхности преграды, впереди которых распространяются ударные волны (воздушная взрывная и баллистические от потока осколков и элементов КС) [2–5]. Указанные факторы могут обеспечивать дополнительное механическое, компрессионное, инициирующее и зажигательное действие в замкнутом объеме бронетехники.

В статье исследовано наименее изученное к настоящему времени зажигательное действие в целях определения условий для повышения вероятности его реализации при попадании КС в бак с жидким топливом. Для этого детально изучается механизм воспламенения жидкого топлива и определяются пути перехода его к устойчивому горению в зависимости от температуры, массы и материала частиц КС и

вторичных осколков, а также температуры самого топлива. На основе результатов исследования предложены конкретные рекомендации по усилению зажигательного действия кумулятивных зарядов.

Рассматриваемое в статье зажигательное действие КЗ реализуется при попадании КС в топливный бак и разрушении последнего в результате гидроудара. При этом зажигательное действие усиливается при заносе за преграду различного рода химически активных и реакционно-способных материалов, которые, взаимодействуя, как правило, с нагретым вытекающим и разбрызгивающимся жидким топливом, приводят к его воспламенению, переходящему в устойчивое горение. Известны различные способы размещения таких материалов в конструкциях кумулятивных боеприпасов: различные комбинированные и многослойные кумулятивные облицовки; дополнительные элементы в виде различных вкладышей, вставляемых в облицовки или примыкающих к ним; сами химически активные и реакционно-способные материалы [6–9].

Анализ результатов исследований показывает, что воспламенение горючих смесей при попадании в них элементов КС, откольных частиц материала с тыльной поверхности преграды или диспергированных частиц занесенного через отверстие от струи материала и распространение в них пламени определяется многими физико-химическими параметрами, прежде всего, температурой и массой элементов КС [10–16]. Из рассмотрения общей физической картины следует, что основные физические факторы, обуславливающие зажигательное действие при взрыве КЗ, можно разделить на две группы:

- факторы, возникающие непосредственно при взрыве КЗ, образовании кумулятивной струи и взаимодействии ее с бронированным объектом;
- факторы, формирующиеся в процессе взаимодействия КС и сопровождающего ее потока диспергированных частиц заносимого материала с топливным баком.

На первой стадии, которая продолжается от 50 до 200 мкс, происходит формирование таких источников воспламенения, как элементы КС, ударные волны, продукты детонации, вторичные осколки материала преграды [2, 3].

Вторая группа факторов, таких как диспергированные частицы топлива, поток вторичных осколков от стенок топливного бака и гидроудар, формируется на второй стадии, которая начинается с момента контакта КС с топливным баком и продолжается до появления первичных очагов воспламенения. По времени этот этап может охватывать период от сотен микросекунд до единиц миллисекунд в зависимости от геометрических размеров топливного бака. За это время происходит формирование горючей смеси, т. е. жидкое топливо ча-

стично разбрызгивается, нагревается, прогревается, испаряется и перемешивается с воздухом. Тем самым создаются условия, благоприятствующие воздействию физических факторов первой и второй групп на горючую смесь. Возникают первичные источники воспламенения топлива, которые носят характер местного горения.

Дальнейшее развитие процесса — третью стадию, можно определить как стадию возникновения горения (зажжения) топлива по всему объему, которая начинается с момента воспламенения и продолжается от долей секунд до нескольких минут. На этой стадии распространение горения определяется скоростью вытекания топлива из пробитого топливного бака и количеством первичных очагов воспламенения.

Таким образом, процесс загорания топлива в данном случае можно разделить на три фазы:

- вспышка (от момента выплеска топлива из бака и до начала видимого воспламенения);
- воспламенение (от момента окончания первой фазы и до возникновения видимых очагов загорания);
- загорание (от момента возникновения отдельных очагов и до перехода к устойчивому горению по всему объему).

С учетом перечисленных выше факторов и фаз механизм загорания, применительно к топливным бакам в броневом пространстве, реализуется следующим образом.

1. При разрушении топливного бака КС и за счет гидроудара формируется топливно-воздушная смесь, состоящая из диспергированного топлива, паров топлива и воздуха.

2. Топливо-воздушная смесь воспламеняется при действии на нее факторов первой группы (элементы струи, вторичные осколки, продукты взрыва, баллистические ударные волны); при этом реализуется первая стадия загорания — вспышка, обеспечивающая предварительный прогрев топлива.

3. За счет воздействия продуктов детонации, частиц элементов КС и частиц вторичных осколков возникают отдельные местные очаги воспламенения. При этом сильное влияние на воспламеняющую способность оказывают масса (размер) частиц, температура этих частиц и топлива. Для частиц из меди и стали воспламеняющее действие проявляется при массе больше 15 г, температуре частиц больше или равной 800 °С и температуре топлива в очаге воспламенения больше или равной 75 °С [16]. Для горящих частиц из сплавов алюминия и магния их масса не должна быть меньше 10 г при температуре топлива примерно 25 °С, а при повышении температуры топлива до 75 °С необходимая для его воспламенения масса частиц в 10 раз меньше [16].

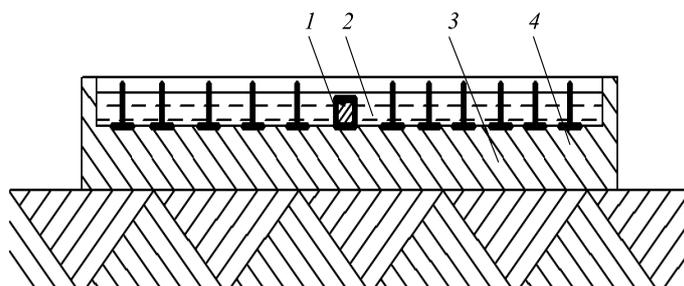
4. Образовавшиеся очаги при определенных условиях переходят в стационарный процесс загорания.

Для уточнения механизма загорания жидкого горючего при действии КЗ по топливному баку были проведены две группы исследований:

- процесса воспламенения и развития горения жидкого топлива в результате взаимодействия с ним макроскопических источников воспламенения;

- динамики взаимодействия КС с топливным баком.

Схема первой группы экспериментов показана на рис. 1. Частицы металла различной массы (предварительно разогретые в нагревательной печи) помещали в слой дизельного топлива, находящийся на горизонтальной стальной плите. Регистрировался процесс испарения, воспламенения и развития горения топлива, время задержки воспламенения, скорость горения частиц металла и скорость распространения пламени по поверхности топлива. Эксперименты были разбиты на ряд серий с соответствующим изменением условий.



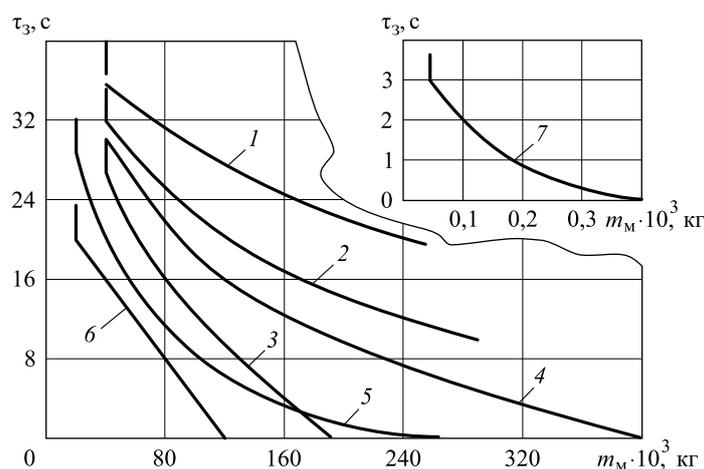
**Рис. 1.** Схема лабораторных экспериментов:

1 — металлическая частица; 2 — слой жидкого топлива; 3 — поверхность емкости; 4 — реперные метки

Сначала фиксировался факт загорания топлива при воздействии на него компактных раскаленных или горящих частиц размером 1...2 мм. Толщина слоя топлива при этом не превышала 2 мм. Регистрировалось время задержки воспламенения  $\tau_3$  от момента попадания частицы в топливо до момента возникновения устойчивого очага горения. Температура топлива и металлической подставки, на которой оно находилось, соответствовали комнатной температуре (примерно 20 °С). За время задержки воспламенения происходил процесс нагрева и испарения топлива. На первой стадии взаимодействия количество топлива вокруг частицы резко уменьшается за счет интенсивного процесса испарения. Затем окружающие слои топлива подходят к частицам, прогреваются и в определенный момент для неко-

торых частиц происходит воспламенение жидкого топлива с последующим переходом горения в установившийся процесс.

Графики зависимости времени задержки  $\tau_3$  от массы частицы  $m_M$  и ее температуры  $T_M$  приведены на рис. 2.



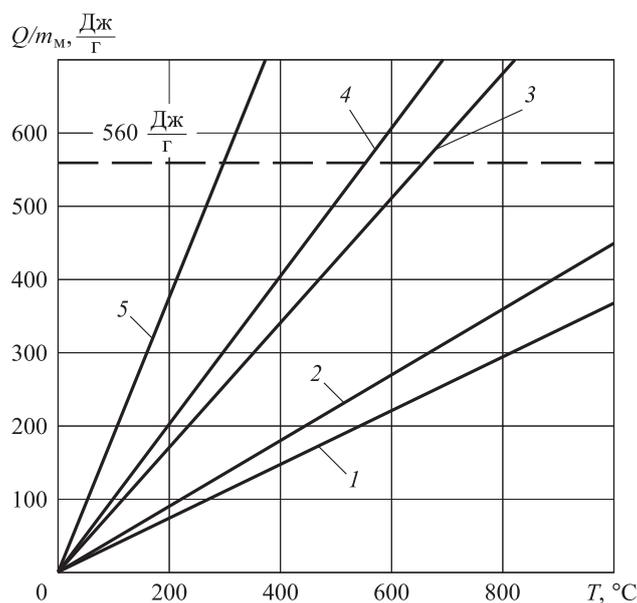
**Рис. 2.** Зависимость времени задержки воспламенения от массы частицы и ее температуры:

1–3 — медь ( $T_M = 800, 900$  и  $1000$  °C соответственно); 4–6 — железо ( $T_M = 800, 900$  и  $1000$  °C); 7 — магниевый сплав ( $T_M = 650$  °C)

Данная серия экспериментов показала: чтобы произошло устойчивое воспламенение топлива, недостаточно нагрева его паров в присутствии кислорода до определенной температуры. Обязательно должно пройти некоторое время, необходимое для саморазгона предпламенной реакции; это время соответствует периоду задержки. В течение предпламенной реакции имеет место, с одной стороны, выделение теплоты, а с другой — расход теплоты на испарение и отвод паров в прилегающие слои жидкости и в материал поверхности, на которой находится слой топлива. В первом приближении для интегральной оценки количество тепловой энергии, поступающее от металлической частицы, должно быть больше энергии кипения и испарения.

Графики зависимости удельной тепловой энергии от изменения температуры для разных веществ показаны на рис. 3. В нашем случае эта энергия должна быть не менее 560 Дж на 1 г топлива.

Необходимо отметить следующее. Для рассматриваемого процесса воспламенения топлива отдельными металлическими частицами характерно, что прогрев происходит в ограниченном объеме. Поэтому удельная поверхность теплоотвода в нашем случае выше, чем при общем нагреве смеси, в результате чего зажигание должно происходить при более высоких температурах.



**Рис. 3.** Зависимость удельной тепловой энергии вещества от изменения его температуры:  
 1 — медь; 2 — сталь; 3 — алюминий; 4 — магний; 5 — керосин

В настоящее время различают такие виды загорания, как вспышка — кратковременный процесс сгорания горючей системы при контакте с источником воспламенения, воспламенение — возникновение горения непрерывно образующейся горючей системы после соприкосновения горючего с источником воспламенения, самовозгорание — горение, возникающее без контакта с источником воспламенения, за счет экзотермических процессов, протекающих внутри топлива. Два последних вида загорания для рассматриваемого процесса не характерны, так как подобные условия практически не возникают.

Общепринято, что вследствие относительно низких температур кипения жидких углеводородных топлив и высоких температур горения они всегда сгорают в паровой фазе [16]. Следовательно, в рассматриваемом случае воспламенение жидкости нагретым телом развивается по следующей схеме: первоначально осуществляется нагрев части объема горючего, имеющего некоторую температуру; затем температура повышается до температуры воспламенения, после чего она растет за счет реакций окисления. Быстрому прогреву способствует малая теплопроводность горючего вещества и большая поверхность слоя топлива при его малой толщине.

В заключительной стадии идет интенсивное самонагревание горючего, температура повышается до температуры горения и процесс превращается в установившийся. В этом режиме источником вос-

пламенения является уже сама зона реакции горючего вещества и окислителя, образующих горючую систему. При больших объемах горючего (толщина слоя топлива остается постоянной) изменение теплоотвода через его поверхность не должно заметно сказываться на эффекте загорания, так как самовоспламенение горючей смеси происходит в локальной части жидкости.

Первая стадия экспериментов подтвердила, что в основном процесс будет определяться параметрами источника воспламенения, которым в нашем случае служит нагретая или горящая частица металла. Кроме того, как было указано выше, достаточно очевидно влияние начальной температуры горючего, так как согласно правилу Вант-Гоффа скорость реакции примерно удваивается с ростом температуры на 10 °С [16]. С точки зрения возможного ускорения протекающих реакций следует обратить внимание на каталитическое действие источников воспламенения различных металлов, так как оно может оказывать сильное влияние на эффект протекающих реакций.

Были проведены расчеты времени испарения частицы жидкости (летнее дизельное топливо типа «Л») с характерным размером  $\delta_0 = 2\delta_{ж}$ , где  $\delta_{ж}$  — толщина слоя жидкости, для различных начальных размеров частиц. На рис. 4 представлена соответствующая зависимость, имеющая вид

$$\tau = 1,1\delta_0^2, \quad (1)$$

где размерность  $\delta_0$  в миллиметрах, время  $\tau$  — в секундах.

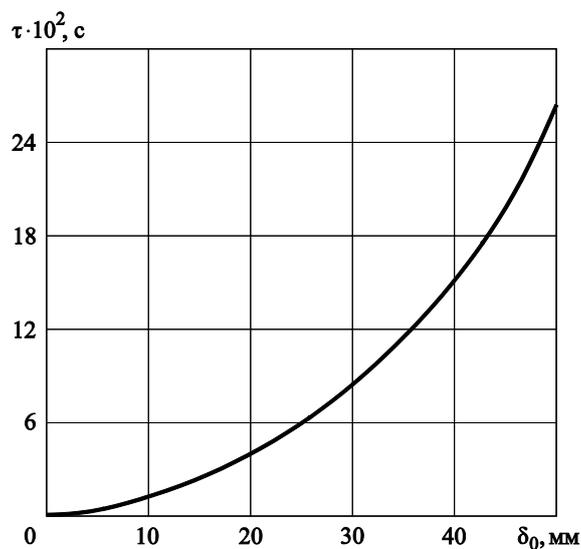


Рис. 4. Зависимость времени испарения частицы дизельного топлива от ее характерного размера

Если принять, что размер прогреваемой части жидкости совпадает с размерами частицы, то при этом допущении экспериментальные значения времени задержки примерно соответствуют времени испарения. Дополнительные эксперименты по определению размера зоны, участвующей в образовании парогазовой смеси, показали, что данная область примерно 1,5 раза больше характерного размера частиц. Тогда окончательно формулу для расчета времени задержки можно записать как

$$\tau_3 = A(T) \left( \frac{m_M^*}{m_M} - 1 \right)^{1/2}, \quad (2)$$

где  $A(T)$  — коэффициент, зависящий от температуры частицы металла;  $m_M$  — масса металлической частицы;  $m_M^*$  — критическая масса частицы.

Значения входящих в формулу (2) коэффициентов приведены в таблице.

**Значения коэффициентов  $A(T)$  и  $m_M^*$  в зависимости от материала частицы и ее температуры**

Материал частицы	Температура материала частицы, °С	$A(T)$	$m_M^* \cdot 10^3$ , кг
Медь	1000	13,0	200
Железо	1000	10,5	120
	900	7,4	300
Магниевый сплав	800	10,0	400
	650	0,9	0,4

Существенная разница в зажигательной способности наблюдается при взаимодействии с топливом горящих частиц из магниевого сплава. При этом основным фактором при зажигании является процесс диспергирования самой горячей частицы в период задержки воспламенения. В случае если процесс диспергирования заканчивается раньше, чем происходит воспламенение, установившееся горение топлива не наблюдается. При этом сама частица продолжает гореть, но уже не за счет выгорания металла, а за счет сгорания топлива, проникающего в поры частицы. Таким образом, последовательно протекающие стадии разогрева и испарения топлива приводят к получению горючей смеси, а наличие высокой концентрации дополнительных активных центров воспламенения приводит к устойчивому загоранию. Причем время задержки становится минимальным, если

одновременно с диспергированием частицы металла происходит разбрызгивание топлива.

Следующим параметром, который замерялся в этой серии экспериментов, являлась скорость распространения пламени по поверхности топлива. После возникновения устойчивого горения, независимо от материала частицы и его температуры, скорость распространения пламени является постоянной величиной. При этом форма пламени и его структура практически не изменяются по мере развития процесса сгорания топлива. Для топлива, находящегося при комнатной температуре, в нашем случае эта скорость составила  $0,85 \dots 1$  м/с.

Вторая серия экспериментов была посвящена влиянию начальной температуры топлива на время задержки. Проведившиеся опыты с дизельным топливом показали, что повышение его температуры до  $(30 \pm 5)$  °С не приводит к значительному изменению времени задержки. Данный факт можно объяснить тем, что при повышении температуры топлива, с одной стороны, тормозятся реакции, ведущие к наполнению активных продуктов окисления, а с другой – увеличивается выход конечных продуктов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ), замедляющих саморазгон реакции. В результате повышение температуры в верхней температурной зоне не дает повышения суммарного саморазгона и сокращения задержки.

Повышение температуры до  $(50 \pm 5)$  °С приводит к уменьшению времени задержки в 2 раза для частиц из меди и железа и в 2,5 раза для частиц из магниевого сплава. При температуре топлива до  $(75 \pm 5)$  °С, независимо от материала частиц, время задержки составляет доли секунды. Скорость распространения пламени увеличивается от 2 до 10 м/с при изменении температуры от  $(50 \pm 5)$  до  $(70 \pm 5)$  °С. Характер горения топлива близок к тепловому взрыву.

Таким образом, увеличение начальной температуры топлива сокращает как период задержки, так и время полного сгорания. Влияние температуры топлива особенно велико при значениях, близких к температуре кипения топлива. Этот факт можно объяснить как физическими причинами, так и химическими — иное протекание предпламенных реакций.

В этой серии экспериментов было замечено, что при диспергировании горящих частиц из магниевого сплава или при взаимодействии топлива, нагретого выше 50 °С, с частицами из меди и железа, температура которых более 500 °С, возникают локальные области турбулентности. Усиление турбулентности улучшает процесс смесеобразования, что в некоторых пределах оказывает благоприятное влияние на развитие предпламенных реакций и, соответственно, вызывает сокращение общей задержки воспламенения.

Третья серия экспериментов была посвящена определению скорости горения металлических частиц из магниевых сплавов. Частицу металла предварительно помещают в электронагревательную печь, где при температуре порядка 650 °С она воспламеняется. Температура воспламенения металлической частицы определялась при постепенном повышении температуры в печи.

Как известно, отличительной чертой магниевых сплавов является отсутствие сплошной оксидной пленки этих сплавов. Поэтому воспламенение частиц происходит при относительно низкой температуре. Время задержки воспламенения частиц пропорционально квадрату ее характерного размера. В процессе горения частицу окружает неоднородная зона свечения, имеющая факельную структуру. Происходит диспергирование основной частицы на более мелкие. Уносимые из зоны свечения частицы не превосходят десятков микрон. Свечение самой частицы менее интенсивное, чем у отдельных зон реакции.

Зависимость времени горения от размера частиц в нашем случае выражается эмпирической формулой

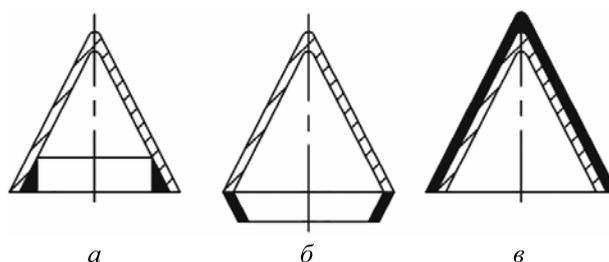
$$\tau_r = 1,71\delta_0^2, \quad (3)$$

где  $\delta_0$  — в миллиметрах, а время — в секундах. Следует отметить, что время горения частицы, находящейся в топливе, и свободной частицы практически совпадает.

Таким образом, из полученных результатов следует, что характерной чертой рассматриваемого процесса воспламенения является его многостадийный характер и объемное горение топлива вблизи металлической частицы. Длительность периода задержки воспламенения зависит как от физических, так и химических процессов. К первым относятся распыление, испарение, диффузия паров и условия прогрева топлива в процессе взаимодействия с частицей. Химические процессы связаны с характером реакций процесса окисления углеводородов в рассматриваемых условиях. Увеличение начальной температуры топлива существенно сокращает как период задержки воспламенения, так и время его полного сгорания. При температуре, близкой к кипению жидкого топлива, развитие процесса горения напоминает тепловой взрыв.

Из рассмотрения качественной картины процесса взаимодействия КС в заброневом пространстве с разбрызгиваемым топливом при пробитии бака следует, что одним из перспективных путей повышения зажигательного действия КЗ является занесение в заброневое пространство частиц определенной массы из легкого и легко воспламеняющегося материала, например магниевых сплавов. Размещение такого материала целесообразно проводить в кумулятивной облицовке

ке таким образом, чтобы общая глубина бронепробития данного КЗ не уменьшалась. На рис. 5 показаны такие конструктивные схемы облицовок, когда магниевый сплав размещается в конической облицовке в виде внутреннего (*а*), наружного (*б*) вкладышей или второго слоя облицовки (*в*). Как показывают результаты экспериментальных исследований, в этом случае можно существенно повысить эффективность зажигательного действия КЗ по сравнению с зарядами с медной или стальной облицовками, при этом практически не изменяется и глубина бронепробития кумулятивных зарядов.



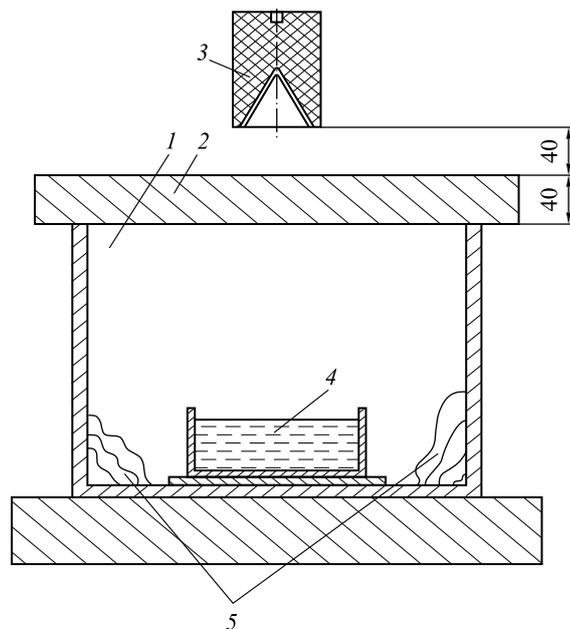
**Рис. 5.** Схемы комбинированных кумулятивных облицовок:

*а* — с внутренним вкладышем; *б* — с наружным вкладышем; *в* — двухслойная облицовка с наружным слоем из химически активного материала

В качестве активного материала в опытах использовались сплавы системы магний — алюминий МА-2-1 (ГОСТ 14957–69), магний — литий ВДМ-5 (ОСТ 1-90169–75) и ИМВ-2 (ТУ-9-778–73), обладающие высокой химической активностью. Разогреваясь в процессе обжата облицовки и формирования КС, эти материалы способны вступать в экзотермические реакции с такими элементами и соединениями, как  $O_2$ ,  $H_2O$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$  и другими, следствием чего должно быть значительное повышение зажигательного и термического действия КЗ, загазованности, а также некоторое увеличение давления в заброневом пространстве.

На рис. 6 приведена схема лабораторного эксперимента с использованием емкости с жидким топливом. В опытах использован КЗ диаметром 25 мм (материал облицовки сталь, угол раствора конуса  $44^\circ$ , толщина облицовки 1,0 мм). В замкнутом объеме размером  $300 \times 200 \times 200$  мм расположена емкость с дизельным топливом типа «Л» (ГОСТ 305–73) и некоторые твердые горючие материалы (фотопленка, полиэтилен, бумага, вата). Толщина броневой плиты была выбрана равной 40 мм с тем, чтобы отсечь продукты детонации с помощью песта, застревающего в пробиваемом отверстии.

После подрыва КЗ с внутренним вкладышем из магниевого сплава высотой примерно 0,25 от высоты кумулятивной облицовки (при этом бронепробивное действие КЗ не снижалось — см. рис. 5, а) наблюдалось горение (или следы горения) указанных выше горючих материалов.



**Рис. 6.** Схема лабораторного эксперимента:

1 — замкнутый отсек; 2 — стальная преграда; 3 — кумулятивный заряд; 4 — емкость с жидким топливом; 5 — дополнительные горючие материалы

При отсутствии вкладыша подобных изменений с горючими материалами не происходило. На тыльной поверхности преграды и отдельных предметах в заброневом пространстве присутствовал характерный темно-синий налет продуктов окисления магниевого сплава.

Для подтверждения возможности внесения материала кольца в заброневое пространство проводилась оптическая съемка момента выхода стальной КС лабораторного заряда диаметром 25 мм из преграды толщиной 40 мм и последующего движения в воздухе сопровождающего ее факела. Процесс регистрировали с помощью скоростного фоторегистратора СФР-2М в режиме покадровой съемки с частотой 187,5 тыс. кадр./с, без подсветки. При сравнении фотографий было обнаружено, что присутствие вкладыша из магниевого сплава приводит к существенно более интенсивному свечению движущегося факела, нежели при проникании КС без вкладыша. При этом, если использовать вкладыш меньших размеров, область свечения факела уменьшается.

В кандидатской диссертации Ю.М. Дильдина приведена большая статистика по частотности загорания дизельного топлива типа «Л» при попадании КЗ в закрытый и заполненный на 3/4 высоты топливом стальной бак размером 600×400×400 мм, размещенный в замкнутом объеме примерно 1,5 м<sup>3</sup>, при использовании КЗ диаметрами 46 и 70 мм с медными и стальными коническими облицовками и дополнительными элементами из химически активных материалов (см. рис. 5). Результаты экспериментов показали, что при использовании КЗ с облицовками без дополнительных элементов частотность зажжения по результатам не менее 10 опытов составила от 0,1 (для медных облицовок) до 0,2 (для стальных облицовок). При использовании внутренних вкладышей (см. рис. 5, а) частотность увеличилась до 0,5 (магниево-алюминиевый сплав) и 0,6 (магниево-литиевый сплав). Применение наружного вкладыша (см. рис. 5, б) дало увеличение частотности до 0,7 (магниево-алюминиевый сплав) и 0,8 (магниево-литиевый сплав). При использовании двухслойных облицовок с наружным слоем из активного материала (см. рис. 5, в) получаем увеличение частотности до 0,9 (магниево-алюминиевого сплава) и 1,0 (магниево-литиевый сплав). При этом четко прослеживалась тенденция к повышению вероятности загорания с увеличением массы заносимого активного материала и степени его химической активности.

В целом проведенные исследования показали, что для увеличения эффективности воспламенения жидкого топлива достаточно внести в броневое замкнутое пространство активный материал в виде распыленных и нагретых до определенной температуры диспергированных частиц и иметь достаточную степень разрушения топливного бака, обеспечивающую образование горючей смеси из частиц топлива и воздуха.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Свирский О.В. Тенденции развития кумулятивных средств поражения БТТ по данным открытых зарубежных источников. *Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук*, 2006, № 3 (48), с. 46–51.
- [2] Орленко Л.П., ред. *Физика взрыва*. В 2 т. Изд. 3-е, испр. Москва, Физматлит, 2004, т. 2, 656 с.
- [3] Бабкин А.В., Велданов В.А., Грязнов Е.Ф., Имховик Н.А., Кобылкин И.Ф., Ладов С.В., Орленко Л.П., Охитин В.Н., Ришняк А.Г., Селиванов В.В., Соловьев В.С. *Боеприпасы*. В 2 т. Т. 1. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016.
- [4] Одинцов В.А., Ладов С.В., Левин Д.П. *Оружие и системы вооружения*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016.
- [5] Ладов С.В., Кобылкин И.Ф. *Использование кумулятивных зарядов во взрывных технологиях*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1996.
- [6] Аттетков А.В., Гнускин А.М., Пырьев В.А., Сагидуллин Г.Г. *Резка металлов взрывом*. Москва, СИПРИА, 2000.
- [7] Курепин А.Е., Власов В.П., Белин В.А., Спорыхин Н.А., Якимович В.Н. Биметаллические облицовки для кумулятивных зарядов с коническими

- выемками. *Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения: Сб. докладов науч. конф. Волжского регионального центра РАРАН*. Саров, ВНИИЭФ, 2000, с. 399–403.
- [8] Имховик Н.А., Селиванов В.В., Симонов А.К., Сергеева А.И., Яшин В.Б. Об исследованиях по разработке за рубежом новых высокоплотных реактивных материалов (High-Density Reactive Materials) и их применению в боеприпасах повышенного могущества действия. *Вооружение и экономика*, 2014, № 1 (26), с. 53–62.
- [9] Имховик Н.А., Свидинский А.В., Смирнов А.С., Яшин В.Б. Об исследованиях, проводимых за рубежом, по созданию новых высокоплотных реактивных материалов для перспективных боеприпасов различного назначения. *Горение и взрыв*, 2017, т. 10, № 1, с. 94–102.
- [10] Васюков В.И., Дильдин Ю.М., Колпаков А.И., Ладов С.В. Оценка разогрева металла кольцевого элемента в результате пластической деформации. *Труды МВТУ (Вопросы физики взрыва и удара)*, 1981, № 358, вып. 3, с. 54–63.
- [11] Дильдин Ю.М., Колпаков А.И., Ладов С.В. Особенности пластической деформации материала кумулятивной облицовки. *Труды МВТУ (Механика импульсных процессов)*, 1983, № 399, с. 35–43.
- [12] Пай В.В., Кузьмин Г.Э. Экспериментальное определение температуры металлической струи. *Физика горения и взрыва*, 1994, т. 30, № 3, с. 92–95.
- [13] Бабкин А.В., Ладов С.В., Маринин В.М., Федоров С.В. Влияние сжимаемости и прочности материала кумулятивных струй на особенности их инерционного растяжения в свободном полете. *Прикладная механика и техническая физика*, 1997, т. 38, № 2, с. 10–18.
- [14] Бабкин А.В., Колпаков В.И., Ладов С.В., Плетнев С.Л., Федоров С.В., Бондаренко П.А. О возможностях «теплового» способа повышения пробития кумулятивных зарядов. *Оборонная техника*, 2000, № 1–2, с. 41–48.
- [15] Бабкин А.В., Бондаренко П.А., Федоров С.В., Андреев С.Г. Предельно-допустимые параметры импульсного теплового воздействия на кольцевые системы с энергетическим материалом. *Оборонная техника*, 2000, № 1–2, с. 35–40.
- [16] Васюков В.И., Дильдин Ю.М., Орленко Л.П. Некоторые особенности воспламенения жидких топлив. *Труды МВТУ (Вопросы физики взрыва и удара)*, 1980, № 340, вып. 2, с. 36–47.

Статья поступила в редакцию 06.12.2017

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Васюков В.И., Дильдин Ю.М., Ладов С.В., Орленко Л.П. Зажигательное действие кумулятивных зарядов по жидкому топливу. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 1. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-1-1725>

**Васюков Владимир Иванович** (1938–2007) — канд. техн. наук. Работал на кафедре «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ в области физики взрыва.

**Дильдин Юрий Михайлович** — канд. техн. наук, ст. науч. сотр. МГТУ им. Н.Э. Баумана, член-корр. РАЕН. Автор более 80 научных работ в области физики взрыва.

**Ладов Сергей Вячеславович** — канд. техн. наук, член-корр. РАЕН, доцент кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 350 научных работ в области физики взрыва. e-mail: [ladov-sv@mail.ru](mailto:ladov-sv@mail.ru)

**Орленко Леонид Петрович** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 300 научных работ в области физики взрыва. e-mail: orlenkolp@mail.ru

## The incendiary effect of shaped charges for liquid fuel

© V.I. Vasyukov, Yu.M. Dildin, S.V. Ladov, L.P. Orlenko

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The article considers the process of ignition and development of liquid fuel combustion when it receives macroscopic sources of ignition. Heated dispersed particles of various metals and alloys can be such sources produced as a result of cumulative jet penetration through durable steel wall of finite thickness, and the fuel tank located in a confined space. The main physical factors determining the incendiary effect during the explosion of shaped charges at various stages of their interaction with the fuel tank are revealed. The mechanism of liquid-fuel ignition when heated dispersed particles from different materials get into it is investigated in detail. The dependence of the delay time of liquid fuel combustion on the temperature of metal particles and their mass for various materials is determined. The influence of the temperature of liquid fuel on the efficiency of its ignition is researched. The constructive solutions for cavity units are proposed, which make it possible to increase the effectiveness of the beyond-armor effect of the shaped charges without reducing their armor penetration capability by increasing the incendiary effect.*

**Keywords:** *shaped charge, cumulative jet, dispersed particle, liquid fuel, incendiary effect, ignition, combustion, temperature, mass*

### REFERENCES

- [1] Svirsky O.V. *Izvestiya Rossiyskoy akademii raketnykh i artilleriyskikh nauk (Proceedings of the Russian Academy of Missile and Artillery Sciences)*, 2006, no. 3 (48), pp. 46–51.
- [2] Orlenko L.P., ed. *Fizika vzryva*. V 2 tomakh. T. 2 [Physics of explosion. In 2 volumes. Vol. 2]. 3<sup>rd</sup> edition. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004, 656 p.
- [3] Babkin A.V., Veldanov V.A., Gryaznov E.F., Imkhovik N.A., Kobylkin I.F., Kolpakov V.I., Ladov S.V., Orlenko L.P., Okhitin V.N., Rishnyak A.G., Selivanov V.V. *Boepripasy*. V 2 tomakh. T. 1 [Ammunition. In 2 volumes. Vol. 1]. Moscow, BMSTU Publ., 2016.
- [4] Odintsov V.A., Ladov S.V., Levin D.P. *Oruzhie i sistemy vooruzheniya* [Weapons and weapons systems]. Moscow, BMSTU Publ., 2016.
- [5] Ladov S.V., Kobylkin I.F. *Ispolzovanie kumulyativnykh zaryadov vo vzryvnykh tekhnologiyakh* [The use of shaped charges in explosive technologies]. Moscow, BMSTU Publ., 1996.
- [6] Attetkov A.V., Gnuskin A.M., Pyryev V.A., Sagidullin G.G. *Rezka metallov vzryvom* [Cutting metals by explosion]. Moscow, SIPRIA Publ., 2000.
- [7] Kurepin A.E., Vlasov V.P., Belin V.A., Sporykhin N.A., Yakimovich V.N. Bimetallicheskie oblitsovki dlya kumulyativnykh zaryadov s konicheskimi vyemkami [Bimetallic liners for shaped charges with conical hollownesses]. *Sbornik dokladov nauchnoy konferentsii Volzhskogo regionalnogo tsentra RARAN: Sovremennye metody proektirovaniya i otrabotki raketno-artilleriyskogo vooruzheniya* [Proceedings of the scientific Conference of Volga regional center of RARAN: Contemporary methods of designing and testing rocket and artillery weapons]. Sarov, VNIIEF Publ., 2000, pp. 399–403.
- [8] Imkhovik N.A., Selivanov V.V., Simonov A.K., Sergeeva A.I., Yashin V.B. *Vooruzhenie i ekonomika — Armament and Economics*, 2014, no. 1 (26), pp. 53–62.

- [9] Imkhovik N.A., Svidinsky A.V., Smirnov A.S., Yashin V.B. *Gorenie i vzryv — Combustion and Explosion*, 2017, vol. 10, no. 1, pp. 94–102.
- [10] Vasyukov V.I., Dildin Yu.M., Kolpakov A.I., Ladov S.V. Otsenka razogreva metalla koltsevogo elementa v rezultate plasticheskoy deformatsii [Estimation of heating the metal of the annular element as a result of plastic deformation]. *Trudy MVTU (Voprosy fiziki vzryva i udara)* [Proceedings of MHTS (Physics of Explosion and Impact)]. Moscow, 1981, no. 358, iss. 3, pp. 54–63.
- [11] Dildin Yu.M., Kolpakov A.I., Ladov S.V. Osobennosti plasticheskoy deformatsii materiala kumulyativnoy oblitsovki [Features of plastic deformation of cumulative liner material]. *Trudy MVTU (Mekhanika impulsnykh protsessov)* [Proceedings of MHTS (Mechanics of impulse processes)]. Moscow, 1983, no. 399, pp. 35–43.
- [12] Pay V.V., Kuzmin G.E. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1994, vol. 30, no. 3, pp. 92–95.
- [13] Babkin A.V., Ladov S.V., Marinin V.M., Fedorov S.V. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika — Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1997, vol. 38, no. 2, pp. 10–18.
- [14] Babkin A.V., Kolpakov V.I., Ladov S.V., Pletnev S.L., Fedorov S.V., Bondarenko P.A. *Oboronnaya tekhnika (Defence Technology)*, 2000, no. 1–2, pp. 41–48.
- [15] Babkin A.V., Bondarenko P.A., Fedorov S.V., Andreev S.G. *Oboronnaya tekhnika (Defence Technology)*, 2000, no. 1–2, pp. 35–40.
- [16] Vasyukov V.I., Dildin Yu.M., Orlenko L.P. Nekotorye osobennosti vosplamneniya zhidkikh topliv [Some characteristics of the ignition of liquid fuels]. *Trudy MVTU (Voprosy fiziki vzryva i udara)* [Proceedings of MHTS (Physics of Explosion and Impact)]. 1980, no. 340, iss. 2, pp. 36–47.

**Vasyukov V.I.** (1938–2007) Cand. Sc. (Eng.), worked at the Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 100 research publications in the field of physics of explosion.

**Dildin Yu.M.**, Cand. Sc. (Eng.), Senior Research Scientist, Bauman Moscow State Technical University, corresponding member RANS. Author of over 80 research papers in the field of physics of the explosion.

**Ladov S.V.** Cand. Sc. (Eng.), corresponding member RANS, Assoc. Professor, Department of High-Precision Airborne Devices, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 350 research papers in the field of physics of the explosion.  
e-mail: ladov-sv@mail.ru

**Orlenko L.P.**, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of High-Precision Airborne Devices, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 300 research papers in the field of physics of the explosion. e-mail: orlenkolp@mail.ru