

Оценка работоспособности высокоплотных взрывчатых веществ с использованием уравнения состояния JWL

© С.Г. Андреев, М.А. Шестаков

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

В рамках представления о работоспособности взрывчатых веществ как способности продуктов их разложения производить работу при изэнтропическом расширении от начального состояния, в котором находятся продукты мгновенного взрыва, проведено уточнение расчетных оценок этого свойства. При этом учтено влияние холодных составляющих давления и внутренней энергии рабочего тела, совершающего эту работу. Приведены результаты расчетов с использованием уравнения состояния продуктов взрыва Джонса — Уилкинса — Ли (JWL) для низкоплотных и высокоплотных зарядов ТЭНа с некоторыми способами «закачки» энергии в продукты взрыва, дополнительной по отношению к «тепловыделению» в детонационном фронте с параметрами Чепмена — Жуге.

Ключевые слова: взрывчатое вещество, теплота взрыва, работоспособность, коэффициент полезного действия, мгновенный взрыв.

Введение. Изучение механизмов взрывных процессов, методов повышения эффективности использования энергии взрывчатых веществ (ВВ) и функционирования устройств с этими веществами до настоящего времени являются предметом научных исследований [1–6].

Одним из основных факторов воздействия функционирующих взрывных устройств на окружающую среду является фугасное действие. Свойство зарядов ВВ этих устройств оказывать такое действие называют фугасностью, а также работоспособностью. Характеристики этого свойства и факторы, на него влияющие, до сих пор являются предметом изучения в области промышленных взрывных работ и военного применения взрыва, а в последнее время — все чаще в работах антитеррористической и антикриминалистической направленности. Научные основы анализа фугасности ВВ и способов ее улучшения, заложенные И.М. Чельцовым, развивались по мере уточнения представлений о газодинамических процессах при взрыве, уточнения описаний газодинамических свойств конденсированных и газообразных веществ. В настоящей работе сделана попытка дополнить подход к оценке работоспособности ВВ в рамках простой модели Чельцова использованием достаточно распространенной разновидности уравнения состояния продуктов детонации в форме Ми — Грюнайзена — уравнения JWL (Джонса — Уилкинса — Ли).

Модель И.М. Чельцова и ее развитие. При анализе работы взрыва в свинцовой бомбе, подобной той, которую разработал Абель, И.М. Чельцов предложил [7] выражение для работы a , которую может совершить взрыв 1 кг ВВ. Запишем это выражение в виде:

$$a = \Pi \left\{ 1 - \left(\frac{v_1 - \alpha}{v - \alpha} \right)^{\gamma-1} \right\}, \quad (1)$$

где a — удельная работа взрыва, или работоспособность; Π — потенциал ВВ (работа, которую мог бы совершить 1 кг продуктов взрыва при адиабатическом расширении и охлаждении при этом до 0 К); v_1 — удельный объем продуктов взрыва (ПВ) в начале их расширения, приводящего к совершению работы; v — удельный объем ПВ, при расширении до которого совершается удельная работа a ; α — коволюм ПВ; γ — отношение удельных теплоемкостей ПВ при постоянных давлении и объеме C_p/C_v .

В экспериментах Чельцова плотность заряжения Δ (отношение массы ВВ к объему полости в свинцовой бомбе) не превышала 1 г/см^3 , а при их анализе значение v_1 полагалось равным $1/\Delta$.

В работе [8] А.Ф. Беляев выражает a через давление p_1 (давление ПВ, при котором начинается расширение полости в свинцовой бомбе, сопровождаемое совершением работы) и давление p , при котором ПВ заканчивается увеличение их удельного объема и, соответственно, совершение ими работы:

$$a = \Pi \left\{ 1 - \left(\frac{p}{p_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right\}. \quad (2)$$

В выражениях (1) и (2) $\Pi = RT_1/(\gamma-1)$, где R — удельная газовая постоянная; T_1 — начальная температура взрыва [7, 8]. Заметим, что потенциал Π можно выразить и через удельную теплоту взрыва при постоянном объеме, отнесенную к абсолютному нулю. Числовое значение вторых сомножителей в (1) и (2) после Π является термодинамическим коэффициентом полезного действия взрыва (КПД) η .

Приведенные выражения, как известно, можно получить исходя из упрощенного представления о том, что длительность процесса совершения работы многократно превышает время превращения ВВ в ПВ с выделением теплоты взрыва и перехода их в состояние с относительно однородным распределением давления, начиная с которого они претерпевают значительное расширение и совершают при этом работу. До перехода в это состояние, характеризуемое параметрами p_1 и v_1 трансформация кинетической энергии ПВ в их внутрен-

ную потенциальную не должна сопровождаться совершением внешней работы. Такое превращение ВВ с переходом в равновесное состояние названо мгновенным взрывом [7, 8]. При этом полагается, что последующее расширение ПВ, сопровождаемое совершением работы после мгновенного взрыва, происходит адиабатически (изоэнтродически):

$$a = \int_{v_1}^v p_S(v) dv.$$

При выводе формулы для изоэнтропы $p_S(v) = p_1 [(v_1 - \alpha)/(v - \alpha)]^\gamma$ и затем выражений (1) и (2) используется описание ПВ уравнением состояния (УРС):

$$e = p(v - \alpha)/(\gamma - 1) - C_V T_0, \quad (3)$$

где $C_V = \text{const}$ — удельная теплоемкость ПВ (полагаемая среднему ее значению в рассматриваемом диапазоне температур).

При таком УРС удельная энергия заряда ВВ в начальном его нормальном состоянии принимается равной удельной теплоте взрыва при постоянном объеме Q_V , определяемой стандартным образом при охлаждении ПД практически до $T_0 = 298$ К. При выводе уравнения (3) полагается, что внутренняя энергия ПВ имеет только тепловое происхождение: $de = C_V dT$.

Давление мгновенного взрыва p_1 , как известно, можно выразить через давление на поверхности Чепмена — Жуге p_{C-J} . Использование в расчетах УРС (3) с постоянным значением коволюма позволяет с приемлемой погрешностью, не превышающей 5...15 %, воспроизводить экспериментальные значения скорости детонации D и давления p_{C-J} для зарядов ВВ, начальная плотность ρ_0 которых не превышает $0,5$ г/см³. Приблизительно те же расхождения расчетных и экспериментальных значений характеристик детонации D и p_{C-J} при таких плотностях зарядов получаются, если использовать УРС ПВ с нулевым значением коволюма и значением показателя изоэнтропы k , сравнительно мало отличающимся от значения γ и зависящим только от ρ_0 . Так, для низкоплотных зарядов на основе гексогена можно принять $k \approx 1,33 + 1 \cdot 10^{-3} \rho_0$ [9, 10] и тогда вычислять значения p_{C-J} и p_1 :

$$p_{C-J} = \rho_0 D^2 / (k + 1); \quad p_1 = p_{C-J} / 2. \quad (4)$$

При плотностях зарядов около 1 г/см^3 удовлетворительное воспроизведение экспериментальных значений p_{C-J} с помощью расчетов с использованием УРС (3) при нулевом коволюме происходит при значениях k , уже существенно отличающихся от γ [4]. Такое увеличение значения показателя изоэнтропы $k = -(\partial \ln p / \partial \ln v)_S$ в точке Чепмена — Жуге относительно постоянного значения γ объясняется в случае плотных ВВ наличием у ПВ наряду с давлением теплового происхождения еще и существенно холодной упругой составляющей давления в момент их образования. По мере приближения плотности заряда к максимально возможному значению (ТМД) для рассматриваемого состава величина k (на поверхности Чепмена — Жуге), как известно, приобретает значения, близкие к трем. В процессе расширения ПВ и опережающего падения холодной составляющей давления значение k уменьшается (в пределе до значения γ) [11, 12].

А.Ф. Беляев [8] предложил простой приближенный способ расчета работоспособности по формуле (2) с использованием показателя изоэнтропы, равного $\gamma \cong 1,3$, и начального давления, равного $p_1 = p_{C-J} = \rho_0 D^2 / (k+1)$ или $p_1 = p_{C-J} / 2$ (даже при значениях k , которые существенно больше γ).

Более точные и, главное, физически более корректные результаты получаются, если значительное изоэнтропическое расширение ПВ представляется в виде двухстадийного процесса: сначала расширением с показателем изоэнтропы, равным k , а затем, начиная с давления $p_{k\gamma}$, расширением с показателем изоэнтропы, равным γ [13]. Давление, при котором «происходит сопряжение» двух изоэнтроп, для представителей типичных распространенных ВВ лежит в диапазоне $100 \dots 170 \text{ МПа}$ [14]. При этом удельные объемы ПВ равны ориентировочно $3 \dots 2,5 \text{ см}^3/\text{г}$. По-видимому, результаты расчета работы при расширении ПВ до давлений, близких к указанному диапазону, будут достаточно неопределенными.

Выражения (1), (2) и им подобные часто используется при анализе влияния на КПД взрывных процессов зарядов ВВ различных практически важных факторов. УРС, в котором $\alpha = \text{const}$, положенное в обоснование (1), ограничивает возможности использования этого выражения для исследования количественного влияния на КПД таких сильно действующих факторов, как параметры состояния ПВ в момент начала и конца совершения ими работы. Такое УРС позволяет воспроизводить значения параметров детонационного фронта в рамках модели Чепмена — Жуге, а стало быть, и параметры состояния продуктов мгновенного взрыва, которые, расширяясь, будут совершать работу лишь для зарядов плотностью не более $0,5 \text{ г/см}^3$.

Вероятно, наиболее точную оценку идеальной работоспособности высокоплотного ВВ как способности первоначально покоящихся продуктов мгновенного его взрыва совершить работу при изоэнтروпическом расширении в различные среды (особенно в высокоплотные и сравнительно прочные среды) можно получить, если при описании продуктов мгновенного взрыва использовать УРС JWЛ. При этом удается дать оценку, по крайней мере на качественном уровне рассуждений, возможности некоторых способов повышения работоспособности ВВ в широком диапазоне изменения параметров начального и конечного состояний ПВ.

Использование уравнения состояния JWЛ при оценке работоспособности ВВ. Параметры состояния продуктов реакции на детонационном фронте (в точке Чепмена — Жуге) и продуктов мгновенного взрыва, а также изоэнтروпы для ПВ высокоплотных энергетических материалов можно достаточно точно рассчитать, используя УРСы типа Ми — Грюнайзена, в которых давление и удельная внутренняя энергия e представляются в виде сумм холодных (индекс «х») и тепловых (индекс «т») составляющих

$$p = p_x(v) + p_t(v); \quad e = e_x(v) + e_t,$$

которые связаны соотношениями

$$p_x = -de_x/dv; \quad p_t = \Gamma e_t/v; \quad \Gamma \approx \gamma - 1 = \text{const.}$$

С учетом наличия двух составляющих у давления и удельной внутренней энергии второй закон термодинамики, необходимый при выводе выражения для изоэнтروпы, запишем в виде:

$$d(e_x + e_t) + (p_x + p_t)dv = TdS \equiv 0.$$

Тогда, принимая во внимание выражения для p_x и p_t , получаем известные выражения для изоэнтропического процесса

$$de_t = -p_t dv; \quad e_t = p_t v / \Gamma,$$

из которых следует формула для тепловой составляющей давления при изоэнтропическом процессе:

$$p_t v^{\Gamma+1} = \text{const.}$$

При мгновенном взрыве начальная точка, определяющая положение изоэнтропы, имеет координаты: $v = v_1$, $p = p_1 = p(v_1) = p_x(v_1) + p_t(v_1)$. Поэтому уравнение изоэнтропы для продуктов мгновенного взрыва при начальном удельном объеме ПВ v_1 запишем в виде

$$p_S(v) = p_x(v) + \{p(v_1) - p_x(v_1)\}(v_1/v)^{\Gamma+1}. \quad (5)$$

Уравнение JWL получают, используя для холодного давления зависимость $p_x = p_x(v)$, предложенную Murnaghan [5]:

$$p_x(v) = A \exp(-R_1 v/v_{0*}) + B \exp(-R_2 v/v_{0*}),$$

и обозначая e_0 уровень энергии исходного энергетического материала до превращения его в продуктах детонации. При этом принимается, что $e_x = 0$ при $p_x = 0$ и $v = \infty$, а $e_T = 0$ при $T = 0$. Величина e_0 связана с удельной теплотой взрыва Q_V , определяемой в калориметрической бомбе (КБ) при охлаждении ПД, имеющих удельный объем v_{KB} , до температуры, практически равной $T = T_0 = 298$ К, соотношением $e_0 = e_x(v_{KB}) + Q_V + C_V T_0$ [15].

Запишем УРС JWL в более удобном для нас виде:

$$p = A \left(1 - \frac{v_{0*} \Gamma}{R_1 v}\right) \exp\left(-\frac{R_1 v}{v_{0*}}\right) + B \left(1 - \frac{v_{0*} \Gamma}{R_2 v}\right) \exp\left(-\frac{R_2 v}{v_{0*}}\right) + \frac{\Gamma}{v} e, \quad (6)$$

где $v_{0*} = 1/\rho_{0*}$ — начальный удельный объем заряда ВВ (плотностью ρ_{0*} с давлением детонации в точке Чепмена — Жуге p_{C-J}), используемого для нахождения параметров УРС JWL: A, B, R_1, R_2 .

Графики зависимостей $p_x = p_x(v)$ для ТЭНа, построенные по значениям A, B, R_1, R_2 , которые получены для четырех значений ρ_{0*} (0,8; 1,26; 1,50 и 1,77 г/см³), в рассматриваемом диапазоне значений удельных объемов v ($0,5 \cdot 10^{-4}$ м³/кг ... ∞) различаются по давлению не более чем на 1 % при $\rho_{0*} = 1,50 \dots 1,77$ г/см³ и на 6...7 % при $\rho_{0*} = 1,26 \dots 1,50$ г/см³. На основании такого сопоставления введем упрощающее предположение о возможности использования зависимости $p_x = p_x(v)$, «извлеченной» из экспериментов с зарядами начальной плотностью $\rho_{0*} = 1,50$ г/см³, как универсальной при описании ПВ зарядов «повышенной» плотности (больше или равной 1,50 г/см³) того же состава.

Подстановкой в (6) $v = v_1$ и $e = e_1 = e_0 = Q_V + C_V T_0$ получаем давления мгновенного взрыва $p(v_1) = p_1$, значение которого ввиду наличия холодной составляющей давления не равно половине от значения p_{C-J} , как это наблюдается при УРС $e = pv/(k+1)$, $k = \text{const}$.

Приведенные соотношения позволяют находить работу продуктов мгновенного взрыва и, соответственно, термодинамический КПД такого взрыва с дополнительной (по отношению к тепловыделению от основного детонационного разложения ВВ Q_V) «закачанной»

энергии Δe . При этом, принимая $v = v_1$ и приравнявая e в (6) значению начальной удельной энергии ПВ в момент начала их расширения, сопровождаемого совершением работы, т. е. $e_1 = e_0 + \Delta e$, получаем давление мгновенного взрыва с «дополнительно» закачанной энергией:

$$p(v_1) = p_1^{\Delta e}$$

и соответственно изоэнтропу ПВ $p_S^{\Delta e}(v)$, «проходящую» через точку с координатами $p = p(v_1) = p_1^{\Delta e}$; $v = v_1$:

$$p_S^{\Delta e} = p_x(v) + [p_1^{\Delta e}(v_1) - p_x(v_1)](v_1/v)^{\Gamma+1}. \quad (7)$$

Выражение для работы $a^{\Delta e}$, совершаемой 1 кг продуктов мгновенного взрыва с дополнительно закачанной в них энергией Δe и определяемой интегрированием (7)

$$a^{\Delta e} = \int_{v_1}^v p_S^{\Delta e}(v) dv,$$

можно привести к виду

$$a^{\Delta e} = \Pi_{\Delta e} (\eta_{\tau} + \eta_x), \quad (8)$$

где $\Pi_{\Delta e} = Q_V + C_V T_0 + \Delta e = e_0 + \Delta e$; $\eta_{\tau} = [1 - (v_1/v)^{\Gamma}] \Delta \eta_{\tau}$,

$$\Delta \eta_{\tau} = 1 - [(Av_{0^*}/R_1) \exp(-R_1 v_1/v_{0^*}) + (Bv_{0^*}/R_2) \exp(-R_2 v_1/v_{0^*})] / \Pi_{\Delta e};$$

$$\eta_x = \eta_{xAR_1} + \eta_{xBR_2},$$

$$\eta_{xAR_1} = (Av_{0^*}/R_1) \exp(-R_1 v_1/v_{0^*}) \{1 - \exp[-(R_1 v_1/v_{0^*})(v/v_1 - 1)]\} / \Pi_{\Delta e},$$

$$\eta_{xBR_2} = (Bv_{0^*}/R_2) \exp(-R_2 v_1/v_{0^*}) \{1 - \exp[-(R_2 v_1/v_{0^*})(v/v_1 - 1)]\} / \Pi_{\Delta e}.$$

В работе рассмотрены несколько способов «закачки» дополнительной энергии Δe .

1. В случае $\Delta e = \Delta e_{\Delta Q}$ полагается, что $\Delta e = \Delta e_{\Delta Q}$ обеспечивается очень быстрым, практически мгновенным подводом теплоты ΔQ в изохорном процессе к продуктам мгновенного взрыва, образовавшимся при химической реакции с удельной теплотой взрыва Q_V . Такой подогрев можно рассматривать в первом приближении, в частности, как результат очень быстрого протекания вторичных реакций (например, сгорания алюминиевой добавки) с тепловыделением ΔQ .

2. При $\Delta e = \Delta e_{EXP}^C$ на стадии, предваряющей протекание основной детонационной химической реакции с теплотой взрыва Q_V , Δe_{EXP}^C расходуется на изэнтропическое сжатие исходного ВВ (индекс EXP) до удельного объема $v_1 = v_{EXP}^C$, при котором и происходит мгновенный взрыв. При плотности заряда, равной $1/v_{EXP}^C$, происходит его мгновенный взрыв с тепловыделением Q_V (или $Q_V + \Delta Q$). Соотношение между $v_1 = v_{EXP}^C$ и Δe_{EXP}^C можно установить в первом приближении, предположив совпадение в координатах $p-v$ уравнений изэнтропы и ударной адиабаты непрореагировавшего ВВ [10]:

$$\Delta e_{EXP}^C = a^2 \left\{ \ln \left[1 - b \left(1 - v_{EXP}^C / v_0 \right) \right] + \frac{1}{1 - b \left(1 - v_{EXP}^C / v_0 \right)} - 1 \right\},$$

где a и b — коэффициенты ударной адиабаты в форме связи волновой D и массовой u скоростей, $D = a + bu$.

3. При $\Delta e = \Delta e_{п.р}^C$ расходуется $\Delta e_{п.р}^C$ на изэнтропическое сжатие до удельного объема $v_1 = v_{п.р}^C$ газообразных продуктов мгновенного взрыва (продуктов разложения — индекс «п.р»), образовавшихся в результате химической реакции с удельной теплотой взрыва Q_V и имеющих при этом удельный объем $v_{п.р}$. Этот удельный объем ($v_1 = v_{п.р}^C$) и величина $\Delta e = \Delta e_{п.р}^C$ связаны соотношением:

$$\Delta e_{п.р}^C = - \int_{v_{п.р}}^{v_{п.р}^C} p_S(v) dv, \quad p_S(v) = p_x(v) + [p(v_{п.р}) - p_x(v_{п.р})] \left(\frac{v_{п.р}}{v_{п.р}^C} \right)^{\Gamma+1}.$$

Рассмотрим случай, когда после сжатия продуктов реакции с удельным тепловыделением Q_V до удельного объема $v_1 = v_{п.р}^C$ (это «первая стадия» мгновенного взрыва) может производиться дополнительная накачка энергией ΔQ в изохорических условиях до того момента, когда они начнут существенно расширяться и производить работу. При этом энергию ПВ в момент начала их расширения, сопровождаемого совершением работы, обозначим как $e_1 = (e_0 + \Delta e_{п.р}^C)_{1st} + \Delta e_{\Delta Q}$.

4. В случае $\Delta e = \Delta e_{п.р}^{C*}$ — вспомогательном варианте дополнительного подвода энергии к продуктам взрыва — полагаем, что $\Delta e_{п.р}^{C*}$ расходуется на изэнтропическое сжатие до удельного объема $v_1 = v_{п.р}^{C*}$ газообразных продуктов мгновенного взрыва, образовавшихся в результате химической реакции с полным удельным тепло-

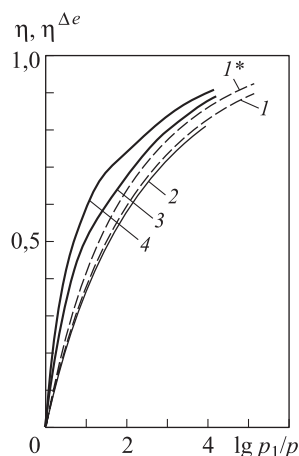
выделением $Q_V + \Delta Q$. Выражение для связи удельного объема $v_1 = v_{п.р}^C$ и величины $\Delta e = \Delta e_{п.р}^C$ получается из приведенной выше формулы подстановкой вместо $p_{п.р}$ и $v_{п.р}$ начальных давления и удельного объема продуктов разложения, образовавшихся на «первой стадии» мгновенного взрыва с суммарным тепловыделением $Q_V + \Delta Q$.

Обсуждение результатов. В выражении (8) в фигурных скобках приведен термодинамический КПД взрыва в общем случае с дополнительной «закачкой» энергии Δe . Эту величину обозначим $\eta^{\Delta e}$ (в частном случае при $\Delta e = 0$ величина $\eta^{\Delta e}$ равна η). В фигурных скобках первое слагаемое η_T является составляющей КПД, обусловленной работой тепловой составляющей давления; второе слагаемое η_X — составляющей КПД, обусловленной работой холодной составляющей давления.

Далее на рисунках приведены результаты расчетов термодинамического КПД взрывов зарядов с характеристиками ТЭНа плотностью ρ_0 , равной $1,50 \text{ г/см}^3$ и $0,88 \text{ г/см}^3$. При этом, согласно данным о параметрах УРС JWL [16], для ТЭНа принимались значения $\Gamma = 0,28$ и $\gamma = 1,28$ в (1) и (2), если заряд высокоплотный, и $\Gamma = 0,24$ и $\gamma = 1,24$ в (1) и (2) для «низкоплотного» заряда. В соответствии с данным УРС из [16] принято одно и то же значение $Q_V + C_V T_0 \approx 5,71 \text{ МДж/кг}$ при ρ_0 , равных $1,50 \text{ г/см}^3$ и $0,88 \text{ г/см}^3$.

Как видно на рис. 1, при «низкоплотном» заряде учет холодных составляющих давления и внутренней энергии практически не приводит к уточнению зависимости η от $\lg(p_1/p)$, предложенной А.Ф. Беляевым [8]. При этом уточнение УРС необходимо только для вычисления абсолютных, но не относительных значений давлений.

Рис. 1. Изменение термодинамического КПД в зависимости от отношения давления мгновенного взрыва к конечному давлению расширенных ПВ: I — расчет по (2) для $\rho_0 = 0,88 \text{ г/см}^3$ и $\rho_0 = 1,5 \text{ г/см}^3$ при $\gamma = 1,24$; I^* — расчет по (2) для $\rho_0 = 0,88 \text{ г/см}^3$ и $\rho_0 = 1,5 \text{ г/см}^3$ при $\gamma = 1,28$; 2 — $\rho_0 = 0,88 \text{ г/см}^3$, $e_1 = e_0 = 5,7 \text{ МДж/кг}$, УРС — JWL; 3 — $\rho_0 = 1,5 \text{ г/см}^3$, $e_1 = e_0 = 5,7 \text{ МДж/кг}$, УРС — JWL; 4 — $\rho_0 = 1,5 \text{ г/см}^3$, $e_1 = e_0 + \Delta e_{\text{EXP}}^C$, $\Delta e_{\text{EXP}}^C = 0,2 \text{ МДж/кг}$, УРС — JWL



При равных значениях отношений начального и конечных давлений (p_1/p) заряды повышенной плотности, как это видно из описания ПВ уточненным УРС, обладают несколько большими значениями КПД, чем «низкоплотные». При этом «закачка» в продукты мгновенного взрыва дополнительной энергии также изменяет КПД, как это видно на примере кривой 4.

При анализе влияния на КПД факторов, рассматриваемых в данной работе, удобнее сравнивать зависимости $\eta^{\Delta e}$ или η от отношения удельного объема ПВ к удельному объему заряда ВВ ($v/v_0 = \nu\rho_0$).

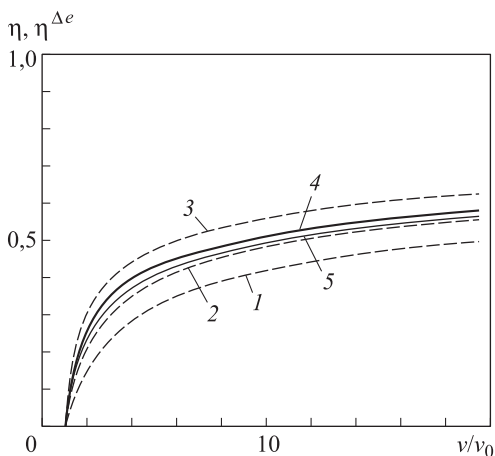


Рис. 2. Зависимости КПД взрыва зарядов плотностью $\rho_0 = 0,88 \text{ г/см}^3$ от относительной степени расширения ПВ:

1 — $\alpha = 0$; 2 — $\alpha = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$; 3 — $\alpha = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$; 4 — УРС JWL, $e_1 = e_0$; 5 — УРС JWL, $e_1 = e_0 + \Delta e_{\Delta Q}$, $\Delta e_{\Delta Q} = 0,2 Q_V = 1,14 \text{ МДж/кг}$

На рис. 2 показаны результаты расчета для зарядов плотностью $0,88 \text{ г/см}^3$ по формуле (1) при $\gamma = 1,24$ и различных значениях коволюма (штриховые линии), с использованием УРС JWL (сплошные линии). Из приведенных результатов следует, что для удовлетворительного совпадения зависимостей $\eta = \eta(v/v_0)$, получаемых при описании продуктов взрыва УРС JWL и УРС с постоянным коволюмом, необходимо использовать значения последнего, существенно отличающиеся от тех, которые «извлекаются» из данных экспериментов со сжиганием ВВ в манометрических бомбах. Наличие холодных составляющих давления и удельной внутренней энергии ПВ приводит к тому, что дополнительное повышение их внутренней энергии к моменту начала совершения работы, не сопровождаемое уменьшением начального удельного объема v_1 , снижает КПД взрыва, хотя и незначительно, как это видно из взаимного положения кривых 4 и 5.

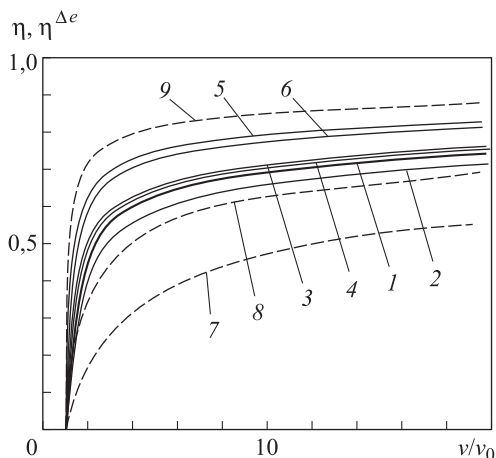


Рис. 3. Зависимости КПД взрыва зарядов плотностью $\rho_0 = 1,50 \text{ г/см}^3$ от относительной степени расширения ПВ:

1 — $v_1 = 1/\rho_0$, $e_1 = e_0$; 2 — $v_1 = 1/\rho_0$, $e_1 = e_0 + \Delta e_{\Delta Q}$, $\Delta e_{\Delta Q} = 1,14 \text{ МДж/кг}$; 3 — $v_1 = v_{\text{п.р}}^C < 1/\rho_0$, $e_1 = (e_0 + \Delta e_{\text{п.р}}^C)_{\text{IST}} + \Delta e_{\Delta Q}$; $\Delta e_{\text{п.р}}^C = 1,14 \text{ МДж/кг}$; 4 — $v_1 = v_{\text{п.р}}^C < 1/\rho_0$, $e_1 = (e_0 + \Delta e_{\Delta Q})_{\text{IST}} + \Delta e_{\text{п.р}}^C$; $\Delta e_{\text{п.р}}^C = 1,14 \text{ МДж/кг}$; 5 — $v_1 = v_{\text{EXP}}^C$, $e_1 = (\Delta e_{\text{EXP}}^C)_{\text{IST}} + e_0$, $\Delta e_{\text{EXP}}^C = 1,14 \text{ МДж/кг}$; 6 — $v_1 = v_{\text{EXP}}^C$, $e_1 = (\Delta e_{\text{EXP}}^C)_{\text{IST}} + e_0$, $\Delta e_{\text{EXP}}^C = 0,45 \text{ МДж/кг}$, $v_{\text{EXP}}^C = v_{\text{PD}}^C = 0,57 \text{ см}^3/\text{г}$; 7 — $\alpha = 0$; 8 — $\alpha = 0,5 \text{ см}^3/\text{г}$; 9 — $\alpha = 0,66 \text{ см}^3/\text{г}$

На рис. 3 показаны результаты расчета для зарядов плотностью $1,50 \text{ г/см}^3$: сплошные линии получены с использованием УРС JWL (кривые 1–6), а штриховые построены с использованием формулы (1) при различных значениях коволюма. При этом в отличие от аналогичных кривых на рис. 2 использовано значение γ , равное 1,28. При построении кривых 2–5 приняты значения дополнительно «закачиваемых» энергий $\Delta e = \Delta e_{\Delta Q} = \Delta e_{\text{п.р}}^C = \Delta e_{\text{EXP}}^C = 0,2Q_V = 1,14 \text{ МДж/кг}$. При построении кривой 6 использовано значение $\Delta e = \Delta e_{\text{EXP}}^{C*} = 0,45 \text{ МДж/кг}$.

Взаимное положение кривых 1 и 2 можно интерпретировать как снижение КПД при увеличении работы взрыва за счет нагревания в изохорических условиях продуктов основного детонационного разложения. Такую «закачку» дополнительной энергии в ПВ можно было бы рассматривать в первом приближении как следствие протекания вторичных реакций с выделением теплоты $\Delta e_{\Delta Q}$ (например, сгорания добавок алюминия), если пренебречь влиянием изменения химического состава реагирующих ПВ на холодные составляющие давления и внутренней энергии.

Взаимное положение кривых 2 и 3 указывает на то, что снижение КПД взрыва при наличии вторичных реакций с дополнительным тепловыделением $\Delta e_{\Delta Q}$ можно компенсировать, если «на первой ста-

дии мгновенного взрыва» (индекс 1ST), т. е. до момента завершения реакций с дополнительным тепловыделением, реализовать сжатие продуктов, образовавшихся при основной детонационной реакции с удельной теплотой взрыва Q_V .

Если вторичные реакции с дополнительным тепловыделением $\Delta e_{\Delta Q}$ происходят так быстро, что не успевают завершиться сжатие продуктов, образовавшихся при основной детонационной реакции с удельной теплотой взрыва Q_V , то дополнительное тепловыделение будет сопровождаться снижением КПД взрыва (как видно на рис. 3 из взаимного положения кривых 4 и 3). Это дает основание сделать следующее предположение. Если процессу совершения основной работы расширяющимися ПВ предшествует отражение детонационного фронта от среды с высоким динамическим импедансом, то чрезмерно повышенная реакционная способность компонентов образовавшихся продуктов детонации, приводящих к вторичным реакциям с дополнительным тепловыделением, может снижать эффект повышения работоспособности. Однако при отсутствии влияния вторичных реакций на зависимость холодного давления ПВ от их удельного объема этот эффект очень слабо выражен.

Взаимное положение кривых 5 и 2 показывает, что при расходовании дополнительно «закачиваемой» энергии в одном и том же количестве ($0,2Q_V$) не на нагревание в изохорных условиях уже образовавшихся ПВ (кривая 2), а на сжатие еще не взорвавшегося ВВ происходит повышение КПД взрыва, даже по сравнению с КПД взрыва заряда с минимальным потенциалом, без каких-либо дополнительных «закачек» энергии (кривая 1). Если ВВ перед взрывом сжать несколько слабее (до того же удельного объема, как у сжатых ПВ $v_{\text{EXP}}^C = v_{\text{н.р}}^C = 0,57 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$), затратив на это количество энергии $\Delta e_{\text{EXP}}^C = 0,45 \text{ МДж/кг}$ вместо $0,2Q = 1,14 \text{ МДж/кг}$, то эффект повышения КПД уменьшится незначительно (кривая 6).

Положение кривых 7–9 указывает на то, что использование уравнения (1), в котором не учитываются зависимости холодного давления от удельного объема, уже не позволяет получить определенных заключений количественного характера о влиянии степени расширения ПВ на КПД взрыва.

Заключение. Уравнение изоэнтропы продуктов мгновенного взрыва, полученное в настоящей работе с использованием уравнения состояния JWL, позволяет более детально и в более широком диапазоне степеней расширения продуктов детонации анализировать влияние различных факторов на работоспособность и термодинамический КПД зарядов ВВ, особенно высокоплотных. На простейших примерах в работе показана возможность использования этого УРС при

анализе влияния на термодинамический КПД некоторых способов дополнительного повышения энергосодержания продуктов взрыва заряда к моменту начала совершения ими работы. Модель процесса совершения работы при взрыве заряда ВВ, предложенная И.М. Чельцовым и дополненная УРС продуктов взрыва JWЛ, может найти применение, например, при анализе функционирования ВВ в качестве компонента взрывчатой смеси или в качестве материала блоков макроструктурированного заряда, которые окружены высокобризантным матричным компонентом, ведущим распространение детонационного процесса. Предпочтительными способами повышения энергосодержания ВВ и их работоспособности (для улучшения термодинамического КПД) являются способы, связанные со сжатием исходного вещества.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Махов М.Н. Энергосодержание смесей CL-20 с алюминием. Фролов С.М., ред. *Горение и взрыв*. Москва, Торус пресс, 2013, вып. 6, с. 293–296.
- [2] Охитин В.Н, Меньшаков С.С. Влияние точки инициирования на параметры взрыва цилиндрического заряда на жесткой поверхности. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 1. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/blasting/561.html> (дата обращения 30.05.2015).
- [3] Куликов В.Н., Осавчук А.Н., Имховик Р.А., Одинцов В.А. Детонационные характеристики и метательно-дробящее действие многокомпонентных взрывчатых составов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 1. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/blasting/564.html> (дата обращения 30.05.2015).
- [4] Яшин В.Б., Алексеев В.В., Ходырев С.П., Малкин А.В., Имховик А.Н., Селиванов В.В., Симонов А.К. Параметры взрыва зарядов тротила, содержащих блоки из высокоплотных металлофторопластовых композиций. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 1. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/blasting/566.html> (дата обращения 30.05.2015).
- [5] Андреев С.Г., Бойко М.М., Клименко В.Ю. Возможность компьютерного моделирования функционирования снарядоформирующих зарядов с минимизированными взрывчатыми веществами при разработке прототипов боеприпасов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 1. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/blasting/568.html> (дата обращения 30.05.2015).
- [6] Левин Д.П., Селиванов В.В. Роль и место оружия нелетального действия в современных конфликтах. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 1. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/blasting/576.html> (дата обращения 30.05.2015).
- [7] Чельцов И.М. Взрывчатые вещества. *Энциклопедический словарь*. Ф.А. Брокгауз и И.А. Ефрон. Т. 11. Москва, Терра, 1991. (Репринтное воспроизведение издания Ф.А. Брокгауз и И.А. Ефрон, Т. 11, год издания тома 1890).
- [8] Беляев А.Ф. *Горение, детонация и работа взрыва конденсированных систем*. Москва, Наука, 1968, 255 с.
- [9] Соловьев В.С., Андреев С.Г., Левантовский А.В, Шамшев К.Н. Оптические и рентгенографические исследования детонационных свойств низкоплотных ВВ на основе гексогена. *Горение и взрыв. Материалы Третьего*

- Всесоюзного симпозиума по горению и взрыву, Ленинград, 1972.* Москва, Наука, 1972, с. 451–454.
- [10] Андреев С.Г., Бойко М.М., Селиванов В.В. *Экспериментальные методы физики взрыва и удара.* Селиванов В.В., ред. Москва, ФИЗМАТЛИТ, 2013, 752 с.
- [11] Савров С.Д., Трофимов В.Ф., Шведов К.К.М. *Детонационные волны в конденсированных средах.* Москва, Наука, 1970, 164 с.
- [12] Urtiew P.A., Hauss V. Parametric Study of the Dynamic JWL-EOS for Detonation Products. *Физика горения и взрыва*, 1991, № 4, с. 126–136.
- [13] Кукиб Б.Н., Панкова Е.Н., Афанасенков А.Н. и др. Расчетный экспресс-метод предварительной оценки энергетических характеристик, параметров детонации, относительной работоспособности и экономической эффективности промышленных ВВ. *Методы испытаний низкочувствительных ВВ.* Черноголовка, ОИХФ АН СССР, 1991, с. 90–108.
- [14] Андреев С.Г., Бабкин А.В., Баум Ф.А. и др. *Физика взрыва. Т. 1.* Орленко Л.П., ред. Москва, ФИЗМАТЛИТ, 2002, 415 с.
- [15] Андреев С.Г. Приближенное соотношение между давлением и массовой скоростью вблизи ударного фронта при установившейся детонации *Ударные волны в конденсированных средах. Международная конференция. Киев, Украина, 16–21 сентября 2012 г.* Киев, Интер-пресс ЛТД, 2012, с. 47–54.
- [16] Dobratz V.M. *LLNL explosives handbook — properties of chemical explosives and explosive stimulants*, UCRL — 52997. Livermore, (CA), 1981.

Статья поступила в редакцию 02.07.2015

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Андреев С.Г., Шестаков М.А. Оценка работоспособности высокоплотных взрывчатых веществ с использованием уравнения состояния JWL. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, вып. 07. URL: <http://engjournal.ru/catalog/mech/mlgp/1401.html>

Андреев Сергей Григорьевич родился в 1944 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1969 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана, чл.-корр. Российской академии естественных наук. Область научных интересов: физика процессов горения и взрыва. e-mail: andreeff2007@mail.ru

Шестаков Максим Андреевич родился в 1994 г. Студент кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: физика процессов горения и взрыва. e-mail: asdsnow1@mail.ru

Assessment of high-density explosives performance using the JWL equation of state

© S.G. Andreev, M.A. Shestakov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

In the article we have refined estimations of the explosive materials performances considered as the ability of their decomposition products to produce work while isoentropically expanding from the initial state of the instantaneous explosion products; the effect of the 'cold' components of pressure and internal energy of the actuating medium producing the work was taken into account. Results of the calculations using the Jones–Wilkins–Lee (JWL) equation of state for low-density and high-density PETN charges are provided for several ways of delivering extra energy into explosion products, excessive as compared to the heat generation at the detonation front characterized by the Chapman–Jouget parameters.

Keywords: explosive material, heat of explosive reaction, performance, efficiency coefficient, instantaneous explosion

REFERENCES

- [1] Makhov M.N. Energosoderzhanie smesey CL-20 s al'yuminiem [The energy content of mixtures CL-20 and aluminum]. In: S.M. Frolov, ed. *Gorenie i vzryv* [Combustion and Explosion]. Moscow, Torus press Publ., 2013, issue. 6, pp. 293–296.
- [2] Okhitin V.N., Menshakov S.S. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, issue 1. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/machin/blasting/561.html> (accessed 30.05.2015).
- [3] Kulikov V.N., Osavchuk A.N., Imkhovik R.A., Odintsov V.A. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, issue 1. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/machin/blasting/564.html> (accessed 30.05.2015).
- [4] Yashin V.B., Alekseev V.V., Khodyrev S.P., Malkin A.V., Imkhovik A.N., Selivanov V.V., Simonov A.K. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, issue 1. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/machin/blasting/566.html> (accessed 30.05.2015).
- [5] Andreev S.G., Boyko M.M., Klimenko V.Yu. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, issue 1. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/machin/blasting/568.html> (accessed 30.05.2015).
- [6] Levin D.P., Selivanov V.V. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, issue 1. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/machin/blasting/576.html> (accessed 30.05.2015).
- [7] Cheltsov I.M. Vzryvchatye veschestva [Explosives]. In: F.A. Brokgauz i I.A. Efron. *Entsiklopedicheskiy slovar* [Encyclopedic Dictionary], vol. 11, Moscow, Terra Publ., 1991. (Reprint of F.A. Brokgauz i I.A. Efron, vol. 11 published in 1890).
- [8] Belyaev A.F. *Gorenie, detonatsiya i rabota vzryva kondensirovannykh sistem* [Combustion, detonation and operation of explosion of condensed systems]. Moscow, Nauka Publ., 1968, 255 p.
- [9] Solovyev V.S., Andreev S.G., Levantovskiy A.V., Shamshev K.N. Opticheskie i rentgenograficheskie issledovaniya detonatsionnykh svoystv nizkoplotnykh VV

- na osnove geksogena [Optical and X-ray studies of detonation properties of low-density explosives based on hexogen]. In: *Gorenie i vzryv* [Combustion and Explosion]. *Materialy Tretyego Vsesoyuznogo simpoziuma po goreniyu i vzryvu* [The materials of the 3rd All-Union symposium on combustion and explosion], Leningrad, 1972. Moscow, Nauka Publ., 1972, pp. 451–454.
- [10] Andreev S.G., Boyko M.M., Selivanov V.V. *Eksperimental'nye metody fiziki vzryva i udara* [Experimental methods of the physics of explosion and collision]. Selivanov V.V., ed. Moscow, Fizmatlit Publ., 2013, 752 p.
- [11] Savrov S.D., Trofimov V.F., Shvedov K.K.M. *Detonatsionnye volny v kondensirovannykh sredakh* [Detonation waves in condensed media]. Moscow, Nauka Publ., 1970, 164 p.
- [12] Urtiev P. A., Hayes B. Parametric Study of the Dynamic JWL-EOS for Detonation Products. *Fizika goreniya i vzryva – Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1991, no. 4, pp. 126–136.
- [13] Kukib B.N., Pankova E.N., Afanasenkov A.N. i dr. Raschetnyy ekspressmetod predvaritel'noy otsenki energeticheskikh kharakteristik, parametrov detonatsii, otnositel'noy rabotosposobnosti i ekonomicheskoy effektivnosti promyshlennykh VV [Estimated rapid method of preliminary assessment of energy performance, detonation parameters, relative efficiency and cost-effectiveness of industrial explosives]. *Metody ispytaniy nizkochuvstvitel'nykh VV* [Methods of test for low sensitivity explosives]. Chernogolovka, OIkhF AN SSSR, 1991, pp. 90–108.
- [14] Andreev S.G., Babkin A.V., Baum F.A., et al. *Fizika vzryva* [Physics of explosion], vol. 1. Orlenko L.P., ed. Moscow, Fizmatlit Publ., 2002, 415 p.
- [15] Andreev S.G. Priblizhennoe sootnoshenie mezhdu davleniem i massovoy skorost'yu vblizi udarnogo fronta pri ustanovivsheysya detonatsii [An approximate relationship between pressure and mass velocity near the shock front at a steady detonation]. *Udarnye volny v kondensirovannykh sredakh. Mezhdunarodnaya konferentsiya. Kiev, Ukraina, 16–21 sentyabrya 2012 g.* [Shock waves in condensed media. International Conference. Kiev, Ukraine, 16–21 September 2012]. Kiev, Inter press Ltd, 2012, pp. 47–54.
- [16] Dobratz B.M. *LLNL explosives handbook – properties of chemical – explosives and explosive stimulants*, UCRL – 52997. Livermore, (CA), 1981, 414 p.

Andreev S.G. (b.1944) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1969. Cand. Sci. (Eng.), corresponding member of the Russian Academy of Natural Sciences, assoc. professor of the High-Precision Airborne Devices Department at the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 100 publications in the field of physics of processes of combustion and explosion. e-mail: andreeff2007@mail.ru

Shestakov M.A. (b.1994), a student of the High-Precision Airborne Devices Department at the Bauman Moscow State Technical University. Author of one publication in the field of physics of combustion and explosion processes. e-mail: asdsnow1@mail.ru