

Оценка тротилового эквивалента детонирующего гремучего газа

© С.Г. Андреев, М.М. Бойко

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

Проведено сравнение действительных работ взрыва гремучего газа и тринитротолуола при их реакции в форме детонации в рамках представления о работоспособности взрывчатых веществ как возможности продуктов их разложения производить работу при изэнтропическом расширении, начиная с начального состояния, в котором находятся продукты мгновенного взрыва. Приведены результаты расчетов с использованием уравнения состояния идеального газа для продуктов детонации гремучего газа, находящегося при различных исходных давлениях, и уравнения состояния Джонса — Уилкинса — Ли для тринитротолуола. При фугасном действии, характеризуемом конечным давлением порядка десятой доли мегапаскаля, при котором продукты взрыва еще способны совершать требуемую форму работы, относительный тротильный эквивалент детонирующего гремучего газа возрастет приблизительно на 50...110 % при увеличении исходного давления газового заряда с нормального значения до одного мегапаскаля.

Ключевые слова: *гремучий газ, газовый заряд, детонация, дефлаграция, коэффициент полезного действия, давление, работа, фугасное действие, тротильный эквивалент, мгновенный взрыв*

Введение. Заряды газодисперсных и однородных газообразных взрывчатых веществ (ВВ), как и конденсированных, используются или являются предметом изучения (анализа) в сферах деятельности военной и гражданской направленности [1–6]. Конечной целью исследований (теоретических и экспериментальных) военной направленности до последнего времени было, главным образом, достижение максимальных разрушающих воздействий на объекты и окружающую среду. Исследования зарядов ВВ и воздействия продуктов их взрыва на окружающие объекты в гражданских областях деятельности человека в значительной мере связаны с разработкой различных взрывных устройств и взрывных технологий горнодобывающей, металлообрабатывающей, металлургической, машиностроительной промышленности, понижением степени риска при разработке и функционировании предприятий потенциально взрывоопасных технологий и объектов химической промышленности. К областям деятельности человека, требующих знания особенностей взрывных процессов, следует также отнести анализ последствий и установления причин катастрофических взрывов, проведения взрывотехнических экспертиз сотрудниками и организациями правоохранительной (и судебной), а также антитеррористической служб. При этом в качестве

одной из характеристик зарядов ВВ или взрывных устройств используют так называемый тротильный эквивалент — эквивалентную по особенностям воздействия на окружающие объекты массу детонирующего конденсированного заряда тринитротолуола (ТНТ).

Цель настоящей работы — оценка тротильных эквивалентов зарядов газовых ВВ, взрывающихся в потенциально возможном наиболее разрушительном режиме установившейся детонации.

Краткие сведения о действительной работе взрыва и тротильном эквиваленте. Энергия химического превращения ВВ обычно используется для совершения разрушительных форм работы, которую совершают продукты их реакции, среди них выделяют следующие действия взрыва [6, 7]:

- бризантное;
- фугасное.

Фугасное действие определяется работой, которую совершают продукты взрывного превращения (ПВ) при их расширении до сравнительно больших значений удельных объемов, соответствующих давлениям от единиц до десятых долей мегапаскаля. При сравнении фугасных действий взрывов различных зарядов ВВ часто используют простейшую обобщенную характеристику: тротильный эквивалент взрывного устройства. Его часто называют массой заряда ТНТ $m_{\text{ТНТ}}$, которая совершает такое же разрушительное фугасное действие. Отношение массы $m_{\text{ТНТ}}$ к массе ВВ иного состава $m_{\text{ВВ}}$, проявляющего такое же фугасное действие, называют относительным тротильным эквивалентом.

Тротильные эквиваленты зарядов можно сравнивать, сопоставляя поля давления (или полей удельных импульсов давления) в проходящих взрывных волнах, т. е. зависимостей этих величин от расстояния контролируемой точки до центра взорванного заряда, либо сравнивая особенности разрушения различных объектов, попавших в зону действия взрывных волн.

В первом приближении тротильные эквиваленты можно устанавливать, сравнивая действительные работы a (количество работы, совершаемой продуктами взрыва заряда массой 1 кг). Действительная работа взрыва ВВ рассматривается как произведение потенциала ВВ на термодинамический коэффициент полезного действия (КПД) η_{p_k} процесса передачи механической энергии в окружающую среду от продуктов мгновенного взрыва зарядов ВВ при их изоэнтропическом расширении с достижением конечного давления p_k от десятых до сотых долей мегапаскаля.

При детонации наиболее распространенных зарядов большой массы конденсированных мощных ВВ, различающихся по плотности

не более чем на 20 %, образуются продукты взрыва, при расширении которых реализуются приблизительно одинаковые КПД η_{P_k} . При этом относительный тротильный эквивалент с допустимой точностью полагают равным отношению значений удельной теплоты взрыва при постоянном объеме: $m_{\text{ТНТ}}/m_{\text{ВВ}} = Q_{\text{ВВ}}/Q_{\text{ТНТ}}$. Соответственно, тротильный эквивалент $m_{\text{ТНТ}}$ заряда ВВ массой $m_{\text{ВВ}}$ можно рассчитывать как произведение этой массы ВВ и отношения удельных теплот взрыва (при постоянном объеме).

Воздействие взрывов газов на окружающую среду по сравнению с действием детонирующих зарядов мощных конденсированных ВВ может быть в определенных условиях более многофакторным процессом [8–10]. Причины этого обстоятельства связаны:

- с термодинамическими особенностями взрыва низкоплотного заряда;
- проявлением особенностей инициирования и замедленного выделения энергии по сравнению с высокоплотными конденсированными ВВ.

Уменьшение плотности заряда и связанное с этим существенное сокращение степени расширения продуктов взрыва при совершении фугасного действия на окружающую среду вызывает снижение КПД взрыва.

В случае конденсированных ВВ значительное разрушающее фугасное действие реализуется обычно только при детонации зарядов или при специальным образом организованном многостадийном процессе, начинающемся как детонация и завершающемся дореагированием в режиме дефлаграции продуктов первичной неидальной детонации или их смеси с атмосферным воздухом. К особенности инициирования взрывных процессов в газовых зарядах можно отнести то, что в них при отсутствии прочных оболочек могут быть реализованы два типа самоподдерживающихся (самораспространяющихся) процессов с большим разрушающим проявлением: дефлаграции и детонации.

Детонацию в газовых зарядах можно возбудить как обычным детонатором (ЭД-8 или ЭД-8 с дополнительным зарядом, например, пентаэритрита тетранитрата (тетраэритронитрат, ТЭН) массой 1...10 г), так и специальным газовым детонатором. Последний может быть выполнен в виде металлической трубки, заполняемой тем же газом, что и инициируемый заряд [11].

Горение газа, вызванное простейшим воспламенителем при наличии шероховатости поверхности трубки, переходит в детонацию на пути, длина которого составляет 5...30 см. При отсутствии шероховатостей или в открытом объеме детонация появляется на расстоянии на порядок больше.

Возбуждение детонации газовых зарядов детонаторами, выполненными в виде трубок, которые заполнены взрывчатым газом (трубчатыми газовыми детонаторами), осложняется возможностью затухания детонации при выходе ее фронта за пределы торцевой части канала, образованного жесткими стенками трубки.

При разработке взрывных устройств и анализе причин несанкционированных разрушений объектов следует учитывать эти обстоятельства. При оценке размеров опасных зон, производимой, например, на стадии проектирования взрывоопасных производств, требуется обязательно предусматривать возможность возникновения наиболее разрушительной формы взрывного превращения — детонации, непосредственное экспериментальное изучение которой может оказаться чрезмерно затруднительным.

Далее в статье проведен анализ действительной работы взрывчатых газовых смесей в упрощающем предположении того, что в заряде происходит взрывное превращение в наиболее разрушительной потенциально возможной форме установившейся детонации, реализовать которое при экспериментальных исследованиях часто бывает затруднительно. В качестве традиционной модели такого превращения для конденсированных ВВ была использована модель мгновенной детонации, или мгновенного взрыва.

Модели для оценки действительной работы, совершаемой в результате детонации газовых зарядов. В настоящей статье принято следующее условие: газовые заряды представляют собой однородные смеси n компонентов (молярную массу и массовую долю которых обозначим, соответственно, μ_i и \bar{m}_i) с известным потенциалом

$$Q_V + C_V T_{0st},$$

где C_V — удельная теплоемкость ПВ при постоянном объеме; T_{0st} — стандартная температура.

При этом объемные \bar{v}_i и массовые доли \bar{m}_i связаны соотношением

$$\bar{v}_i = \frac{\bar{m}_i \mu_i^{-1}}{\sum_1^n \bar{m}_i \mu_i^{-1}}.$$

Газовую постоянную смеси газов $R_{см}$ можно рассчитать по формуле

$$R_{см} = \sum_1^n \frac{R}{\mu_i} \bar{m}_i,$$

где R — универсальная газовая постоянная.

Эффективная молярная масса смеси при этом $\mu_{см} = \sum_1^n v_i \mu_i$.

Удельный объем смеси $v_{см}$ перед взрывом определяют как

$$v_{см} = \frac{R_{см} T_{см}}{p_{см}},$$

где $T_{см}$ — температура; $p_{см}$ — давление смеси.

При вычислении давления мгновенного взрыва удельная теплота взрыва смеси $Q_{Vсм}$ по условию принята известной.

Теоретическая оценка значения показателя изоэнтропы образующихся продуктов взрыва $\gamma_{п.в}$ с учетом их ионизации при высоких температурах является достаточно сложной задачей.

Поэтому для оценки значения $\gamma_{п.в}$ использовано приближенное выражение для скорости детонации газов, из которого следует:

$$\gamma_{п.в} = \sqrt{1 + \frac{D^2}{2Q_{Vсм}}}, \quad (1)$$

где D — экспериментально определенное значение скорости детонации.

Давление продуктов мгновенного взрыва (еще не успевших расшириться вслед за моментом их «мгновенного» образования и поэтому имеющих такой же удельный объем, как и исходная газовая смесь) можно определить:

$$p_{м.в} = (1/v_{см})(\gamma_{м.в} - 1)Q_{Vсм}, \quad \gamma_{м.в} = \gamma_{п.в}.$$

Далее возможно сделать оценку температуры продуктов мгновенного взрыва в предположении линейной зависимости удельной теплоемкости от температуры $C_V = a + bT$, принимая значения коэффициентов a и b по Касту:

$$T_{м.в} = \frac{-a + \sqrt{a^2 + 4bQ_{Vcal}}}{2b}.$$

При этом размерность теплоты взрыва Q_{Vcal} , соответствующая размерности коэффициентов a и b , равна килокалориям, деленным на грамм.

Следует отметить, что параметры нормальной детонации на поверхности Чепмена — Жуге: давление p_{CJ} , удельный объем v_{CJ} , температура T_{CJ} , рассчитывают по формулам:

$$p_{CJ} = (1/v_{cm})D^2/(\gamma_{ПВ} + 1),$$

$$v_{CJ} = v_{cm}\gamma_{ПВ}/(\gamma_{ПВ} + 1),$$

$$T_{CJ} = p_{CJ}v_{CJ}/(R/\mu_{ПВ}),$$

где $\mu_{ПВ}$ — молярная масса ПВ (детонации).

Рассмотрим взрыв газового заряда плотностью $\rho_{cm} = 1/v_{cm}$ в воздухе в рамках той же модели, которая используется для сравнения действительной работы продуктов взрыва различных конденсированных ВВ [7, 8].

Действительную работу a определяют как действие, которое могут совершить продукты взрыва одного килограмма ВВ при адиабатическом (изоэнтропическом) расширении и охлаждении до температуры T_k , при которой давление в них становится равно конечному p_k (значение p_k зависит от того, какая форма работы рассматривается). Ее можно представить как произведение потенциала на термодинамический КПД η_{p_k} :

$$a = (Q_V + C_V T_{0st})\eta_{p_k}.$$

Используя уравнение состояния идеального газа для продуктов взрыва и уравнение для второго начала термодинамики, выражение для КПД $\eta_{p_k} = 1 - T_k/T_{m.B}$ можно преобразовать таким образом:

$$\eta_{p_k} = 1 - \left(\frac{p_k}{p_{m.B}}\right)^{\frac{\gamma_{m.B}-1}{\gamma_{m.B}}} = 1 - \left(\frac{v_{m.B}}{v_k}\right)^{\gamma_{m.B}-1}, \quad \gamma_{m.B} = \gamma_{ПВ},$$

где v_k — удельный объем ПВ при достижении давления p_k в процессе изоэнтропического расширения: $v_k = v_{m.B} (p_{m.B}/p_k)^{1/\gamma_{m.B}}$.

Сделаем оценку параметров состояния движения (давления $p_{y.B}$ и массовой скорости $u_{y.B}$) на границе раздела атмосферного воздуха, окружающего газовый заряд, и продуктов мгновенного взрыва в самом начале их расширения.

В дополнение к вычислению КПД взрыва сделаем оценку параметров состояния движения (давления $p_{y.B}$ и массовой скорости $u_{y.B}$) на границе раздела атмосферного воздуха, окружающего газовый заряд, и продуктов мгновенного взрыва в самом начале их расширения.

Определить эти параметры можно, решив систему уравнений, связывающих давление p и массовую скорость u , с одной стороны,

в ударной волне в воздухе в момент ее появления, а с другой — в волне разгрузки, которая начинает распространяться от поверхности контакта ПВ газового заряда с воздухом:

$$u = \left[\left(\frac{p}{p_a} \right) - 1 \right] \sqrt{2p_a \frac{v_a}{(\gamma_a + 1) \frac{p}{p_a} + (\gamma_a - 1)}},$$

$$u = \frac{2c_{м.в}}{\gamma_{м.в} - 1} \left[1 - \left(\frac{p}{p_{м.в}} \right)^{\frac{\gamma_{м.в} - 1}{2\gamma_{м.в}}} \right], \quad c_{м.в} = \sqrt{\gamma_{м.в} R \frac{T_{м.в}}{\mu_{м.в}}},$$

где p_a , v_a , γ_a — соответственно давление, удельный объем и показатель адиабаты воздуха; $c_{м.в}$ — скорость звука в ПВ при мгновенном взрыве.

Расчет работоспособности конденсированного взрывчатого вещества. При взрыве конденсированного ВВ в воздухе определение его работоспособности осложняется тем, что значение показателя изоэнтропы по мере уменьшения давления продуктов детонации в процессе их расширения в отличие от газовых зарядов не остается практически постоянным. Показатель изоэнтропы продуктов детонации в момент их образования и начала расширения (при плотных конденсированных ВВ) обычно имеет значение, близкое к трем (2,7...2,5), при давлениях, достигаемых при расширении ПВ в воздух, — 1,25...1,32.

Учет изменения показателя изоэнтропы при расширении ПВ в воздухе обычно производится приближенными способами [6]. Более точно оценить работу, совершаемую ПВ конденсированных ВВ при их большом относительном расширении, можно с помощью уравнения состояния Джонса — Уилкинса — Ли (Jones — Wilkins — Lee, JWL) [12]. Уравнение состояния JWL, связывающее давление p , удельный объем v ВВ и удельную внутреннюю энергию e продуктов взрыва конденсированного ВВ, удобнее привести к виду

$$p(v, e) = A \left(1 - \frac{v_0 \omega}{R_1 v} \right) \exp \left(-\frac{R_1 v}{v_0} \right) + B \left(1 - \frac{v_0 \omega}{R_2 v} \right) \exp \left(-\frac{R_2 v}{v_0} \right) + \frac{\omega}{v} e, \quad (2)$$

где — v_0 начальный удельный объем ВВ заряда.

Коэффициент Грюнайзена ω и значения остальных параметров уравнения: A , B , R_1 , R_2 находятся с учетом необходимости воспроизведения, в частности, соотношения параметров состояния ПВ (удельной внутренней энергии, удельного объема и давления) в точке

Чепмена — Жуге. Эти соотношения соответствуют тому, что удельная внутренняя энергия ВВ заряда в исходном (начальном) состоянии принимается равной e_0 . Эту величину можно связать [12] с удельной теплотой взрыва Q_V , измеряемой с использованием калориметрической бомбы, в которой удельный объем ПВ взрывчатого вещества после их расширения и остывания до стандартной температуры T_{0st} равен $v_{\text{кал}}$:

$$e_0 = Q_V + C_V T_{0st} + e_x(v_{\text{кал}}),$$

где C_V — среднее значение удельной теплоемкости ПВ при постоянном объеме.

Давление мгновенного взрыва $p_{\text{м.в}}$ рассчитывают по формуле (2) подстановкой $v = v_{\text{м.в}} = v_0$ и $e = e_0 = Q_V + C_V T_{0st}$. Холодная (упругая) составляющая удельной внутренней энергии ПВ $e_x(v_{\text{кал}})$ при обычных значениях плотности заряжения калориметрических бомб пренебрежимо мала по сравнению с e_0 .

Соотношение между удельным объемом v и давлением p_s ПВ при их изэнтропическом расширении от начального состояния с параметрами $(p_{\text{м.в}}, v_{\text{м.в}})$, называемое изэнтропой, имеет вид

$$p_s(v) = p_x(v) + \{p_{\text{м.в}} - p_x(v_{\text{м.в}})\} (v_{\text{м.в}}/v)^{\omega+1}. \quad (3)$$

При этом $p_x(v) = A \exp(-R_1 v/v_0) + B \exp(-R_2 v/v_0)$ является зависимостью от удельного объема холодной (упругой) составляющей давления. Выражение в фигурных скобках формулы (3) является тепловой составляющей p_T давления мгновенного взрыва $p_{\text{м.в}}$.

Выражения (2) и (3) позволяют вычислить действительную работу, совершаемую при изэнтропическом расширении ПВ, и соответственно коэффициент полезного действия взрыва $\eta_{\text{КВВ}}$ заряда конденсированного ВВ (КВВ):

$$\eta_{\text{КВВ}}(v) = \left(\int_{v_{\text{м.в}}}^v p_s(v) dv \right) / (Q_V + C_V T_{0st}). \quad (4)$$

Исключив из (3) и (4) удельный объем расширяющихся ПВ v , можно получить зависимость КПД взрыва заряда конденсированного ВВ от конечного давления p_k , превышение которого необходимо для того, чтобы ПВ еще совершали работу заданной формы:

$$\eta_{\text{КВВ}} = \eta_{\text{КВВ}}(p_k).$$

Результаты вычислений. Ниже приведены результаты расчетов параметров взрыва зарядов ТНТ и гремучего газа, получаемого электролизом воды.

Параметры уравнения состояния JWL для продуктов детонации заряда ТНТ, имеющего плотность $\rho_0 = 1/v_0 = 1,63 \text{ г/см}^3$, составляют: $A = 371,2 \text{ ГПа}$, $B = 3,231 \text{ ГПа}$, $R_1 = 4,15$, $R_2 = 0,95$, $\omega = 0,30$, $E_0 = 7,0 \text{ ГПа}$. Величина E_0 , используемая в оригинальной форме записи уравнения состояния продуктов взрыва JWL, связана с константой e_0 , являющейся удельной внутренней энергией ВВ заряда в исходном (начальном) состоянии, может быть выражена соотношением: $e_0 = E_0/\rho_0$. При этих параметрах заряда и его ПВ давление мгновенного взрыва $p_{м.в} = 8530 \text{ МПа}$, температура — $T_{м.в} = 3176 \text{ К}$ (тепловое давление — $p_{м.в}^{\text{тепл}} = 1429 \text{ МПа}$). По мере увеличения удельного объема ПВ относительно удельного объема заряда v/v_0 и, соответственно, уменьшения давления изоэнтропического расширения p_s доля его тепловой составляющей p_T увеличивается (рис. 1).

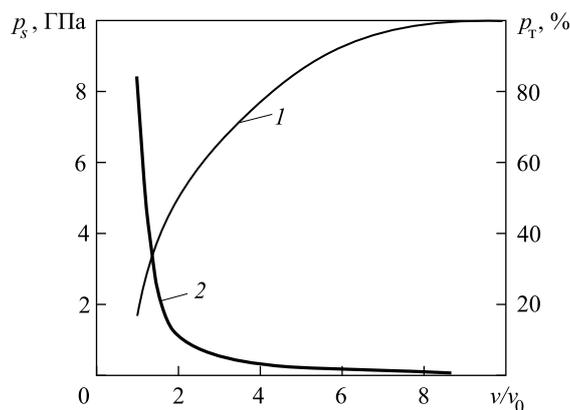


Рис. 1. Зависимость доли давления тепловой природы от полного давления $\bar{p}_T = p_T/p_s$ (1) и изоэнтропа разгрузки продуктов взрыва $p_s = p_s/(v/v_0)$ (2)

При расчетах для гремучего газа, представляющего собой стехиометрическую смесь водорода и кислорода, массовое содержание компонентов составляет соответственно для водорода и кислорода: $\bar{m}_1 = 0,111$ и $\bar{m}_2 = 0,889$. Объемные доли равны соответственно: $\bar{v}_1 = 0,667$ и $\bar{v}_2 = 0,333$. Кажущиеся молярная масса и газовая посто-

янная гремучего газа: $\mu_{\text{см}} = 0,012$ кг/моль и $R_{\text{см}} = 692,8$ Дж/кг·К. При начальном давлении гремучего газа, равном нормальному ($p_{\text{см}0} = 0,1013$ МПа), и температуре $T_{\text{см}0} = 300$ К его плотность $\rho_{\text{см}0}$ составляет $0,499$ кг/м³. По формуле (1) и при экспериментально определенных значениях скорости детонации $D = D_{\text{г.г}} = 2819$ м/с и теплоты взрыва гремучего газа $Q = Q_{\text{г.г}} = 7,837$ МДж/кг получим оценку показателя изэнтропии продуктов взрыва («паров» воды) $\gamma_{\text{п.в}} = 1,228$.

При $\rho_{\text{см}0} = 0,499$ кг/м³ начальные параметры состояния продуктов мгновенного взрыва: давление — $p_{\text{м.в}} = 0,89$ МПа, температура — $T_{\text{м.в}} = 2403$ К. При этом параметры на поверхности Чепмена — Жуге: давление — $p_{\text{СЖ}} = 1,78$ МПа, температура — $T_{\text{СЖ}} = 4256$ К, плотность — $\rho_{\text{СЖ}} = 0,906$ кг/м³. При $p_{\text{см}0} = 0,1013$ МПа начальные параметры состояния движения во фронте воздушной ударной волны, распространяющейся от поверхности начавшихся расширяться продуктов МВ, составляют: давление — $0,525$ МПа, массовая скорость — 480 м/с. Температура ударно сжатого воздуха равна приблизительно 550 К. (Заметим, что при взрыве конденсированных ВВ начальные значения давления и массовая скорость волны в воздухе составляют, соответственно, порядка $0,1$ ГПа и 9000 м/с, температура — приблизительно $12\,000$ К.) В результате изэнтропического расширения и снижения давления до атмосферного значения $p_{\text{к}} = p_{\text{а}} = 0,1013$ МПа продукты мгновенного взрыва гремучего газа охлаждаются до температуры $T_{\text{к}} = 0,668T_{\text{м.в}} \approx 1600$ К их удельный объем увеличится в $5,88$ раз относительно начального значения и, соответственно, диаметр «пузыря» предположительно сферической формы, заполненного парами воды, будет в $1,8$ раз больше диаметра сферического заряда гремучего газа. На этой стадии взрыва заряда гремучего газа термодинамический коэффициент полезного действия $\eta = 0,332$. Из-за разности удельных объемов ПВ и окружающего воздуха этот «пузырь» начнет всплывать с ускорением приблизительно 20 м/с². Движение ПВ в вертикальном направлении приводит к потере исходной формы газового заряда. После затухания волны в воздухе «всплывание» больших масс горячих ПВ будет способствовать формированию под влиянием восходящего потока течения воздуха к эпицентру взрыва.

При сохранении начальной температуры, но при увеличении начального давления газового заряда $p_{\text{см}0}$ происходит прямо про-

порциональное увеличение давления мгновенного взрыва, давления и плотности ПВ на поверхности Чепмена — Жуге. При этом изменяется коэффициент полезного действия взрыва. При $p_{см0} = 1,013$ МПа и расширении ПВ в воздух с нормальным атмосферным давлением коэффициент полезного действия взрыва становится равным $\eta_{p_k} = 0,564$. Такое увеличение начального давления гремучего газа увеличивает относительную работу $\bar{a} = a_{г.г} / a_{ТНТ}$, определяемую как отношение работ, совершаемых расширяющимися ПВ гремучего газа $a_{г.г}$ и ТНТ $a_{ТНТ}$, приблизительно $0,6 \dots 1,1$.

На рис. 2 показано, как нарастает КПД изоэнтропически расширяющихся ПВ по мере уменьшения конечного давления p_k . Зависимости КПД от $p = p_k$ для гремучего газа $\eta = \eta_{г.г}$ показаны линиями 1, а аналогичная зависимость для конденсированного ВВ—ТНТ обозначена линией 2. Приведены результаты при исходных давлениях заряда гремучего газа $p_{см0} = 0,1013$ МПа и $p_{см0} = 1,013$ МПа. При этом давления мгновенного взрыва $p_{м.в}$ равны соответственно 0,89 и 8,9 МПа. Зависимости для относительной работы \bar{a} показаны линиями 3 на рис. 2.

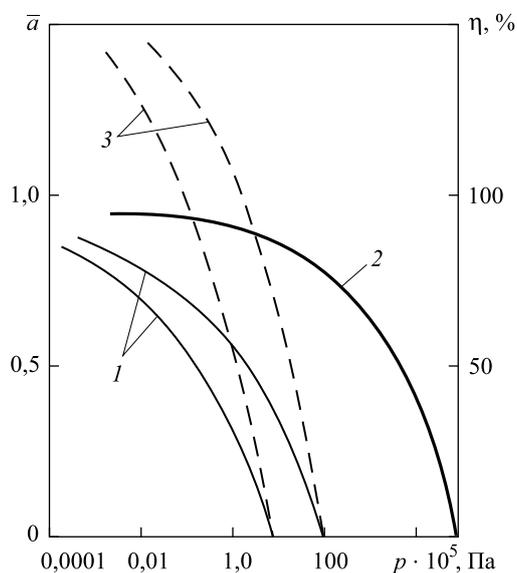


Рис. 2. Влияние конечного давления $p = p_k$ ПВ на КПД «мгновенного взрыва» η и на относительную работу $\bar{a} = a_{г.г} / a_{ТНТ}$, являющуюся оценкой относительного тротилового эквивалента

Значение p_k является нижней границей давления, при котором еще возможна передача энергии от ПВ в окружающую среду, например, при поддержании полной энергии, включающей внутреннюю (тепловой природы) и кинетическую, в атмосферном воздухе, вовлеченном в взрывную волну, p_k приблизительно равно $1 \cdot 10^5$ Па, а при поддержании энергии во взрывной волне в воде на глубине 100 м $p_k \approx 1,1$ МПа. При взрыве заряда в свинцовой бомбе (бомба Трауцля) давление p_k приблизительно равно давлению газа в полости бомбы, при котором ее оболочка начинает пластически деформироваться (предел текучести литого свинца равен 4,9...9,8 МПа).

Следует отметить, что если за начальное давление, при котором начинается изэнтропическое расширение ПВ, совершающих действительную работу, принять давление на поверхности Чепмена — Жуге p_{CJ} , то получившееся значение КПД взрыва η_{CJ} будет превышать простейшую оценку КПД для модели мгновенного взрыва $\eta_{м.в.}$. Это превышение для гремучего газа составляет приблизительно 24 % при $p_{см0} = p_k$, а при значениях отношения $p_k / p_{см0}$, равных соответственно 0,1 и 0,01, снижается до 9 и 5 %. В случае КВВ это превышение уже можно считать несущественным.

Отношение действительных работ взрыва гремучего газа и тротила (см. рис. 2), рассматриваемое как относительный тротильный эквивалент:

$$\bar{a} \approx \frac{Q_{vг.г} \eta_{г.г}}{Q_{vТНТ} \eta_{ТНТ}},$$

зависит от соотношения начального давления в газовом заряде $p_{см0}$ и конечного давления p_k завершения фугасной работы взрыва. Задав значение относительного тротильного эквивалента, можно получить соотношение между $p_{см0}$ и p_k , соответствующее этому значению.

На рис. 3 приведено такое соотношение между начальным давлением в заряде гремучего газа $p_{см0}$ и конечным давлением p_k , при котором относительная действительная работа взрыва (приближение относительного тротильного эквивалента) газового заряда равна единице.

Таким образом, относительные тротильные эквиваленты газовых зарядов в общем случае не следует устанавливать лишь по теплоте взрыва.

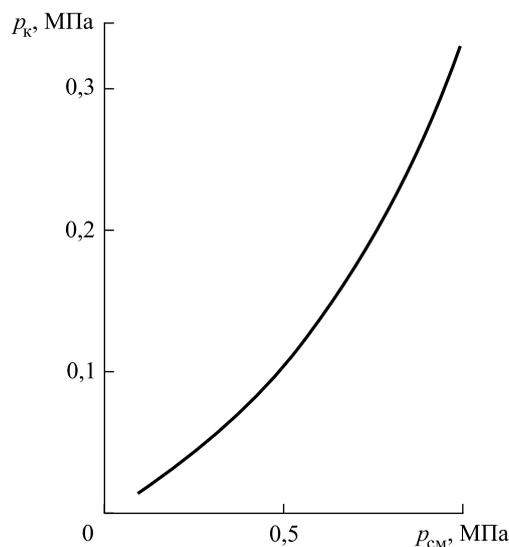


Рис. 3. Соотношение между начальным давлением в заряде гремучего газа p_{cm0} и конечным давлением p_k при $\bar{a} = 1$

Заключение. В данной статье предложен способ оценки относительного тротилового эквивалента детонационного взрыва газового заряда и приведен пример его использования применительно зарядам гремучего газа.

Результаты расчетов, выполненных в рамках модели мгновенного взрыва, показывают сильное снижение (относительно конденсированных ВВ) термодинамического КПД газовых зарядов по мере снижения начального давления газовой смеси (в окрестности значений, близких к нормальному атмосферному давлению). При таких давлениях и соответствующих им низких значениях плотности газовых зарядов давления начала расширения образовавшихся продуктов мгновенного взрыва на порядки ниже, чем у конденсированных ВВ. При этом результаты расчетов содержат «средние» оценки действительной работы взрыва газовых зарядов относительно тех, что могут быть получены при более точных и сложных моделях совершения продуктами взрывных реакций работ в процессе дефлаграции и детонации. Это обусловлено следующими обстоятельствами.

В первом случае существенная часть работы совершается при начальном давлении, много меньшем давления, которое достигается при завершении тепловыделения в газовом заряде. Во втором случае продукты взрыва начинают расширяться, совершая работу при начальном давлении, вдвое большем давления мгновенного взрыва, за счет того, что конечное тепловыделение от реакции следует за по-

вышением внутренней энергии продуктов взрыва ударно-волновым сжатием.

Несмотря на возможную существенно большую удельную теплоту взрыва по сравнению с конденсированными ВВ, газовые заряды из-за пониженных значений термодинамического КПД могут иметь относительный тротиловый эквивалент меньший, чем единица. Каждому заданному значению относительного тротилового эквивалента соответствует свое соотношение между начальным давлением в заряде гремучего газа $p_{см0}$ и конечным давлением p_k : $p_k = p_k(p_{см0})$.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бабкин А.В., Велданов В.А., Имховик Н.А., Кобылкин И.Ф., Колпаков В.И., Ладов С.В. [и др.]. *Боеприпасы*. В 2 т. Т. 1. В.В. Селиванов, ред. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016, 506 с.
- [2] Одинцов В.А., Ладов С.В., Левин Д.П. *Оружие и системы вооружения*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016, 219 с.
- [3] Андреев С.Г., Шестаков М.А. Оценка работоспособности высокоплотных взрывчатых веществ с использованием уравнения состояния JWL. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, вып. 7. DOI: 10.18698/2308-6033-2015-7-1401
- [4] Охитин В.Н., Меньшаков С.С. *Фугасное действие боеприпасов 2-е изд.*, испр. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018, 120 с.
- [5] Меньшаков Д.С., Меньшаков С.С., Охитин В.Н. *Способ разрушения речно-го ледяного покрова и устройство для его реализации*. Пат. № 2519072 РФ, 2014, бюл. № 16.
- [6] Орленко Л.П., ред. *Физика взрыва*. В 2 т. Москва, Физматлит, 2002, т. 1, 824 с.
- [7] Чельцов И.М. Взрывчатые вещества. В кн.: *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, 1890, 960 с.).
- [8] Беляев А.Ф. *Горение, детонация и работа взрыва конденсированных систем*. Москва, Наука, 1968, 255 с.
- [9] Гельфанд Б.Е., Сильников М.В. *Фугасные эффекты взрывов*. Санкт-Петербург, Полигон, 2002, 272 с. ISBN 5-94173-221-1
- [10] Бейкер У., Кокс П., Уэстейн П., Кулеш Дж., Стрелой Р. *Взрывные явления. Оценка и последствия*. В 2 кн. Кн. 2. Пер. с англ., Я.Б. Зельдович, Б.Е. Гельфанд, ред. Москва, Мир, 1986, 384 с.
- [11] Щелкин К.И. *Быстрое горение и спиновая детонация газов*. Н.Н. Семенов, ред. Москва, Военное издательство Министерства Вооруженных сил Союза ССР, 1949, 166 с.
- [12] Urtiew P.A., Hays V. Parametric Study of the Dynamic JWL-EOS for Detonation Products. *Физика горения и взрыва*, 1991, т. 27, № 4, с. 126–136.
- [13] Андреев С.Г. Приближенное соотношение между давлением и массовой скоростью вблизи ударного фронта при установившейся детонации. *Ударные волны в конденсированных средах. Междунар. конф. Киев, Украина, 16–21 сентября 2012 г.* Киев, Интерпресс ЛТД, 2012, с. 47–54.

Статья поступила в редакцию 20.01.2020

Ссылку на статью просим оформлять следующим образом:

Андреев С.Г., Бойко М.М. Оценка тротилового эквивалента детонирующего гремучего газа. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2020, вып. 2.
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-2-1954>

Андреев Сергей Григорьевич — канд. техн. наук, доцент, чл.-кор. РАЕН, доцент кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана.
e-mail: andreeff2007@mail.ru

Бойко Михаил Михайлович — доцент кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: boykomm@bmstu.ru

Estimation of TNT equivalent of detonating explosive gas

© S.G. Andreev, M.M. Boyko

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The purpose of the study was to compare the genuine work of explosion of detonating gas and trinitrotoluene during their reaction in the form of detonation. The comparison was done in the framework of the concept of the strength of the explosives as the ability of their degradation products to perform work under isentropic expansion, starting from the initial state in which the products of instant explosion are located. The study introduces the calculation data using the gas equation for products of detonation of a detonating gas at different initial pressures, and the Johns-Wilkins-Lee (JWL) equation for trinitrotoluene. With a high-explosive effect characterized by a final pressure of the order of a tenth of a megapascal, in which the explosion products are still able to perform the required form of work, the relative TNT equivalent of detonating gas will rise from about 50% to 110% with an increase in the initial pressure of the gas charge from a normal value to one megapascal.

Keywords: *detonating gas, gas charge, detonation, deflagration, efficiency coefficient, pressure, work, high-explosive effect, TNT equivalent, instant explosion*

REFERENCES

- [1] Babkin A.V., Veldanov V.A., Imkhovik N.A., Kobylkin I.F., Kolpakov V.I., Ladov S.V., et al. *Boepripasy* [Ammunition]. In 2 vols. Vol. 1. V.V. Selivanov, ed. Moscow, BMSTU Publ., 2016, 506 p.
- [2] Odintsov V.A., Ladov S.V., Levin D.P. *Oruzhie i sistemy vooruzheniya* [Weapons and weapon systems]. Moscow, BMSTU Publ., 2016, 219 p.
- [3] Andreev S.G., Shestakov M.A. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2015, iss. 7. DOI: 10.18698/2308-6033-2015-7-1401
- [4] Okhitin V.N., Menshakov S.S. *Fugasnoe deystvie boepripasov* [High-explosive effect]. 2nd ed., rev. Moscow, BMSTU Publ., 2018, 120 p.
- [5] Menshakov D.S., Menshakov S.S., Okhitin V.N. *Sposob razrusheniya rechnogo ledyanogo pokrova i ustroystvo dlya ego realizatsii* [A method of crushing the river ice cover and device for its implementation]. Patent RF, no. 2519072, IPC E02B15/02, 02F42D3/00 (2012.12), 2014, bul. no. 16.
- [6] Orlenko L.P., ed. *Fizika vzryva*. [Physics of explosion]. In 2 vols. Moscow, Fizmatlit Publ., 2002, vol. 1, 824 p.
- [7] Cheltsov I.M. *Vzryvchatye veshchestva* [Explosives]. In.: *Entsiklopedicheskiy slovar* [Encyclopedic Dictionary]. Vol. 11. F.A. Brokgauz, I.A. Efron. Moscow, Terra Publ., 1991 (reprint. ed., vol. 11, 1890).
- [8] Beliaev A.F. *Gorenie, detonatsiya i rabota vzryva kondensirovannykh sistem* [Combustion, detonation and explosion of condensed systems]. Moscow, Nauka Publ., 1968, 255 p.
- [9] Gelfand B.E., Silnikov M.V. *Fugasnye efekty vzryvov* [High-explosive effects]. St. Petersburg, Poligon Publ., 2002, 272 p. ISBN 5-94173-221-1
- [10] Baker W.E., Cox P.A., Kulesz J.J., Strehlow R.A., Westine P.S. *Explosion Hazards and Evaluation*. Vol. 15. 1st ed. Elsevier Science, 1983, 840 p. [In Russ.: *Vzryvnye yavleniia. Otsenka i posledstviya*. In 2 vols. Vol. 2. Ya.B. Zeldovich, B.E. Gelfand, transl. ed. Moscow, Mir Publ., 1986, 384 p.]

- [11] Schelkin K.I. *Bystroe gorenie i spinovaya detonatsiya gazov* [Deflagration and spin detonation of gases]. N.N. Semenov, ed. Moscow, Voennoe izdatelstvo Publ., 1949, 166 p.
- [12] Urtiew P.A., Hays B. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1991, vol. 27, no. 4, pp. 126–136.
- [13] Andreev S.G. Priblizhennoe sootnoshenie mezhdru davleniem i massovoy skorostyu vblizi udarnogo fronta pri ustanovivsheysya detonatsii [An approximate relationship between pressure and mass velocity near a shock front with steady detonation]. *Udarnye volny v kondensirovannykh sredakh. Mezhdunarodnaya konferentsiya. Kiev, Ukraina, 16–21 sentyabrya 2012 g.* [Shock waves in condensed matter. International Conference. Kiev, Ukraine, September 16–21, 2012]. Kiev, Inter press LTD, 2012, pp. 47–54.

Andreev S.G., Cand. Sc. (Eng.), Corresponding Member RANS, Assoc. Professor, Department of High-Precision Airborne Devices, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 250 research papers in the theory of energy-related materials, chemical physics and experimental gas dynamics. e-mail: andreeff2007@mail.ru

Boyko M.M., Assoc. Professor, Department of High-Precision Airborne Devices, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 100 research papers in the theory of energy-related materials, chemical physics and experimental gas dynamics. e-mail: boykomm@bmstu.ru