

УДК 53.081.7

Анализ уравнения состояния продуктов детонации JWL

03, МАРТ 2012

Горбатенко А.А.

*Студентка,
кафедра «Высокоточные летательные аппараты»*

*Научный руководитель: Андреев С.Г.,
к.т.н., доцент кафедры «Высокоточные летательные аппараты»*

МГТУ им. Н.Э. Баумана
selenta92@mail.ru

Уравнение состояния (УРС) JWL (Jones- Wilkins-Lee) находит широкое применение в расчетах различных взрывных и, в частности, детонационных процессов, протекающих в зарядах широкого круга ВВ или в элементах взрывных устройств под действием продуктов детонации этих ВВ. Однако, представления об этом УРС (также о разновидностях УРС) можно получить лишь в контексте различных статей исследователей США. . Одной из таких работ является [1]. В отечественной литературе, например в [2,3], отсутствует достаточно полное и ясное описание УРС JWL, что затрудняет его использование для определения некоторых характеристик ВВ и продуктов их расширения, необходимых для решения ряда прикладных задач (особенно, если задачи решаются не стандартизированными способами). При решении подобных задач часто возникает необходимость установления связи справочных значений параметров УРС с такими характеристиками, как удельные тепловые эффекты детонационных процессов: калориметрическая удельная теплота взрыва $Q_{кб}$, «непосредственно» измеряемая с использованием калориметрической бомбы, изохорно-изотермический $Q_v = Q_{TV}$, изохорно-изобарический Q_{pv} , изобарно-изотермический Q_{PT} удельные теплоты взрыва. принимает значение ориентировочно на три порядка больше чем удельный объем конденсированного ВВ v_0 .

При таких различиях удельных объемов описание свойств и характеристик «газообразных» продуктов детонации должно учитывать не только возможные различия химического состава продуктов реакции одного и того же ВВ, но и проявление неидеальности газа. УРС JWL позволяет получить представления о этом проявлении и поэтому является «предметом» анализа.

В настоящей работе показан вывод двух форм записи УРС JWL, соответствующей общеизвестному подходу Ми-Грюнайзена, согласно которому давление p продуктов детонации и их удельная внутренняя энергия e (на единицу массы) содержит как тепловые (индекс Т) так и «холодные» (упругие) (индекс Х) составляющие.

В УРС JWL зависимость холодной составляющей давления и удельной внутренней энергии от удельного объема v имеют вид:

$$p_x(v) = Ae^{-R_1 v/v_0} + Be^{-R_2 v/v_0}; \quad (1)$$

$$e_x(v) = -\int_{\infty}^v p_x(v) dv$$

Где: v – удельный объем продуктов взрыва, v_0 – начальный удельный объем заряда ВВ.

Тепловые составляющие давления и удельной внутренней энергии имеют вид:

$$p_T = \frac{\omega C_v T}{v};$$

$$e_T = C_v(T - 0)$$

В этих выражениях $A, B, \omega, C_v, R_1, R_2$ – константы, определяемые по характеристикам детонационной волны в заряде ВВ заданной плотности $\rho_0 = 1/v_0$ и по характеристикам динамики радиальной скорости цилиндрической оболочки, разгоняемой продуктами детонации этого заряда ВВ.

Суммируя тепловые и холодные составляющие давления и внутренней энергии можно получить после элементарных преобразований два уравнения, соответствующие двум формам УРС JWL:

$$p = p_x(v) + \frac{\omega}{v} \int_{\infty}^v p_x(v) dv + \frac{\omega}{v} e, \quad (2)$$

$$e = -\int_{\infty}^v p_x(v) dv + C_v T$$

Подставляя (1) в (2) получим

$$p = A(1 - \frac{\omega}{R_1 v/v_0}) \exp(-R_1 v/v_0) + B(1 - \frac{\omega}{R_2 v/v_0}) \exp(-R_2 v/v_0) + \frac{\omega e}{v} \quad (3)$$

Умножив и разделив последнее слагаемое в правой части выражения (3) на v_0 , получим наиболее часто используемую в литературных источниках, особенно зарубежных, форму уравнения состояния JWL:

$$p = A(1 - \frac{\omega}{R_1 V}) \exp(-R_1 V) + B(1 - \frac{\omega}{R_2 V}) \exp(-R_2 V) + \frac{\omega E}{V}, \quad E = e/v_0 = e\rho_0$$

где: ρ_0 – начальная плотность ВВ, $V = v/v_0$.

Величину $e\rho_0$, обозначенную в справочнике [4] как E , при переводе следовало бы назвать не как величину внутренней энергии «отнесенной к объему», а как величину внутренней энергии «отнесенной к начальному объему заряда ВВ».

Значения параметров A, B, R_1, R_2, ω таковы, что при идеальной детонации на поверхности Чемпена-Жуге (CJ) выполняется условие:

$$e_{CJ} = e_0 + p_{CJ}(v_0 - v_{CJ})/2, \quad (4)$$

Где: e_{CJ} – удельная внутренняя энергия продуктов детонации на поверхности

Чемпена-Жуге (C-J), e_0 – константа, равная начальному значению удельной энергии (с учетом химической составляющей) ВВ, находящегося перед детонационным фронтом в нормальном стандартном состоянии $p=p_0, v=v_0, T=T_0$. Из последнего

выражения следует, что e_0 следует отнести к неявно задаваемому параметру УРС JWL, так как константы – начальное значение энергии для исходного ВВ и продуктов детонации его химического превращения не могут задаваться произвольными.

Константа e_0 равна энергии (отнесенной к единице массы заряда ВВ), выделяющейся в зоне реакции перед поверхностью С-Ј, или на поверхности С-Ј.

В справочнике [4] вместо e_0 приводятся значения величины $E_0 = e_0 \rho_0$, имеющей размерность давления.

Следует заметить, что соотношение (4) существенно отличается от выражения для e_{CJ} , приведенного в [2,3]. Если для e_{CJ} принять условие, приведенное в [2,3], а не выражение (4), то рассчитываемая с использованием УРС JWL скорость детонации получается существенно большей, чем экспериментально определяемая величина.

Константа e_0 подбирается таким образом, чтобы уравнение JWL позволяло воспроизводить в расчетах значения таких экспериментально определяемых параметров, как скорость детонации, давление и массовая скорость продуктов детонации (на поверхности С-Ј), но не теплоты взрыва, которая находится «непосредственно» с использованием калориметрических бомб ($Q_{кб}$).

Представляет большой интерес для исследований прикладного характера различных взрывных процессов [2] связь константы e_0 как с калориметрической теплотой взрыва $Q_{кб}$, так и с изохорно-изотермической $Q_v = Q_{tv}$, изохорно-изобарической Q_{pv} , изобарно-изотермической Q_{pt} удельными теплотами взрыва. При установлении этой связи предполагается неизменность химического состава продуктов детонационного превращения ВВ при их различных конечных состояниях, но в то же время значительное и недостаточно подробно изученное проявление неидеальности состояния «газообразных» продуктов детонации.

Связь параметров УРС JWL (включая параметр e_0) с теплотой взрыва $Q_{кб}$, определяемой с помощью калориметрической бомбы, с $Q_v = Q_{tv}$ и с Q_{pv} находится из условия сохранения энергии систем при переходе ее из начального в конечное состояние. Система в начальном состоянии характеризуется массой и теплоемкостью калориметра с недеформируемым корпусом и навеской ВВ массой $m_{ВВ}$, плотностью ρ_0 , находящейся под давлением p_0 и температуре T_0 (такой же как у калориметра).

В конечном состоянии система характеризуется тем, что масса калориметра за счет теплопередачи от образовавшихся продуктов детонации нагревается до температуры T_k , а удельная внутренняя энергия охлажденных продуктов детонации определяется конечными значениями давления p_k и удельного объема v_k .

Из этого условия следует:

$$Q_{кб} = e_0 - (e_x(v_k) + C_v T_0), v_k = v_{кб}, T_k \approx T_0$$

$$Q_v = Q_{vt} = e_0 - (e_x(v_k) + C_v T_0), v_k = v_0 = 1/\rho_0, T_k \approx T_0$$

$$Q_{pv} = e_0 - (e_x(v_k) + (p_0 - p_x(v_k))v_k / \omega), v_k = v_0 = 1/\rho_0, p_k = p_0$$

$$Q_{pt} = Q_v + (e_x(v_k) - e_x(v_{p_0 T_0})), p_k = p_0, T_k \approx T_0$$

где $v_{p_0 T_0}$ – решение уравнения $p_0 = p_x(v_{p_0 T_0}) + \omega C_v T / v_{p_0 T_0}$

В работе были проведены вычисления скорости детонации D зарядов ВВ с плотностью ρ_{0LD} , пониженной относительно плотности заряда ρ_0 , для которой определены параметры УРС JWL (и приведены в литературных источниках). При

этих вычислениях предполагалось, что зависимость холодного давления от удельного объема $p_x(v)$, построенная по результатам экспериментов с зарядом плотностью ρ_0 , остается неизменной и при детонации заряда пониженной плотности ρ_{0LD} , если химический состав продуктов детонации обоих зарядов, несмотря на различия давлений и температур на поверхности С-Ж, одинаков. Уравнения детонационной адиабаты и уравнение прямой Михельсона-Релея (вытекающее из уравнений сохранения массы и изменения импульса) в этом приближении имеют вид, соответственно:

$$p = A\left(1 - \frac{\omega}{R_1 v / v_0}\right) \exp(-R_1 v / v_0) + B\left(1 - \frac{\omega}{R_2 v / v_0}\right) \exp(-R_2 v / v_0) + \frac{\omega(e_0 + p(1/\rho_{0LD} - v))}{v}$$

,

$$p = (D\rho_{0LD})^2(1/\rho_{0LD} - v)$$

При получении замкнутой системы уравнений, необходимой для нахождения D , используется правило отбора скорости детонации в виде условия касания прямой Михельсона-Релея и графика детонационной адиабаты.

Зависимость скорости детонации от начальной плотности заряда рассчитывалась для состава С4 (91% гексогена, 5,3 % диэтиленгексила (diethylhexyl), 2,1%полиизобутилена, 1,6% моторного масла) и сопоставлялась с экспериментальными данными для зарядов из «чистого» гексогена и зарядов из смеси порошкообразного гексогена с мипорой (мочевиноформальдегидной смолы в диспергированном высокопористом состоянии) в массовом соотношении 91/9.

Значения параметров зависимости $p_x(v) - A, B, R_1, R_2, v_0$ а так же коэффициент

Грюнайзена брались такими же как для состава С4 с начальной плотностью $\rho_0 = 1/v_0 = 1,62/\text{см}^3$.

При плотностях зарядов $\rho_{0LD} \leq \rho_0$ расчетная зависимость $D = D(\rho_{0LD})$ удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными, если $\rho_{0LD} \geq 1 \text{ г/см}^3$. При $\rho_{0LD} < 1 \text{ г/см}^3$ сначала наблюдается количественное усиление рассогласования расчетных и экспериментальных результатов, а за тем с дальнейшим уменьшением начальной плотности заряда расчетная скорость детонации начинает увеличиваться.

Обнаруживаемое усиление рассогласования расчетных и экспериментальных результатов можно объяснить следующим образом. С уменьшением начальной плотности заряда ВВ происходит столь значительное изменение давлений и температуры в детонационном фронте, что изменяется состав продуктов детонации на поверхности Чепмена-Жуге.

Список литературы:

- 1) Urtiew P.A., Hays B. Parametric study of the Dinamic JWL – EOS for detonation products. ФГВ №4. 1991. с. 126-127;
- 2) Физика взрыва / Под редакцией Л.П. Орленко. – Изд. 3-е, испр. – в 2 т. Т1. – М.: Физмалит, 2004. – 832 с – SBN5 – 9221 – 0219 – 2.
- 3) Орленко Л.П. « Физика взрыва и удара. Учебное пособие для вузов » - М.: Физмалит, 2006. – 304с.
- 4) Dobratz B.M. LLNL explosives handbooh – properties of chemical – explosives and explosive stimulants, UCRL – 52997. – Livermore, (CA), 1981.

- 5) Андреев С.Г., Соловьев В.С. Основы теории взрывных превращений энергетических материалов. М.: ЦНИИНТИ, 1984. - 250 с.