

Изменение температуры продуктов детонации скважинного заряда эмульсионного взрывчатого вещества

Горинов С. А.^{1*}, Тагиев С. М.²

¹ ООО «Глобал Майнинг Эксплозив-Раша», г. Москва, Россия

² ООО «КРУ-Взрывпром», г. Кемерово, Россия

*e-mail: akaz2006@yandex.ru

Реферат

Введение. Рассмотрены вопросы, связанные с изучением изменения температуры продуктов детонации (ПД), образующихся при взрыве скважинного заряда эмульсионного взрывчатого вещества (ЭВВ), в период их расширения в скважине в зависимости от времени, что позволяет оценить возможность воспламенения угольной пыли при контакте с ПД в период формирования взрывной полости.

Цель работы. Для повышения безопасности взрывных работ при добыче угля с использованием ЭВВ разработать методику определения температуры ПД, образующихся при взрыве скважинных зарядов ЭВВ, в период их расширения в скважине в зависимости от времени.

Методология. В основу методики расчета температуры ПД, образующихся при взрыве скважинного заряда ЭВВ, в период их расширения в скважине в зависимости от времени положены аналитические исследования, основанные на закономерностях как расширения ПД при взрыве ЭВВ, так и расширения скважины, базирующиеся на зонной теории действия взрыва заряда в твердой среде. В качестве модели, описывающей закономерности расширения ПД, принята модель политропического газа с показателем, представленным непрерывной функцией от текущей плотности ПД.

Результаты. Представлена методика определения температуры ПД, образующихся при взрыве скважинных зарядов ЭВВ, в период их расширения в скважине в зависимости от времени. Показано, что при нижнем иницировании зарядов влияние расстояния от места иницирования на скорость снижения температуры ПД сказывается на удалении менее 5 м и только в начальный период расширения ПД (в течении первых 50–100 мкс). С возрастанием времени с момента прихода детонационной волны в любое сечение заряда скорость снижения температуры ПД со временем становится независимой от места расположения сечения по длине заряда. Выявлено сильное влияние температуры взрыва ЭВВ на размеры частиц, способных к воспламенению при контакте с ПД на начальной стадии расширения последних, поэтому для снижения опасности возгорания малообводненных угольных пластов рекомендовано применять ЭВВ с температурой взрыва не выше 1800 К.

Выводы. Полученные в статье закономерности позволяют повысить безопасность взрывных работ при добыче угля с использованием ЭВВ.

Ключевые слова: эмульсионное взрывчатое вещество; продукты детонации; температура продуктов детонации; воспламенение угольной пыли; взрывчатое разложение.

Введение. Эмульсионные взрывчатые вещества (ЭВВ) благодаря своей водостойкости, относительной безопасности, экономичности и хорошим взрывным способностям нашли широкое распространение при добыче твердых полезных ископаемых [1].

Для рационального применения данных взрывчатых веществ (ВВ) требуется знание их термодинамических характеристик, каковыми обычно являются теплота

взрыва и(или) начальное детонационное давление. Поэтому оценка данных параметров наряду со скоростью детонации является наиболее востребованной при разработке эффективных технологических методов применения ЭВВ [2].

Однако при добыче угля с использованием взрывных технологий возникает опасность возгорания угля (угольной пыли) и горючих газов [3], для детального анализа условий воспламенения которых необходимо знание закономерностей изменения температуры продуктов детонации (ПД) после взрыва заряда ВВ. Аналитическое описание данных изменений определяется термохимическими характеристиками процесса и уравнением состояния взрывных газов [4].

Известны два метода определения детонационных параметров ВВ: Ландау–Станюковича, основанный на теоретически обоснованной политропической зависимости давления детонации от удельного объема ПД [5], и метод Камлета, являющийся эмпирическим обобщением опытных данных [6]. Однако эти методы направлены преимущественно на определение скорости детонации и детонационного давления.

Теоретическая оценка температуры ПД ВВ обычно осуществляется с использованием следующих методов:

- JWL-метод (Джонса–Вилкенса–Ли), основанный на полуэмпирическом уравнении состояния ПД с последующей подгонкой коэффициентов в данном уравнении к эмпирическим данным [4];

- ВКВ-метод (Беккера–Кистяковского–Вильсона), в основе которого также лежит полуэмпирическое уравнение состояния ПД, характеристические параметры которого определяются на основе экспериментальных данных (*Mader C. Detonation performance calculations using the Kistiakowsky-Wilson equation of state. Report No. LA-2613 of Los Alamos Scientific Laboratory, 1961.*);

- метод Кешаварца, основанный на подборе простых зависимостей между параметрами ВВ и взрывных газов, при которых наблюдаются относительно малые отклонения экспериментальных и расчетных значений [7];

- метод Нобла–Абеля, в котором используется модифицированное для высоких давлений и плотностей уравнение Ван-дер-Ваальса для реальных газов [8].

Анализ практики применения **JWL-метода** для расчета термодинамических параметров ПД ВВ показывает, что его корректность обеспечивается подбором значений подгоночных параметров в уравнениях состояния для соответствия экспериментальным данным, полученным в опытах «тест-цилиндра». Последнее осуществимо лишь для зарядов ВВ, имеющих малый диаметр. Данное обстоятельство обуславливает преимущественное применение JWL-метода для описания детонации индивидуальных ВВ. При этом необходимо отметить, что в работе [9] описано определение JWL-параметров для аммонита 6 ЖВ с проведением опыта «тест-цилиндр» для заряда диаметром 60 мм. Эксперименты «тест-цилиндр» для зарядов ЭВВ 100 мм, выполненные на уникальном оборудовании, были направлены на оценку работоспособности ЭВВ путем измерения энергии Гарнея и для оценки JWL-параметров не использовались [10].

В работе [11] показано, что применение **ВКВ-метода** для описания детонации ЭВВ дает значительные расхождения с экспериментальными данными. Данное обстоятельство авторы [11] связывают с сильным влиянием структуры ЭВВ на детонационные процессы, что не отражено в ВКВ методе. Однако в работе [12] при изучении детонации ЭВВ, сенсibilизированного стеклянными микросферами, использовали ВКВ-метод. Для этого в параметры уравнения состояния вносились коррективы, отражающие результаты выполненных опытов «тест-цилиндр».

Опыты «тест-цилиндр» удалось реализовать вследствие малого критического диаметра рассматриваемых ЭВВ, при использовании наливных ЭВВ, имеющих значительный критический диаметр, это практически неосуществимо.

Метод Кешаварца [7], основанный на подборе простых зависимостей между параметрами ВВ и взрывных газов, направлен на упрощение расчетов термодинамических параметров индивидуальных ВВ, термодинамические характеристики которых хорошо известны, поэтому для определения параметров детонации ЭВВ непригоден.

Применение **метода Нобла–Абеля** [8] допускается когда не требуется высокая точность в определении параметров детонации ВВ, особенно для относительно низкоплотных ВВ, каковыми являются ЭВВ. Однако в этом случае большое значение приобретает правильная оценка величины коволюма ПД [13], так как расчеты при грубом определении химического состава ПД и их коволюма [14] приводят к получению значений температуры продуктов взрыва ЭВВ, значительно отличающихся от экспериментальных данных [15].

Актуальность. Отсутствие общепринятой методики определения закономерностей изменения температуры ПД после взрыва скважинного заряда ЭВВ делает актуальными и важными для детализации мер безопасности при взрывании угольных массивов с использованием ЭВВ оценочные расчеты данных изменений температуры, представленные в настоящей работе.

Результаты исследований. Положим, что при детонации цилиндрического заряда ЭВВ массой M , имеющего диаметр больше предельного, происходит химическая реакция согласно уравнению (состояние ПД в точке Чемпена–Жуге):

$$\sum a_m A_m = \sum b_i X_i + \sum f_j Y_j,$$

где a_m, b_i, f_j – мольные коэффициенты; A_m – начальные вещества; X_i – газообразные продукты взрыва; Y_j – твердотельные продукты взрыва.

Тогда, пренебрегая потерями тепла в процессе непосредственного детонационного разложения ВВ, на основании уравнения теплового баланса имеем следующее равенство:

$$(T_B - T_0)R \left[\sum b_i \bar{c}_V^{(X_i)}(T_B) + \sum f_j \xi_j \right] = M Q_V, \quad (1)$$

где T_0, T_B – начальная температура ВВ и температура взрыва ВВ (температура, которую приобретают ПД при мгновенном выравнивании давления); R – универсальная газовая постоянная; $\bar{c}_V^{(X_i)}$ – относительная мольная теплоемкость, $\bar{c}_V^{(X_i)} = C_V^{(X_i)} / R$, $C_V^{(X_i)}$ – мольная теплоемкость X_i -газа при температуре T_B , определяемая на основании соотношений Эйнштейна–Дебая [5]; ξ_j – количество атомов в твердотельном Y_j -веществе; Q_V – удельная теплота взрыва.

Разрешая (1) методом итераций, определяем T_B [16].

Неидеальность детонации ЭВВ, обусловленная влиянием внутренней структуры данных ВВ на протекание детонационного процесса, относительно невысокие плотности ЭВВ и величины детонационного давления (практически значимая область плотностей ЭВВ находится в пределах 0,9–1,3 г/см³, а начальное детонационное давление обычно имеет значение 7–10 ГПа [1, 16]) позволяют при оценке изменений температуры продуктов детонации в ходе их расширения полагать,

что внутренняя энергия ЭВВ определяется преимущественно ее тепловой составляющей. Тогда зависимость температуры ПД ЭВВ от их удельного объема можно записать в виде [4, 5]:

$$T = T_{\text{н}} (\rho/\rho_{\text{н}})^{g(\rho)}, \quad (2)$$

где $T_{\text{н}}$, T – начальная температура ПД и их текущая температура, соответственно; $\rho_{\text{н}}$, ρ – начальная плотность продуктов взрыва и их текущая плотность, соответственно; $g(\rho)$ – аналог коэффициента Грюнайзена ПД [4], $g(\rho) = G(\rho) - 1$, $G(\rho)$ – показатель изэнтропы, функционально зависящий от плотности ПД.

Согласно [4, 5] $G(\rho)$ должно удовлетворять следующим граничным условиям:

$$G(\rho \rightarrow \rho_{\text{н}}) = k \text{ и } G(\rho \rightarrow 0) = \gamma, \quad (3)$$

где k и γ – коэффициенты политропы при плотностях ПД, близких к $\rho_{\text{н}}$, и адиабаты при малых значениях плотности ПД, соответственно [17].

При оценке изменения температуры ПД ЭВВ в качестве показателя изэнтропы принимаем удовлетворяющую условиям (3) функцию $G(\rho)$:

$$G(\rho) = \gamma + (k - \gamma)\rho/\rho_{\text{н}}. \quad (4)$$

Согласно [5], $T_{\text{н}} = 2kT_{\text{в}}/(k + 1)$ и $\rho_{\text{н}} = (k + 1)\rho_0/k$, где ρ_0 – начальная плотность ВВ. Тогда на основании (2), (4) получаем следующую зависимость температуры ПД от их плотности (удельного объема):

$$T/T_{\text{в}} = 2(\rho_0/\rho)[k\rho/(k + 1)\rho_0]^G = 2(V/V_0)[kV_0/(k + 1)V]^G, \quad (5)$$

где $G = k(k - \gamma)\rho/(k + 1)\rho_0 + \gamma$; V_0 , V – начальный удельный объем ЭВВ и текущий удельный объем ПВ.

На рис. 1 представлены зависимости отношения $T/T_{\text{в}}$ от относительного удельного объема ПД (V/V_0), полученные на основании (5), при различных значениях k . Показатель адиабаты $\gamma = 1,25$. Для сравнения на этом же рисунке приведена аналогичная зависимость, полученная на основании JWL-метода при $k = 2,5$ и величине коэффициента Грюнайзена, равной 0,35.

При ведении взрывных работ на открытой разработке угольных пластов широкое распространение получила скважинная отбойка с использованием ЭВВ и нижним способом инициирования зарядов.

Рассмотрим изменение температуры ПД с течением времени по длине скважинного заряда. Введем линейную систему координат Ox с осью x , направленной вдоль оси нисходящего скважинного заряда в направлении к устью скважины. Начало координат совместим с местом инициирования заряда.

При взрыве скважинного заряда ВВ ПД участвуют в сложном движении, обусловленном как их движением вслед за фронтом детонации, так и их радиальным расширением вследствие увеличения диаметра скважины под действием давления ПД. Для изучения характера изменения температуры ПД воспользуемся уравнением (5).

Первоначально рассмотрим падение плотности ПД, обусловленное только их аксиальным движением вслед за фронтом детонационной волны.

При нижнем инициировании скважинного заряда детонационная волна распространяется вверх по заряду, при этом движение ПД вслед за фронтом детонационной волны описывается следующими уравнениями [5].

I. На участке $0 \leq x \leq Dt / 2$:

$$u = 0; \quad c = D / 2. \tag{6}$$

II. На участке $Dt / 2 \leq x \leq Dt$:

$$\begin{cases} x = (c + u)t; \\ 2c / (k + 1) - u = D / (k - 1), \end{cases} \tag{7}$$

где x – расстояние от начала координат до рассматриваемого сечения; D – скорость детонации; t – текущее время (начало отсчета – момент инициирования заряда); u – массовая скорость ПД в данном сечении; c – скорость распространения звука в ПД в данном сечении.

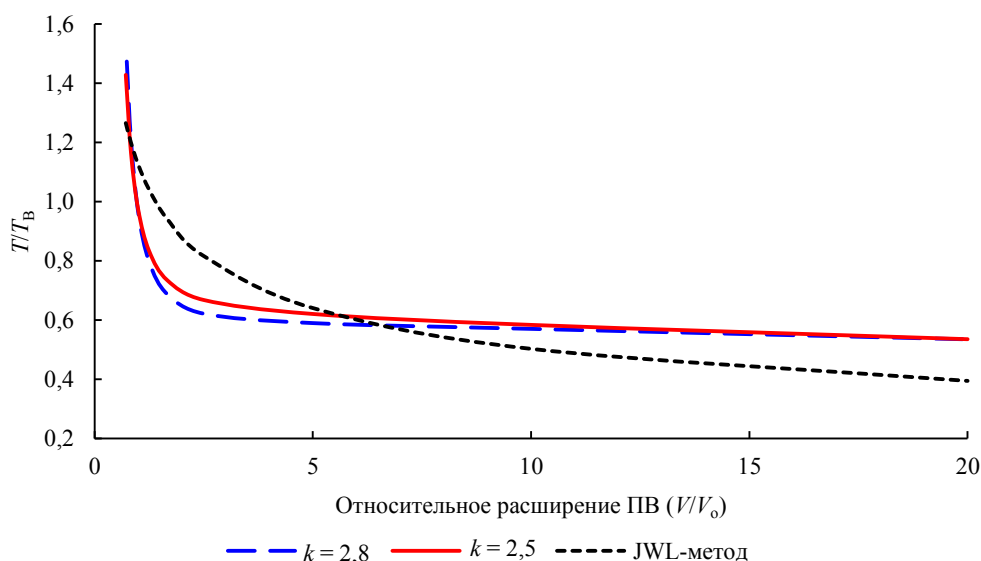


Рисунок 1. Зависимости T/T_B от относительного расширения ПД при разных значениях k (показатель $\gamma = 1,25$)

Figure 1. Dependences of T/T_B on detonation products relative expansion under different values of k (index $\gamma = 1.25$)

Согласно [5], для ПД выполняется равенство

$$\rho / \rho_n = (c / c_n)^{\frac{2}{k-1}}, \tag{8}$$

где c_n – скорость звука в ПД, имеющих плотность ρ_n , $c_n = kD / (k + 1)$.

На основании (5)–(8), учитывая, что массовая скорость за фронтом детонационной волны $u_n = D / (k + 1)$, определяем плотности ПД, изменение которых обусловлено аксиальным движением ПД вслед детонационной волне.

I. На участке $0 \leq x \leq Dt / 2$, представляющем область стационарного состояния ПД до прихода аксиальной волны разряжения, возникающей в ПД после детонации всего заряда:

$$\rho_1 = 2\rho_0 \left[(k + 1) / 2k \right]^{\frac{k+1}{k-1}}. \tag{9}$$

II. На участке $Dt / 2 < x \leq Dt$:

$$\rho_{II} = [(k+1)\rho_0 / k] \left[(1/k) + (k-1)x / (kDt) \right]^{2/k-1}. \quad (10)$$

Однако падение плотности ПД в скважине происходит также вследствие их радиального расширения. Определим на основании газодинамических решений для скользящей детонационной волны, представленных в работе [16], начальную скорость стенок скважины w_0 в перпендикулярном к оси заряда направлении:

$$w_0 = \left(2k / (k^2 - 1) \right) \left\{ 1 - [(k+1)(A + Bw_0)\rho_{cp}w_0 / (\rho_0 D^2)]^{2k/k-1} \right\}, \quad (11)$$

где ρ_{cp} , A , B – плотность и параметры ударной адиабаты среды, окружающей заряд, соответственно.

Радиус расширяющейся скважины r :

$$r = r_0 + \bar{w}t, \quad (12)$$

где r_0 , $\bar{w} = w_0/2$ – начальный радиус скважины и средняя скорость расширения скважины, соответственно. Уравнение (12) выполняется при $0 \leq t \leq \tau_*$, где τ_* – время достижения максимального расширения скважины на основании,

$$\tau_* = 2(r_* - r_0) / w_0, \quad (13)$$

где r_* – максимальный радиус скважины.

В соответствии с (5), (9)–(13) отношение температуры ПД в сечении заряда, имеющем координату x , в момент времени $t = x/D + \tau$ (x/D – время прихода детонационной волны в сечение x) к температуре взрыва равно следующему.

I. При $\tau \leq x \leq D$ (до прихода стационарной волны):

в случае $0 \leq \tau \leq 2(r_* - r_0) / w_0$

$$T(x, \tau) / T_B = (2k / (k+1)) \left\{ \left[(1/k) + (k-1)x / (k(x + D\tau)) \right]^{2/k-1} \left[r_0 / (r_0 + \bar{w}\tau) \right]^2 \right\}^G; \quad (14)$$

в случае $\tau > 2(r_* - r_0) / w_0$

$$T(x, \tau) / T_B = (2k / (k+1)) \left\{ \left[(1/k) + (k-1)x / (k(x + D\tau)) \right]^{2/k-1} \left[r_0 / r_* \right]^2 \right\}^G. \quad (15)$$

II. При $x / D < \tau < 3(L - x) / D$ (после прихода в сечение x стационарной волны, но до прихода аксиальной волны разряжения, L – длина заряда):

$$T(x, \tau) / T_B = (2k / (k+1)) \left\{ [(k+1) / 2k]^{2/k-1} (r_0 / r_*)^2 \right\}^G. \quad (16)$$

Для того, чтобы воспользоваться уравнениями (14)–(16), необходимо определить значение максимального радиуса скважины r_* [18, 19].

Согласно [19]:

$$r_* = r_o (P_*/P_m)^{\frac{1}{2k}},$$

где P_* – среднее детонационное давление, $P_* = \rho_o D^2 / 2(k+1)$; P_m – давление, удерживаемое средой, $P_m = -C \operatorname{ctg} \varphi + (C \operatorname{ctg} \varphi + \sigma_{\text{сж}}) \left(\mu / \left[\sigma_{\text{сж}} \left(1 + \ln \left(\sigma_{\text{сж}} / \sigma_p \right) \right) \right]^{\frac{\sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} \right)$, C – сцепление; φ – угол внутреннего трения; μ – модуль сдвига среды; $\sigma_{\text{сж}}$, σ_p – пределы прочности среды на сжатие и разрыв, соответственно.

В качестве примера рассмотрим взрыв скважинного заряда ЭВВ 200 мм в угольном массиве. Примем следующие значения параметров, характеризующих ЭВВ и угольные массивы:

- ЭВВ [16] – $\rho_o = 1150 \text{ кг/м}^3$; $D = 4800 \text{ м/с}$; $k = 2,7$; $\gamma = 1,25$;
- уголь [20, 21] – $C = 5,5 \text{ МПа}$; $\varphi = 36^\circ$; $\mu = 5 \text{ ГПа}$; $\sigma_{\text{сж}} = 15,0 \text{ МПа}$; $\sigma_p = 2,0 \text{ МПа}$;
- $A = 1800 \text{ м/с}$; $B = 0,9$.

Результаты расчетов по уравнениям (14)–(16) представлены в виде зависимостей отношения температуры ПД к температуре взрыва от времени прихода детонационной волны в различные сечения скважинного заряда на рис. 2.

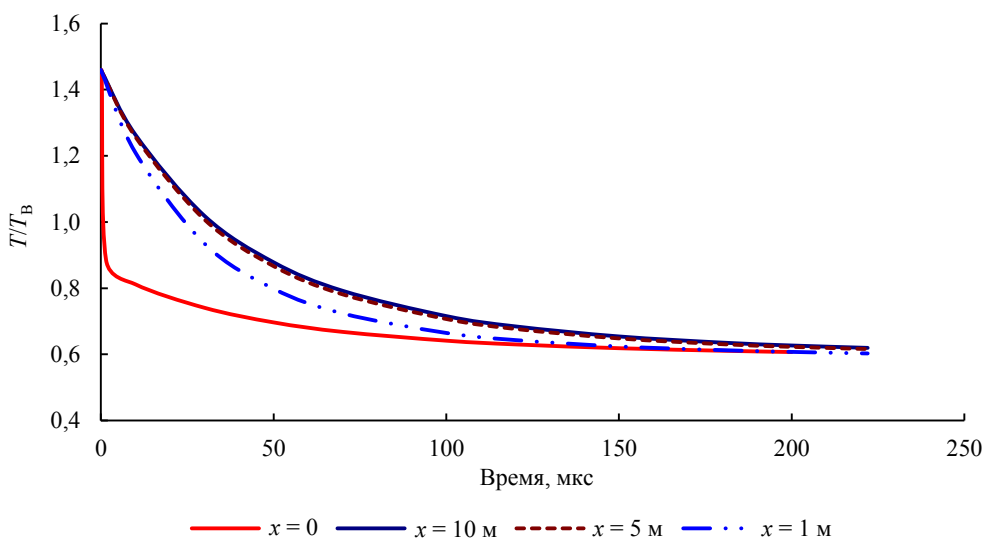


Рисунок 2. Зависимости отношения температуры ПД к температуре взрыва от времени прихода детонационной волны в разные сечения скважинного заряда

Figure 2. Dependence of detonation products and explosion temperatures ratio on the time of the detonation wave arrival at various borehole charge sections

Анализ рис. 2 показывает, что при $\tau > 100$ мкс влияние координаты x на величину температуры ПД становится незначительным.

Оценим возможность воспламенения угольной пыли во время взрыва рассматриваемого заряда при непосредственном контакте с ПД.

Согласно экспериментальным данным, температура взрыва ЭВВ имеет величину 1800–2200 К [15]. Время прогрева частиц угольной пыли до воспламенения летучих при температуре окружающей частицу газовой среды $T_{\text{ч}} \geq 1200 \text{ К}$ и низкой концентрации кислорода (10 % и менее) для широкого круга углей удовлетворяет эмпирическому уравнению [22]:

$$\tau_{в.л} = K_{в.л} \cdot 5,3 \cdot 10^{14} T_{ч} \cdot \delta^{0,8},$$

где $K_{в.л}$ – эмпирический коэффициент, изменяющийся в пределах 0,6–1,4 в зависимости от месторождения; δ – размер частицы.

На рис. 3 представлены зависимости размеров частиц угольной пыли, способных воспламениться от контакта с ПД ЭВВ, от времени прихода детонационной волны в данное сечение скважинного заряда для разных значений температуры взрыва. При расчетах полагали, что $K_{в.л} = 0,8$ (среднее значение для кузбасских углей [22]) и температура среды, окружающей частицу, составляет не меньше 1200 К.

Анализ зависимостей, изображенных на рис. 3, показывает сильное влияние температуры взрыва ЭВВ на размеры частиц, способных к воспламенению при контакте с ПД на начальной стадии их расширения. Учитывая, что масса фракции угольных частиц с размером не более заданного резко уменьшается с уменьшением данного размера, для снижения опасности возгорания массивов целесообразно уменьшать массу потенциально способных к возгоранию частиц. Для этого при отработке малообводненных угольных пластов Кузбасса можно рекомендовать к применению ЭВВ с температурой взрыва не выше 1800 К.

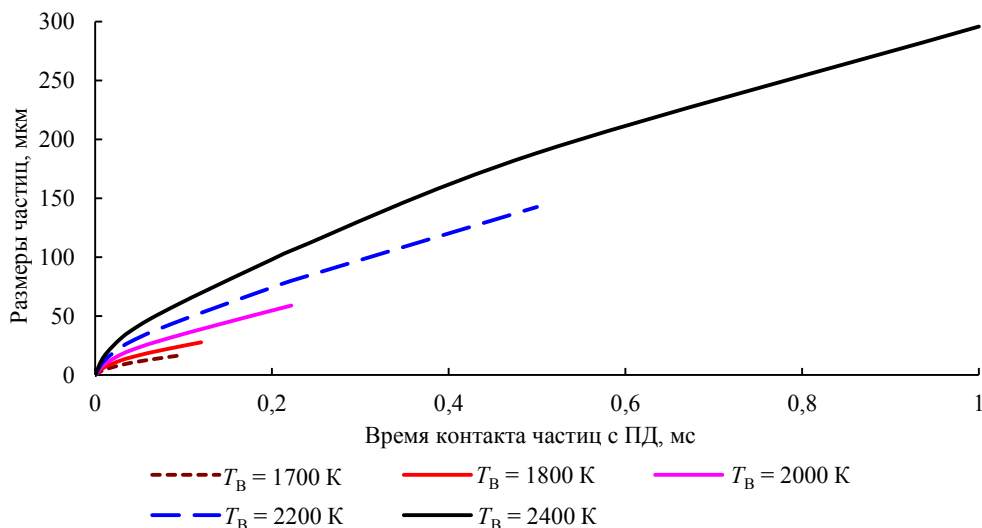


Рисунок 3. Зависимости размеров частиц угольной пыли, способных воспламеняться от контакта с ПД ЭВВ, во время расширения взрывной полости при разных температурах взрыва

Figure 3. Dependences of the sizes of coal dust particles capable of igniting upon contact with emulsion explosive detonation products during the explosive chamber expansion at different explosion temperatures

Последнее достигается выбором соответствующего рецептурного состава ЭВВ. Однако данный вопрос выходит за рамки настоящей работы.

Заключение. В работе представлена методика определения температуры ПД, образующихся при взрыве скважинных зарядов ЭВВ, при их расширении в скважине в зависимости от времени.

Показано, что при нижнем инициировании зарядов влияние расстояния от места инициирования на скорость снижения температуры ПД сказывается на удалении менее 5 м и только в начальный период расширения ПД (в течении первых 100 мкс). С возрастанием времени с момента прихода детонационной волны в любое сечение заряда скорость снижения температуры ПД со временем становится одинаковой по всей длине заряда.

Показано сильное влияние температуры взрыва ЭВВ на размеры частиц, способных к воспламенению при контакте с ПД на начальной стадии их расширения, поэтому для снижения опасности возгорания угольных массивов рекомендовать к применению ЭВВ с температурой взрыва не выше 1800 К. Последнее достигается выбором соответствующего рецептурного состава ЭВВ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Wang Xuguang. Emulsion explosives. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994. 380 p.
2. Козырев С. А., Власова Е. А., Соколов А. В. Оценка фактических энергетических характеристик эмульсионных взрывчатых веществ по данным экспериментального определения скорости детонации // Горный журнал. 2020. № 9. С. 47–53. DOI: 10.17580/gzh.2020.09.06
3. Калаякин С. А. Безопасность взрывных работ в газоносных массивах угольных шахт. Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2012. 524 p.
4. Валько В. В., Образ О. П., Гасилов В. А., Соловьева В. С., Савенко Н. О. Уравнения состояния продуктов детонации взрывчатых веществ. М.: ИПМ им. М. В. Келдыша, 2021. 39 с. DOI: 10.20948/prgr-2021-51
5. Баум Ф. А., Станюкович К. П., Шехтер Б. И. Физика взрыва. М.: Физматгиз, 1959. 800 с.
6. Kamlet M. J., Jacobs S. J. Chemistry of detonation. I. A simple method for calculating detonation properties of C-H-N-O explosives // Journal of Chemical Physics. 1968. Vol. 48. P. 23–35. DOI: 10.1063/1.1667908
7. Keshavarz M. H., Jafari M., Ebadpour R. Simple method to calculate explosion temperature of ideal and non-ideal energetic compounds // Journal of Energetic Materials. 2019. Vol. 38. No. 4. P. 1–8. DOI: 10.1080/07370652.2019.1679284
8. Le Metayer O., Saurel R. The Noble-Abel stiffened-gas equation of state // Physics of Fluids. 2016. Vol. 28. No. 4. P. 1–33. DOI: 10.1063/1.4945981.hal-01305974f
9. Селезнев А. А., Исаков А. М., Устимкин П. А., Зоткин С. П. Определение параметров УРС JWL для промышленного ВВ 6ЖВ на основе данных цилиндр-теста // Экстремальное состояние вещества. Детонация. Ударные волны: тезисы докладов XXIII Харитоновских чт. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2022. С. 65–69.
10. Nyberg U., Arvanitidis L., Olsson V., Ouchterlony F. Large size cylinder expansion tests on ANFO and gassed bulk explosives // Explosives and Blasting Technique. Lisse: Swets @ Zeitlinger. 2003. P. 181–213. DOI: 10.1201/9781439833476.ch23
11. Lee J., Persson P. A. Detonation behaviour of emulsion explosives // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 1990. Vol. 15. No. 5. P. 208–216.
12. Paplinski A., Marena A. Investigation of the influence of cooling salts upon the explosive performance of emulsion explosives // Central European Journal of Energetic Materials. 2015. No. 12(3). P. 523–535.
13. Кук М. А. Наука о промышленных взрывчатых веществах. М.: Недра, 1980. 453 с.
14. Меньшиков П. В., Сеницын В. А., Шеменов В. Г. Определение детонационного давления и температуры взрыва промышленных эмульсионных взрывчатых веществ, применяемых на карьерах Урала // Advances in Current Natural Sciences. 2017. № 7. С. 96–102.
15. Silvestrov V. V., Bordzilovskii S. A., Karakhanov S. M., Plastinin A. V. On possibility detonation products temperature measurements of emulsion explosives // Archives of Metallurgy and Materials. 2014. Vol. 59. Issue 3. P. 1151–1154. DOI: 10.2478/amm-2014-0200
16. Горинов С. А. Иницирование и детонация эмульсионных взрывчатых веществ. Йошкар-Ола: Стринг, 2020. 214 с. DOI: 10.25625/y1981-6651-8304-y
17. Дубовик А. В. Низкоскоростные детонационные волны при незавершенной реакции в конденсированных веществах // Детонация. Критические явления, физико-механические превращения в ударных волнах. Черноголовка: ОИХФ АН СССР, 1978. С. 30–34.
18. Горинов С. А. Критерий газоразрыва скальных горных пород при взрыве скважинного заряда ВВ // Известия вузов. Горный журнал. 2009. № 6. С. 64–70.
19. Друкованый М. Ф., Кравцов В. С., Чернявский Ю. Е., Шеленок В. В., Рева И. П., Зверьков С. Н. Расчет зон разрушения при взрыве цилиндрических зарядов в скальных породах // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1976. № 3. С. 70–75.
20. Распределение и корреляция показателей физических свойств горных пород / под ред. М. М. Протодяконова. М.: Недра, 1981. 192 с.
21. Соболев В. В., Куливар В. В., Мельников Д. В., Кириченко А. Л. Оценка параметров ударного сжатия породы при контактом взрыве заряда взрывчатого вещества // Перспективы розвитку будівельних технологій: матеріали 12-ї Міжнарод. наук.-практич. конф. молодих вчених, аспірантів і студентів, 20 квітня 2018 р. Дніпро: НГУ. 2018. С. 132–135.
22. Бабий В. И., Куваев Ю. Ф. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. М.: Энергоиздат, 1986. 208 с.

Сведения об авторах:

Горинов Сергей Александрович – доктор технических наук, консультант ООО «Глобал Майнинг Эксплозив-Раша». E-mail: akaz2006@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8721-6215>

Тагиев Сенан Мехманович – начальник управления по производству ВВ ООО «КРУ-Взрывпром». E-mail: tagiev_senan@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0006-9183-9298>

DOI: 10.21440/0536-1028-2023-5-38-48

Temperature change of detonation products of emulsion explosive blasthole chargeSergei A. Gorinov¹, Senan M. Tagiev²¹ Global Mining Explosive-Russia, LLC, Moscow, Russia.² KRU-Vzryvprom, LLC, Kemerovo, Russia.**Abstract**

Introduction. The article considers studying the temperature change of detonation products (DP) formed at emulsion explosive (EE) borehole charge explosion during its expansion in the borehole depending on time. It allows to assess the possibility of coal dust ignition upon contact with DP during explosive chamber formation.

Research objective is to develop a method for determining the temperature of DP which form under EE borehole charges explosion during their expansion in the borehole depending on time. The method is aimed at improving the safety of blasting when mining coal using EE.

Methods of research. The method for determining the temperature of DP which form under EE borehole charges explosion during their expansion in the borehole depending on time is based on analytical studies. The studies are based on the laws of both DP expansion during EE explosion and borehole expansion and rest on the zone theory of a charge explosion effect in solid environment. A polytropic gas model with an index represented by a continuous function of the current DP density is accepted as a model describing the regularities of DP expansion

Results. The method is presented for determining the temperature of DP which form under EE borehole charges explosion during their expansion in the borehole depending on time. It has been shown that under lower initiation of charges, the influence of the distance from the initiation point on the DP temperature fall rate manifests only at the distance of less than 5 m and only in the initial period of the DP expansion (during the first 50–100 μs). As the time from the detonation wave arrival moment grows in any charge section, the rate of DP temperature fall with time becomes independent of the section location along the charge length. A strong effect has been revealed of the EE explosion temperature on the size of particles capable of ignition upon contact with DP at the initial stage of expansion of the latter. It is therefore recommended to use EE with an explosion temperature of no more than 1800 K to reduce the risk of ignition of dry coal seams.

Conclusions. The regularities obtained make it possible to improve the safety of blasting in coal mining using EE.

Keywords: emulsion explosive; detonation products; temperature of detonation products; ignition of coal dust; explosive decomposition.

REFERENCES

1. Wang Xuguang. *Emulsion explosives*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994.
2. Kozyrev S. A., Vlasova E. A., Sokolov A. V. Estimation of factual energetics of emulsion explosives by experimental detonation velocity test data. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2020; 9: 47–53. (In Russ.) Available from: doi: 10.17580/gzh.2020.09.06
3. Kaliakin S. A. *The safety of blasting in gas bearing rock masses of coal mines*. Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing; 2012.
4. Valko B. B., Obraz O. P., Gasilov V. A., Solovieva V. S., Savenko N. O. *Equation of state for the explosive detonation products*. Moscow: Keldysh Institute of Applied Mathematics, KIAM. 2021. (In Russ.) Available from: doi: 10.20948/prepr-2021-51
5. Baum F. A., Staniukovich K. P., Shekhter B. I. *Explosion physics*. Moscow: Fizmatgiz Publishing; 1959. (In Russ.)
6. Kamlet M. J., Jacobs S. J. Chemistry of detonation. I. A simple method for calculating detonation properties of C-H-N-O explosives. *Journal of Chemical Physics*. 1968; 48: 23–35. Available from: doi: 10.1063/1.1667908

7. Keshavarz M. H., Jafari M., Ebadpour R. Simple method to calculate explosion temperature of ideal and non-ideal energetic compounds. *Journal of Energetic Materials*. 2019; 38(4): 1–8. Available from: doi: 10.1080/07370652.2019.1679284
8. Le Metayer O., Saurel R. The Noble-Abel stiffened-gas equation of state. *Physics of Fluids*. 2016; 28(40): 1–33. Available from: doi: 10.1063/1.4945981.hal-01305974f
9. Seleznev A. A., Isakov A. M., Ustimkin P. A., Zotkin S. P. Determining the parameters of the Jones-Wilkins-Lee (JWL) equation of state (EOS) for the 6DZhV industrial explosive based on the data from the cylinder test. In: *Extreme state of matter. Detonation. Shock waves: Sci. conf. abstracts, 23th Kharitonovsky Readings*. Sarov: VNIIEF Publishing; 2022. (In Russ.)
10. Nyberg U., Arvanitidis L., Olsson V., Ouchterlony F. Large size cylinder expansion tests on ANFO and gassed bulk explosives. *Explosives and Blasting Technique*. Lisse: Swets @ Zeitlinger. 2003. P. 181–213. Available from: doi: 10.1201/9781439833476.ch23
11. Lee J., Persson P. A. Detonation behaviour of emulsion explosives. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 1990; 15(5): 208–216.
12. Paplinski A., Marena A. Investigation of the influence of cooling salts upon the explosive performance of emulsion explosives. *Central European Journal of Energetic Materials*. 2015; 12(3): 523–535.
13. Kuk M. A. *The science of industrial explosives*. Moscow: Nedra Publishing; 1980. (In Russ.)
14. Menshikov P. V., Sinitsyn V. A., Shemenov V. G. Determination of detonation pressure and explosion temperature of industrial emulsion explosives used at ral quarries. *Advances in current natural sciences*. 2017; 7: 96–102. (In Russ.)
15. Silvestrov V. V., Bordzilovskii S. A., Karakhanov S. M., Plastinin A. V. On possibility detonation products temperature measurements of emulsion explosives. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2014; 59(3): 1151–1154. (In Russ.) Available from: doi: 10.2478/amm-2014-0200
16. Gorinov S. A. *Initiation and detonation of emulsion explosives*. Yoshkar-Ola: OOO IPF String Publishing; 2020. (In Russ.) Available from: doi: 10.25625/y1981-6651-8304-y
17. Dubovik A. V. *Low-speed detonation waves during an incomplete reaction in condensed matters. Detonation. Critical phenomena, physical and mechanical transformations in shock waves*. Chernogolovka: Branch of IPCP AS USSR Publishing; 1978. (In Russ.)
18. Gorinov S. A. The criterion of hard rock gas-rupture under the borehole explosive charge detonation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2009; 6: 64–70. (In Russ.)
19. Drukovanyi M. F., Kravtsov V. S., Cherniavskii Iu. E., Shelonok V. V., Reva I. P., Zverkov S. N. Calculating rupture zones when detonating cylindrical charges in hard rocks. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh = Journal of Mining Science*. 1976; 3: 70–75. (In Russ.)
20. Protodiakonov M. M. (ed.) *Distribution and correlation of rock physical properties indices: reference book*. Moscow: Nedra Publishing; 1981. (In Russ.)
21. Sobolev V. V., Kulivar V. V., Melnikov D. V., Kirichenko A. L. Assessing rock shock-compression parameters under the contact detonation of the explosive charge. In: *Prospects for the development of construction technologies: Proceedings of the 12th Internat. sci. and pract. conf. of young scientists, graduate students and students, April 20, 2018*. Dnipro: NSU Publishing; 2018. (In Russ.)
22. Babii V. I., Kuvaev Iu. F. *Coal dust burning and the calculation of a coal-dust flame*. Moscow: Energoizdat Publishing; 1986. (In Russ.)

Received 24 August 2023

Information about the authors:

Sergei A. Gorinov – DSc (Engineering), consultant of Global Mining Explosive-Russia, LLC. E-mail: akaz2006@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8721-6215>

Senan M. Tagiev – Head of the Explosives Manufacture Department, KRU-Vzryvprom, LLC. E-mail: tagiev_senan@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0006-9183-9298>

Для цитирования: Горинов С. А., Тагиев С. М. Изменение температуры продуктов детонации скважинного заряда эмульсионного взрывчатого вещества // Известия вузов. Горный журнал. 2023. № 5. С. 38–48. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-5-38-48

For citation: Gorinov S. A., Tagiev S. M. Temperature change of detonation products of emulsion explosive blasthole charge. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2023; 5: 38–48 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2023-5-38-48