

Код МРНТИ 52.13.21

П.В. Меньшиков, \*В.А. Кутуев, С.Н. Жариков

Институт горного дела УрО РАН (г. Екатеринбург, Россия)

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФОРМУЛ ПО РАСЧЕТУ СКОРОСТИ ДЕТОНАЦИИ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ\*

**Аннотация.** В статье представлено описание гидродинамической теории детонации и известные классические методики расчета скорости детонации на основе законов сохранения условия Чепмена-Жуге и уравнения состояния и термодинамические методы расчета скорости детонации, основанные на теплоте взрыва и составе продуктов детонации. Проведен расчет скорости детонации промышленных эмульсионных ВВ (ЭВВ) порэммит-1А, нитронит Э-70, Э-100 и фортис 70, 85, 100 по различным методам расчета предлагаемых отечественными и зарубежными учеными. Проведен сравнительный анализ расчетных значений с данными из технических условий на производство ВВ и измеренными величинами скорости детонации на карьерах в технологических скважинах, а также на полигонах испытаний взрывчатых материалов (ВМ) в гильзовых зарядах, в условиях предприятий Урала.

**Ключевые слова:** взрывчатые вещества, скорость детонации, ударная волна, продукты детонации, скорость звука, массовая скорость, теплота взрыва, плотность ВВ, температура взрыва, коволюм.

### Жарылғыш заттардың жарылу жылдамдығын есептеу формулаларын салыстырмалы талдау

**Андатпа.** Мақалада детонацияның гидродинамикалық теориясының сипаттамасы және жарылыс жылуы мен детонация өнімдерінің құрамына негізделген детонация жылдамдығын есептеудің белгілі классикалық әдістері, Чапман-Джугет шарттары мен күй теңдеулері және детонация жылдамдығын есептеудің термодинамикалық әдістері келтірілген. Отандық және шетелдік ғалымдар ұсынатын есептеудің әртүрлі әдістері бойынша порэммит-1А, нитронит Э-70, Э-100 және Фортис 70, 85, 100 өнеркәсіптік эмульсиялық ВВ (ЭВВ) детонация жылдамдығын есептеу жүргізілді. ЖВ өндірісінің техникалық шарттарынан алынған деректермен және технологиялық ұңғымалардағы карьерлерде, сондай-ақ гильзалық зарядтардағы жарылғыш материалдарды (ЖМ) сынау полигондарында, Орал кәсіпорындары жағдайында детонация жылдамдығының өлшенген шамаларымен есептік мәндерге салыстырмалы талдау жүргізілді.

**Түйінді сөздер:** жарылғыш заттар, жарылыс жылдамдығы, соққы толқыны, жарылыс өнімдері, дыбыс жылдамдығы, массалық жылдамдық, жарылыс жылуы, ВВ тығыздығы, жарылыс температурасы, коволюм.

### Comparative analysis of formulas for calculating the detonation velocity of explosives

**Abstract.** The article describes the hydrodynamic theory of detonation and the known classical methods for calculating the detonation velocity based on the Chapman-Jouguet condition and the equation of state, as well as thermodynamic methods for calculating the detonation velocity based on the heat of explosion and the composition of the detonation products. The detonation velocity of industrial emulsion explosives such as Poremite, Nitronit, Fortis was calculated using various calculation methods proposed by domestic and foreign scientists. A comparative analysis of the calculated values with data from the technical specifications for the production of explosives and measured values of the detonation velocity in quarries in technological wells, as well as in test sites for explosive materials in cartridge charges, was carried out under the conditions of enterprises in the Urals.

**Key words:** explosives, detonation velocity, shock wave, detonation products, sound velocity, mass velocity, explosion heat, explosive density, explosion temperature, covolum.

### Введение

Детонация представляет собой цепную химическую реакцию, распространяющуюся во взрывчатом веществе (ВВ) с определенной постоянной для данных параметров заряда скоростью. Скорость детонации современных промышленных ВВ изменяется от 1500 м/с (для простейших взрывчатых смесей) до 6700 м/с и более (для детонирующих шнуров и мощных промежуточных детонаторов).

Скорость детонации определяется составом ВВ, плотностью, характеристиками заряда и условиями взрыва. При одинаковых условиях скорость детонации постоянна и ее значение является максимально возможным. Это делает скорость детонации одной из важнейших характеристик ВВ.

Скорость детонации взрывчатой системы при прочих равных условиях определяется в основном удельной химической энергией (теплотой взрыва). Однако на скорость детонации и прочие характеристики детонационного процесса оказывают влияние и физические характеристики заряда: его диаметр, плотность, агрегатное состояние, размер частиц, однородность, наличие оболочек и др. Изучение зависимости скорости детонации от условий взрыва, состава и свойств ВВ позволяет сделать важные выводы о взрыве. Измеренные значения, получаемые опытным путем, можно использовать для вычисления

других параметров взрывчатого превращения и во многих случаях они могут служить характеристикой, отражающей взрывное действие ВВ при его практическом применении [1-3]. Первая математическая модель детонационной волны в газах, опирающаяся на теорию ударных волн, была разработана достаточно давно и вслед за техническим прогрессом требовала развития. У истоков стояли В. А. Михельсон, Д. Л. Чепмен, Е. Жуге.

Намного позднее развитие этой теории получило в работах Я. Б. Зельдовича, Д. Неймана и В. Деринга, независимо предложивших модель детонационной волны, учитывающую физическую зону превращения исходного ВВ в конечные продукты взрыва. Согласно этой модели, при распространении детонации вдоль заряда ВВ, вначале происходит его нагревание, а химические реакции происходят спустя определенное время. В ходе химических реакций выделяется тепло, которое приводит к дополнительному расширению газообразных продуктов взрыва и увеличению скорости их движения. Таким образом, зона химических реакций толкает ведущую ударную волну и обеспечивает ее устойчивость.

### Теория вопроса

Гидродинамическая теория детонации предполагает распространение по ВВ ударной волны, во фронте которой протекает реакция взрывчатого превращения, при этом параметры ударной волны, такие как скорость

\* Исследования выполнены в рамках Государственного задания №075-00412-22 ПП, темы 1 (2022-2024): Методологические основы стратегии комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых в динамике развития горнотехнических систем (FUWE-2022-0005), рег. №1021062010531-8-1.5.1.

и амплитуда, являются постоянными. На фронте ударной волны при сжатии в виде скачков возникает непостоянное изменение температуры, давления и плотности. Параметры состояния волны могут быть выведены согласно математическим выражениям, изложенным в [4, 5].

Для расчета скорости детонации в инженерной практике используют различные приближенные методы, основанные на полуэмпирических уравнениях состояния продуктов детонации или на корреляционных зависимостях параметров детонации от каких-либо известных свойств ВВ [4].

Все существующие методики расчета скорости детонации можно разделить на термодинамические и классические.

Термодинамические методики основаны на нахождении зависимости скорости детонации от теплоты взрыва, состава продуктов детонации и др., а классические методики основаны на решении системы уравнений, законов сохранения условия Чепмена-Жуге и уравнения состояния. Все методики учитывают в основном лишь свойства продуктов детонации и не принимают во внимание тот факт, что детонационный фронт (передняя граница зоны химической реакции) распространяется по не прореагировавшему ВВ, следовательно, скорость детонации может быть в большей степени описана свойствами заряда ВВ. Из свойств заряда ВВ, связанных с распространением по нему ударного фронта детонации, в первую очередь оказывают влияние его волновые свойства, такие, как скорость распространения звука по непрореагировавшему ВВ и в продуктах детонации. Поэтому необходимо в основном проводить оценку параметров детонации через эти показатели и теплоту взрыва ВВ.

Анализ скорости звука и скорости детонации позволяет установить некоторые закономерности их взаимосвязи. Разделив влияние упругой и тепловой составляющей давления, и энергии на скорость распространения фронта, можно выразить ее через суммарный волноэнергетический фактор. Волновую составляющую данного фактора определяет скорость звука, а тепловую – энерговыделение в зоне химической реакции, определяющее массовую скорость.

В этой плоскости ударный фронт перемещается относительно продуктов реакции со скоростью, равной местной скорости звука. В общем виде скорость детонации ВВ определяется соотношением, постулированным Е. Жуге:

$$D = U + C, \quad (1)$$

где  $U$  – массовая скорость распространения продуктов детонации за ударным фронтом;

$C$  – местная скорость звука в продуктах детонации (ПД).

На рисунке 1 в координатах давление – объем изображена детонационная волна по модели Зельдовича – Неймана, причем кривая АВ есть ударная адиабата сжатия ВВ, а кривая ЕF – продуктов детонации (адиабата Гюгонио), АВ – прямая Михельсона, а участок ВС на ней отображает зону химического пика [4, 5].

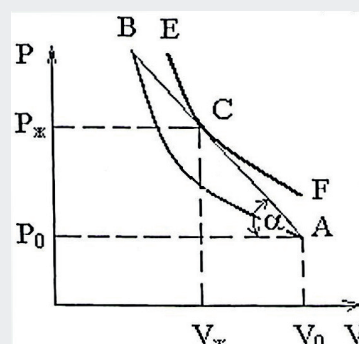


Рис. 1. P-V диаграмма детонационной волны [4, 5].  
Сурет 1. P-V детонациялық толқын диаграммасы [4, 5].  
Figure 1. P-V diagram of a detonation wave [4, 5].

В зависимости от энергетической характеристики ВВ скорость детонации может быть определена согласно [6], по формуле (2):

$$D = \sqrt{2Q(n^2 - 1)}, \text{ м/с}, \quad (2)$$

где  $Q$  – теплота взрыва при постоянном объеме, кДж/кг;  
 $n$  – показатель политропы.

Согласно Кутузову Б.Н. [7] значение  $n$  для  $Q = 4190$  кДж/кг в зависимости от начальной плотности может быть принято равным из таблицы 1.

Таблица 1  
Показатель политропы в зависимости от плотности  
Кесте 1  
Тығыздыққа байланысты политроптың көрсеткіші  
Table 1  
Polytropic exponent as a function of density

Плотность $\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	0,2	0,25	0,50	0,75	1,0	1,25	1,70
Показатель политропы $n$	1,30	1,60	2,22	2,80	3,05	3,21	3,40

Формула (2) дает завышенные результаты для конденсированных (твердых) ВВ, поэтому для приближенной оценки скорости детонации можно воспользоваться выражением (3):

$$D = D_{\text{эт}} \sqrt{\frac{Q_{\text{ВВ}}}{Q_{\text{эт}}}}, \quad (3)$$

где  $D$  – скорость детонации ВВ, м/с;

$D_{\text{эт}}$  – скорость детонации эталонного ВВ при соответствующей плотности заряжания, м/с;

$Q_{\text{ВВ}}$  – теплота взрыва ВВ, кДж/кг;

$Q_{\text{эт}}$  – теплота взрыва эталонного ВВ, кДж/кг.

Идеальная скорость детонации (максимально возможная при заданной плотности ВВ) может быть определена по формуле (4), предложенной китайскими исследователями [6]:

$$D_{\text{и}} = 2641 + 3,231\Delta\sqrt{\omega}, \quad (4)$$

где  $\Delta$  – плотность ВВ, г/см<sup>3</sup>;

$\omega$  – так называемое характеристическое произведение теплоты взрыва на объем ПВ, предложенное Берглю (1883 г.) для оценки эффективности ВВ.

$$\omega = Q_{\text{взр}} \cdot V_{\text{пв}}, \quad (5)$$

где  $Q_{\text{взр}}$  – теплота взрыва, ккал/кг;

$V_{\text{пв}}$  – объем продуктов взрыва, л.

Кривченко А.Л. [8] указывает на зависимость скорости детонации от объемной скорости звука, которая выражалась линейной функцией, складывающейся из энергетической и динамической составляющих:

$$D = 4490 + 1,5C_0, \quad (6)$$

где  $C_0$  – объемная скорость звука в исходном веществе, м/с.

Он также предлагает использовать уравнение обобщенной ударной адиабаты органического вещества для расчета скорости детонации через скорость ударного фронта, если представлять, что детонационная волна распространяется в стационарном режиме с постоянной скоростью [8]:

$$D = 1,2C_0 + 1,7U_{\phi}, \quad (7)$$

где  $U_{\phi}$  – массовая скорость на фронте процесса, м/с.

Считается, что фронт детонационной волны, распространяющийся по непрореагировавшему ВВ, фактически является фронтом ударной волны, а соотношение массовых скоростей на фронте и в плоскости Чепмена-Жуге примерно равно 1,5. Тогда уравнение (7) примет вид:

$$D = 1,2C_0 + 2,55U, \quad (8)$$

где  $U$  – массовая скорость в плоскости Чепмена-Жуге, м/с.

Основной сложностью методов расчета параметров детонации является описание их зависимости от плотности. Как правило, для этого пользуются формулой Кука (9):

$$D_{\rho_0} = D - \mu(\rho - \rho_0), \quad (9)$$

где  $D_{\rho_0}$  – скорость детонации при текущей плотности заряда  $\rho_0$ , м/с;

$\rho$  – предельная (максимальная) плотность, при которой возможна детонация заряда ВВ, г/см<sup>3</sup>;

$\mu$  – постоянный коэффициент.

Скорость детонации зависит от максимальной теплоты взрыва  $Q_m$ , скорости звука  $C_0$  и кислородного коэффициента  $\alpha$ . Однако две последние характеристики зависят от плотности. Дремин А.Н., Савров С.Д., Трофимов В.С. и Шведов К.К. предлагают расчет скорости детонации для зарядов любой плотности вести по следующей формуле (10) [8, 9]:

$$D = 1,2C_0 \frac{\rho_0}{\rho} + 2,55 \sqrt{\frac{\alpha+1,65}{5,5} \rho_0 Q_m}. \quad (10)$$

Постоянный коэффициент в формуле Кука определяется по формуле (11):

$$\mu = 1,2C_0 \left( 1 - \frac{\rho-1}{\rho} \right) + 2,55 \left( \sqrt{\frac{\alpha+1,65}{5,5} \rho_0 Q_m} - \sqrt{\frac{\alpha+1,65}{5,5} (\rho-1,0) Q_m} \right). \quad (11)$$

Постоянный коэффициент зависит не только от кислородного коэффициента, но и от плотности ВВ, скорости звука и максимальной теплоты взрыва. Данная методика применима для расчета скорости детонации флегматизированных и металлизированных ВВ.

$$D = 1,2C_0 \frac{\rho_0}{\rho} + 2,55 \sqrt{\frac{\alpha+1,65}{5,5} \rho_0 Q_m (1-\beta)}, \quad (12)$$

где  $\beta$  – массовая доля добавки;

$C_0 \frac{\rho_0}{\rho}$  – расчетная или экспериментально определяемая скорость звука в образцах с помощью ультразвукового дефектоскопа;

$\alpha$  – кислородный коэффициент;

$Q_m$  – максимальная теплота взрыва.

Скорость звука в смесевых системах может быть определена, исходя из следующего выражения (13) [8, 9]:

$$C_{0,1,2} = C_{0,1} C_{0,2} \frac{\beta \rho_{0,1} + (1-\beta) \rho_{0,2}}{\beta \rho_{0,1} C_{0,1} + (1-\beta) \rho_{0,2} C_{0,2}}, \quad (13)$$

где индекс 01 относится к взрывчатому компоненту, а 02 – к добавке (флегматизатору). Для поликомпонентной смеси скорость звука определяется последовательно, исходя из выражения (14) для бинарных смесей. Объемная скорость звука для металла и кристаллических добавок рассчитывается по продольной  $C_l$  и поперечной  $C_t$  скоростям звука

$$C_0^2 = C_l^2 - \frac{4}{3} C_t^2. \quad (14)$$

Дремин А.Н., Савров С.Д., Трофимов В.С. и Шведов К.К. предлагают совмещенное выражение для уравнения состояния и условия Чепмена-Жуге через объемную скорость звука в заряде ВВ и соотношение плотности ПД (продуктов детонации) в плоскости Чепмена-Жуге для зарядов любой плотности. Рассчитав соотношение  $\rho/\rho_0$ , можно вычислить скорость детонации [5, 6]:

$$D = C_0 \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^4. \quad (15)$$

Скорость детонации по гидродинамическому принципу рассчитывается по формуле (16):

$$D = \sqrt{2 \left[ \frac{\alpha+1,65}{5,5} \rho_0 Q_m (1-\beta) \right] (n^2 - 1)}. \quad (16)$$

Основная трудность расчетов связана с неопределенностью уравнения состояния для продуктов взрыва конденсированных ВВ ввиду чрезвычайно высокого их давления.

В качестве одного из вариантов можно было бы воспользоваться уравнением состояния газов типа уравнения

Ван-дер-Ваальса, а значение коволюма  $\alpha$  брать переменным, зависящим от плотности ВВ. В этом случае скорость детонации с достаточным приближением можно рассчитывать по формуле (17).

$$D = \frac{\dot{V}_0}{V_0 - \alpha} \cdot \frac{1+k}{k} \sqrt{k \frac{8310}{M} T_{\text{взр}}}, \quad (17)$$

где  $V_0$  – начальный удельный объем;

$k = C_p/C_v$  – показатель изоэнтропы ПД при нормальном давлении;

$M$  – средняя молекулярная масса ПД;

$T_{\text{взр}}$  – температура взрыва (детонации), которая отличается от аналогичного выражения для определения скорости детонации в газах на множитель  $V_0/(V_0 - \alpha)$ .

Косвенным путем получены значения коволюма для различных нитросоединений:

$\alpha = 0,58 \div 0,59$  при плотности  $1 - 1,03$  г/см<sup>3</sup>;

$\alpha = 0,44 \div 0,45$  при плотности  $1,59 - 1,73$  г/см<sup>3</sup>.

Для приближенных расчетов нет необходимости находить значение скорости детонации во всем диапазоне интересующих плотностей ВВ. Соответствующие величины можно найти экстраполяцией или интерполяцией по двум-трем экспериментальным точкам. Например, М. Куком рекомендована следующая усредненная зависимость (18):

$$D = D_1 + 350(\rho - 1), \quad (18)$$

где  $D_1$  – скорость детонации при плотности ВВ 1 г/см<sup>3</sup>;

$\rho$  – плотность ВВ.

Почти все исследователи подчеркивают зависимость скорости детонации от плотности ВВ. Так в источнике [10] эта зависимость описывается уравнением (19):

$$D = D_1 + k(\rho_{\text{ВВ}} - \rho_{\text{ВВ1}}), \quad (19)$$

где  $D_1$  – известная (измеренная) скорость детонации при плотности  $\rho_{\text{ВВ1}}$ ;

$k$  – коэффициент пропорциональности,  $k = 350$ .

Скорость детонации возрастает с увеличением диаметра заряда, и эта зависимость в общем виде может быть описана уравнением (20):

$$D = D_i(1 - a/d_a), \quad (20)$$

где  $D_i$  – предельная (идеальная) величина скорости детонации при бесконечно большом диаметре заряда  $d_a$ ;

$a$  – константа.

Для твердых гранулированных ВВ [10]

$$D = D_i[1 - (1 - d_3/a_0)^3]^{1/2}, \quad (21)$$

для жидких ВВ

$$D = D_i(d_3/a_0)^{3/5}, \quad (22)$$

где  $a_0$  – ширина зоны химической реакции, м;

$d_3$  – эффективный диаметр, определяемый диаметром заряда ВВ, соответствующим скорости детонации  $D$ , и

параметром  $a_k$ , учитывающим влияние краевого эффекта (для твердых ВВ  $a_k \approx 0,06$  м, для жидких  $a_k \approx 0,05$  м).

Скорость детонации смеси гранулированной аммиачной селитры с дизельным топливом зависит от массы и размера инициатора. В скважинах более 0,15 м оптимальный режим иницирования достигается при приближении размера диаметра боевика к диаметру заряда. В зависимости от массы инициатора скорость детонации АС-ДТ может быть описана [10] следующим уравнением (23).

$$D \approx D_i \exp[-(0,625 - r) / 4m], \quad (23)$$

где  $r$  – удаление от инициатора,  $r \leq 0,625$  м;

$m$  – масса инициатора.

Скорость детонации зависит от диаметра гранул аммиачной селитры [10]:

$$D / D_i \approx 0,85 + 0,15R_1 / R, \quad (24)$$

где  $D$  и  $D_i$  – скорость детонации при диаметрах гранул, соответственно  $R$  и  $R_1$ .

Обобщенное уравнение для определения скорости детонации можно записать в следующем виде:

для смеси гранулированной аммиачной селитры с дизельным топливом

$$D = D_i \left\{ \left[ 1 - \left( 1 - \frac{d_3}{a_0} \right)^3 \right]^{1/2} \cdot \exp[(r - 0,625) / 4m] \cdot \frac{1}{0,85 + 0,15R_1/R} \right\}, \quad (25)$$

для жидких ВВ

$$D = D_i(d_3/a_0)^{3/5}. \quad (26)$$

Свойства среды, окружающей зарядную полость, также существенно влияют на скорость детонации. В тех случаях, когда продукты детонации легко сжимают среду, их энергия быстро убывает. Это приводит к уменьшению зоны первичной реакции, искривлению фронта ударной волны и, в конечном итоге, к уменьшению величины скорости детонации.

Также в работе [11] предлагается другое выражение для определения скорости детонации с применением уравнения Клайперона (27):

$$D = \sqrt{\frac{(k+1)^2 \cdot m}{k \cdot M} \cdot RT}. \quad (27)$$

Тогда, полагая [11] отношение теплоемкостей  $C_p/C_v = k = 1,2$  и учитывая, что  $M/m$  – средний молекулярный вес продуктов взрыва (для обычных ВВ они состоят из  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ) близок к 30, получаем уравнение (28):

$$D \approx \frac{\sqrt{T}}{30}, \text{ км/с}. \quad (28)$$

Гидродинамическая теория детонации была впервые создана русским ученым Михельсоном в его диссертации в 1891 г., одновременно с цитируемой работой Вьеля. Первым гидродинамическую теорию детонации опубликовал в 1899 г. независимо разработавший ее Чепмен. Вьелью была лишь известна теория ударной волны, созданная Гюгонио в 1887 г. [11].

Первая попытка расчета скорости детонации конденсированных ВВ с учетом неидеальности продуктов взрыва была сделана известным исследователем ВВ и порохов П. Вьелем [11], который полагал, что скорость детонации равна скорости звука в неподвижных продуктах взрыва с учетом постоянного коволюма ( $\alpha = \text{const}$ ) и влияния плотности. Формула (29) была получена из укороченного выражения Ван дер Ваальса еще до гидродинамической теории детонации.

$$C = \frac{\sqrt{kf}}{1-\alpha\rho}, \quad (29)$$

где  $\alpha$  – коволюм;

$k$  – отношение теплоемкостей;

$f$  – сила взрыва, определяемая по формуле (30):

$$f = \frac{m}{M} RT. \quad (30)$$

Формула П. Вьеля дает очень грубый расчет, т.к. скорость детонации не равна скорости звука и коволюм не является постоянным. Тем не менее П. Вьелем первым были поставлены вопросы взаимосвязи скорости детонации со скоростью звука в продуктах взрыва и коволюмом [11].

Используя два закона сохранения, условие минимума скорости детонации и уравнение состояния продуктов взрыва, Таффанель и Дотриш впервые в 1912 г. получили для скорости детонации формулу (31) [11]:

$$D = A \frac{\sqrt{f}}{1-\alpha\rho_0} = \frac{k+1}{\sqrt{k}} \sqrt{\frac{mRT}{M_0}} \cdot \frac{V_0}{V_0-\alpha}. \quad (31)$$

Формула Таффанеля и Дотриша также дает грубые расчеты, т.к. в действительности коволюм не является постоянным и меняется с плотностью.

Шмидт предлагает аналогичную формулу (32) для расчета скорости детонации с учетом постоянного коволюма [11]:

$$D = D_{\text{ид}} \frac{V_0}{V_0-\alpha}, \quad (32)$$

где  $V_0$  – начальный удельный объем;

$D_{\text{ид}}$  – идеальная скорость детонации.

Массовую скорость продуктов взрыва без учета коволюма Шмидт рассчитывал по формуле (33):

$$U = \sqrt{\frac{mR}{M_0k} T}. \quad (33)$$

Ландау, Покровским и Станюковичем предложена формула (34) расчета скорости детонации в интервале плотно-

стей от 0,5 до 1,8 г/см<sup>3</sup>, которая справедлива для основных бризантных ВВ [11]:

$$D = N\rho_0^{\frac{m-1}{2}} = N\rho_0^\alpha, \quad (34)$$

где  $N$  и  $m$  – константы, определяемые из измеренной скорости детонации;

$\alpha$  – показатель, принимает значения от 0,3 до 0,8.

Авакян Г.Л. для вычисления скорости детонации предложил пользоваться выражением (35):

$$D = f(\rho_0) \sqrt{\frac{T_D}{M}}, \quad (35)$$

$$f(\rho_0) = \sqrt{\frac{10,4 \cdot 10^8 \rho_0}{\frac{n}{(n+1)^2} \left( \frac{5n}{n+1} \rho_0 \right)}};$$

где  $n$  – показатель политропы;

$\rho_0$  – начальная плотность продуктов детонации;

$M$  – средняя молекулярная масса продуктов детонации;

$T_D$  – температура взрыва (детонации).

### Результаты исследований

Далее по представленным методикам для наиболее популярных промышленных ЭВВ нами был проведен расчет и сравнение полученных значений скорости детонации со значениями, представленными в технических условиях (ТУ), а также с полученными результатами натурных измерений фактических величин скорости детонации таких ЭВВ, как: Нитронит Э-70, Нитронит Э-100, Порэммит-1А, Фортис (марки 70, 85 и 100). Сотрудниками лаборатории разрушения горных пород Института горного дела УрО РАН в период с 2004 по 2021 гг. на карьерах в технологических скважинах, а также на полигонах испытаний взрывчатых материалов (ВМ) в гильзовых зарядах, в условиях предприятий ОАО «ЕВ-РАЗ КГОК», ПАО «Ураласбест» и ООО «Орика-УГМК», были получены значения скорости детонации ЭВВ при разных плотностях ( $\rho = 1,05-1,3$  г/см<sup>3</sup>) и диаметрах зарядов от 80 до 250 мм.

В расчетах нами были сделаны некоторые допущения, например, при нахождении кислородного коэффициента и молярной массы ВВ для грубой оценки содержанием газогенерирующей добавки (ГГД) и дизельного топлива (ДТ) можно пренебречь, т.к. содержание аммиачной селитры в ЭВВ составляет до 98 %, ГГД – до 1,5 %, а ДТ – до 5%.

Результаты расчета скорости детонации современных промышленных ЭВВ и сравнительной оценки по десяти методикам представлены в таблице 2. К сожалению, не по всем методикам получилось произвести расчет скорости детонации, например, по формулам (32) и (33) [11] возникает сложность, т.к. для вычисления необходимо знать идеальную скорость детонации, по формуле (34) неизвестны численные значения констант, определяемые из измеренной скорости детонации, а результаты расчетов по формуле (35) дают очень завышенные значения.

Таблица 2

Расчетные значения скорости детонации по представленным выше методикам, из ТУ и результаты измерений скорости детонации современных промышленных ЭВВ

Кесте 2

Жоғарыда келтірілген әдістемелер бойынша детонация жылдамдығының есептік мәндері, ТУ-дан және қазіргі заманғы өнеркәсіптік ЭЕМ-нің детонация жылдамдығын өлшеу нәтижелері

Table 2

Calculated values of detonation velocity according to the methods presented above, from TU and the results of detonation velocity measurements of modern industrial explosives

Скорость детонации, м/с	Промышленное ЭВВ											
	порэммит-1А		нитронит Э-70		нитронит Э-100		фортис 70		фортис 85		фортис 100	
	от	до	от	до	от	до	от	до	от	до	от	до
по ТУ	4800	5200	4800	5000	4400	4800	3000	6000	3000	6000	3000	6000
экспериментально измеренная [12]	2230	6389	2068	6090	2718	5316	4281	5686	3868	5989	4770	6168
с учетом энергетической характеристики (формула (2)) <sup>1</sup>	231	238	231	245	220	235	241	257	236	262	231	274
с учетом теплоты взрыва эталонного ВВ (формула (3)) <sup>2</sup>	2983	3977	3047	4148	2906	3984	3159	4227	3170	4446	3170	4500
идеальная (Китай) (формула (4))	5816	6175	5487	6233	5344	6205	5479	6418	5304	6480	5037	6719
по Кривченко А. Л. (формула (6))	5832	6502	5832	6502	5832	6502	5832	6502	5832	6502	5832	6502
по Дремину А. Н. и Шведову К. К. (формула (10)) <sup>3</sup>	1042	1683	960	1649	956	1645	979	1715	923	1656	836	1722
по Дремину А. Н. и Шведову К. К. совмещенное выражение (формула (15))	1427	1461	1570	2102	1570	2102	1342	1949	1570	2555	1342	3894
используя уравнение Ван-дер-Ваальса (формула (17)) <sup>4</sup>	3212	4440	3708	4441	3737	4180	4347	4381	4454	4706	4254	6050
используя уравнение Клайперона (формула (27))	1491	2236	1491	2236	1491	2236	1491	2236	1491	2236	1491	2236
по П. Вьелю (формула (29)) <sup>5</sup>	357	631	319	606	319	606	326	649	303	606	276	649
по Таффанелю и Дотришу (формула (31)) <sup>5</sup>	550	825	583	810	586	764	675	824	675	812	675	805

<sup>1</sup> – Показатель политропы определен в зависимости от плотности по Кутузову Б.Н. [7].

<sup>2</sup> – Скорость детонации аммонита №6ЖВ – 3600-4800 м/с, теплота взрыва аммонита №6ЖВ – 4312 кДж/кг.

<sup>3</sup> – Предельная плотность – 1,3 г/см<sup>3</sup>.

<sup>4</sup> – Показатель изоэнтропии  $k = 1,2$ ; молярная масса ПД – 30 г/моль; температура взрыва взята в диапазоне от 2000 до 4500 К.

<sup>5</sup> – Универсальная газовая постоянная  $R \approx 287$  Дж/(кг·К); коволюмом является постоянным  $\alpha = 0,5$ .

### Выводы

Скорость детонации ВВ существенно зависит не только от плотности, но и от диаметра заряда, поэтому диапазон измеренных величин скорости детонации охватывает большой диапазон диаметров заряда и будет больше, чем диапазон расчетных значений скорости детонации по методикам, не учитывающим диаметр заряда, а также данных из ТУ, в которых указан диапазон скорости детонации при испытаниях в стальной трубе диаметром 60 мм.

Из таблицы 2 видно, что результаты расчетов скорости детонации ЭВВ с учетом энергетической характеристики, по Вьелю, Таффанелю и Дотришу дают очень грубый расчет и заниженные значения, и это понятно, т.к. в первом случае должен быть перерасчет с учетом теплоты взрыва эталонного ВВ, а первые уравнения Вьеля, Таффанеля, Дотриша и Шмидта не учитывают изменчивый объем молекул продуктов взрыва для разных плотностей заряжения ВВ и дают грубый расчет в связи с тем, что ранее коволюмом

считался постоянным, тем не менее именно Вьель первым показал взаимосвязь скорости детонации со скоростью звука в продуктах взрыва и коволюмом, а другие исследователи ухватились за эти идеи, что дало основу для дальнейшего развития гидродинамической теории детонации. Методы расчета по Дремину А. Н. и Шведову К. К., а также при использовании уравнения Клайперона дают низкие значения и грубый расчет, а выражение с учетом теплоты взрыва эталонного ВВ и уравнение Ван-дер-Ваальса дают низкие значения, но приемлемые результаты для ЭВВ нитронит и порэммит-1А, но достаточно точные значения для ЭВВ Фортис, которые находятся в диапазоне скорости детонации, указанной в ТУ. Несмотря на то, что по эмпирической формуле Кривченко А. Л. получаются высокие значения скорости детонации, она более точно отражает фактическую измеренную скорость детонации при больших диаметрах заряда, и соответствует ТУ ЭВВ фортис, но здесь для определения скорости звука в ПД был выбран диапазон температуры взрыва от 2000 до 4500 К,

поэтому для расчета по этой формуле изначально нужно знать точную температуру взрыва, что является достаточно трудоемким. Экспериментальная формула расчета идеальной скорости детонации китайскими исследователями дает завышенные результаты при высоких значениях теплоты взрыва и удельного объема ПД, но достаточно точные результаты идеальной скорости детонации в нижнем диапазоне. Из всех перечисленных методик наиболее достоверными являются методы расчета Кривченко А. Л. и китайских исследователей, т.к. они основаны на эмпирических зависимостях от температуры, теплоты взрыва и удельного объема ПД, также возможно воспользоваться формулами с учетом теплоты взрыва эталонного ВВ и уравнением Ван-дер-Ваальса для некоторых типов ЭВВ. Для гранулированных, порошкообразных и первично-иницируемых ВВ результаты расчетов могут быть другими.

Также существуют частные эмпирические формулы многих других исследователей, которые дают достаточно точные расчеты скорости детонации, тем не менее все исследователи отмечают зависимость скорости детонации от плотности. Интересными для практических целей являются формулы, учитывающие ширину зоны химической реакции, массу инициатора и диаметр гранул аммиачной селитры, т.к. позволяют взаимосвязать со скоростью детонации другие детонационные характеристики или решить обратную задачу.

В связи со сложностью определения скорости детонации теоретически, в большинстве случаев ее определяют экспериментально в промышленных условиях на специальных полигонах испытаний ВМ, а также непосредственно во время производства взрывных работ в карьере.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Kabwe E. Измерение скорости детонации и анализ дробления для оценки эффективности взрывных работ // Журнал механики горных пород и геотехники. – 2018. – № 10(3). – С. 523-533. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.12.003> (на английском языке)
2. Ainalis D., Kaufmann O., Tshibangu J.-P., Verlinden O., Kouroussis G. Моделирование источника взрывных работ для численного моделирования вызванных взрывом колебаний грунта: обзор // Механика горных пород и горная инженерия. – 2017. – Vol. 50(1). – С. 171-193. <https://doi.org/10.1007/s00603-016-1101-2> (на английском языке)
3. Balakrishnan V., Pradhan M., Dhekne P.Y. Исследование поведения детонации эмульсионного взрывчатого вещества, столба индуцируемого воздушными промежутками // Горная наука. – 2019. – № 26. – С. 55-68. <https://doi.org/10.37190/msc192605> (на английском языке)
4. Андреев Л. Ф., Беляев К. К. Теория взрывчатых веществ. – М.: Оборонгиз. 1960. – С. 596 (на русском языке)
5. Ремпель Г. Г. К вопросу об оценке длины зоны химической реакции за фронтом детонационной волны // Взрывное дело. 1963. – № 52/9. – С. 39-56 (на русском языке)
6. Андреев С. Г. и др. Физика взрыва: в 2 т., Т.1. / Под ред. Л. П. Орленко. – 3-е изд., доп. и перераб. – М.: Физматлит. 2002. – С. 832 (на русском языке)
7. Кутузов Б. Н. Разрушение горных пород взрывом: учебник для вузов. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Изд-во МГИ. 1992. – С. 516 (на русском языке)
8. Кривченко А. Л., Кривченко Д. А., Чуркин О. Ю. О принципах расчета параметров детонации в конденсированных и газовых системах // Наука и современность. 2010. – № 1-2. – С. 166-171 (на русском языке)
9. Дремин А. Н., Савров С. Д., Трофимов В. С., Шведов К. К. Детонационные волны в конденсированных средах. – М.: Наука. 1970. – С. 164 (на русском языке)
10. Барон В. Л., Кантор В. Х. Техника и технология взрывных работ в США. – М.: Недра. 1989. – С. 375 (на русском языке)
11. Вопросы теории взрывчатых веществ / Акад. наук Союза ССР, Ин-т хим. физики. – М.; Л.: Изд-во Акад. наук Союза ССР, 1947 — (Проблемы хим. кинетики, горения и взрывов / гл. ред. Н. Н. Семенов; ред. кол.: Я. Б. Зельдович [и др.]; вып. 1). Кн. 1: сб. статей / под ред. чл.-корр. АН СССР Ю. Б. Харитона и С. Б. Ратнера. 1947. – С. 188 (на русском языке)
12. Жариков С. Н., Кутуев В. А. О закономерностях протекания детонации взрывчатых веществ // Взрывное дело. 2022. – № 135-92. – С. 115-131. DOI: 10.25635/r3911-6125-0389-e (на русском языке)

#### ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Kabwe E. Жарылыс жұмыстарының тиімділігін бағалау үшін детонация жылдамдығын өлшеу және ұсақтауды талдау // Тау жыныстары механикасы және геотехника журналы. – 2018. – № 10(3). – С. 523-533. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.12.003> (ағылшын тілінде)
2. Ainalis D., Kaufmann O., Tshibangu J.-P., Verlinden O., Kouroussis G. Жарылыстан туындаған жер тербелістерін сандық модельдеу үшін жарылыс көзін модельдеу: шолу // Тау жыныстарының механикасы және тау-кен инженериясы. – 2017. – Vol. 50(1). – С. 171-193. <https://doi.org/10.1007/s00603-016-1101-2> (ағылшын тілінде)

3. Balakrishnan V., Pradhan M., Dhekne P. Y. Эмульсиялық жарылғыш заттың детонациялық әрекетін зерттеу, ауа кеңістігінен туындаған полюс // *Тау-кен ғылымы.* – 2019. – № 26. – Б. 55-68.  
<https://doi.org/10.37190/msc192605> (ағылшын тілінде)
4. Андреев Л. Ф., Беляев к. к. Жарылғыш заттар теориясы. – М.: Қорғаныс. 1960. – Б. 596 (орыс тілінде)
5. Ремпель Г. Г. Детонациялық толқын майданының артындағы химиялық реакция аймағының ұзындығын бағалау мәселесіне // *Жарылғыш зат.* 1963. – № 52/9. – Б. 39-56 (орыс тілінде)
6. Андреев С. Г. және т. б. Жарылыс физикасы: 2 Т., Т. 1. / Ред. Л. П. Орленко. – 3-ші басылым., қосымша және қайта өңдеу – М.: Физматлит. 2002. – Б. 832 (орыс тілінде)
7. Кутузов Б. Н. тау жыныстарын жарылыспен жою: жоғары оқу орындарына арналған оқулық. – 3-ші басылым. қайта өңдеу. және қосымша. – М.: МГИ баспасы. 1992. – Б. 516 (орыс тілінде)
8. Кривченко А.Л., Кривченко Д. А., Чуркин О. Ю. Конденсацияланған және газ жүйелеріндегі детонация параметрлерін есептеу принциптері туралы // *Ғылым және қазіргі заман.* 2010. – № 1-2. – Б. 166-171 (орыс тілінде)
9. Дремин А. Н., Савров С. Д., Трофимов В. С., Шведов К. К. Конденсацияланған ортадағы детонациялық толқындар. – М.: Ғылым. 1970. – Б. 164 (орыс тілінде)
10. Барон В.Л., Кантор В. Х. АҚШ-тағы жарылыс техникасы және технологиясы. – М.: Жер Қойнауы. 1989. – Б. 375 (орыс тілінде)
11. Жарылғыш заттар теориясының сұрақтары / Акад. ССР Одағы ғылымдарының, Ин-т хим. физиктер. – М.; Л.: Акад баспасы. КСР Одағының ғылымдары, 1947 – (хим мәселелері. кинетика, жану және жарылыстар / ч. ред. Н.Н. Семенов; ред. кол.: Я. Б. Зельдович [және т. б.]; ВП. Gorenje. 1). Кн. 1: сб. мақалалар / ред. мүше.– корр. КСРО Ғылым академиясы Ю.Б. Харитон және С. Б. Ратнер. 1947. – Б. 188 (орыс тілінде)
12. Жариков С. Н., Кутуев В. А. Жарылғыш заттардың жарылу заңдылықтары туралы // *Жарылғыш зат.* 2022. – № 135-92. – Б. 115-131. DOI: 10.25635 / r3911-6125-0389-e (орыс тілінде)

## REFERENCES

1. Kabwe E. Velocity of detonation measurement and fragmentation analysis to evaluate blasting efficacy. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering.* 2018; Vol. 10(3): P. 523-533 <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.12.003>. (in English)
2. Ainalis D., Kaufmann O., Tshibangu J.-P., Verlinden O., Kouroussis G. Modelling the source of blasting for the numerical simulation of blast-induced ground vibrations: a review. *Rock Mechanics and Rock Engineering.* 2017; Vol. 50(1): P. 171-193 <https://doi.org/10.1007/s00603-016-1101-2>. (in English)
3. Balakrishnan V., Pradhan M., Dhekne P.Y. Field investigation in the detonation behavior of emulsion explosive column induced with air gaps. *Mining Science.* 2019; Vol. 26: P. 55-68 <https://doi.org/10.37190/msc192605>. (in English)
4. Andreev L.F., Belyaev K.K. *Theory of Explosives.* Moscow: Oborongiz. 1960. P. 596 (in Russian)
5. Rempel G.G. On the evaluation of the length of the chemical reaction zone behind the detonation wave front. *Explosive business.* 1963. No. 52/9. P. 39-56 (in Russian)
6. Andreev S.G. et al. *Physics of Explosions: in 2 vol., Vol. 1.* Edited by L.P. Orlenko. – 3rd edition, revised and updated. Moscow: Fizmatlit. 2002. P. 832 (in Russian)
7. Kutuzov B.N. *Rock destruction by explosion: textbook for universities. 3rd revised and enlarged edition.* Moscow: Publishing house of Moscow State Mining University. 1992. P. 516 (in Russian)
8. Krivchenko A.L., Krivchenko D.A., Churkin O.Yu. On the principles of calculating detonation parameters in condensed and gaseous systems. *Science and Modernity.* 2010. No. 1-2. P. 166-171 (in Russian)
9. Dremmin A.N., Savrov S.D., Trofimov V.S., Shvedov K.K. *Detonation waves in condensed media.* Moscow: Nauka. 1970. 164 p. (in Russian)
10. Baron V.L., Kantor V.Kh. *Techniques and technology of blasting operations in the USA.* Moscow: Nedra. 1989. P. 375 (in Russian)
11. *Issues of the theory of explosives / USSR Academy of Sciences, Institute of Chemical Physics. Moscow; Leningrad: Publishing house of the USSR Academy of Sciences, 1947 – (Problems of chemical kinetics, combustion and explosions / chief editor N.N. Semenov; editorial board: Ya.B. Zel'dovich et al.; vol. 1). Book 1: collection of articles / edited by corresponding member of the USSR Academy of Sciences Yu.B. Khariton and S.B. Ratner. 1947. P. 188 (in Russian)*
12. Zharikov S.N., Kutuev V.A. On the regularities of detonation in explosives. *Explosive business.* 2022. No. 135-92. P. 115-131. DOI: 10.25635/r3911-6125-0389-e (in Russian)



**Сведения об авторах:**

**Меньшиков П.В.**, научный сотрудник ИГД УрО РАН, лаб. разрушения горных пород (г. Екатеринбург, Россия), [menshikovpv@mail.ru](mailto:menshikovpv@mail.ru);  
<https://orcid.org/0000-0001-6672-6769>

**Кутуев В.А.**, научный сотрудник ИГД УрО РАН, лаб. разрушения горных пород (г. Екатеринбург, Россия), [9634447996@mail.ru](mailto:9634447996@mail.ru);  
<https://orcid.org/0000-0002-8423-0246>

**Жариков С.Н.**, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, зав. лаб. разрушения горных пород (г. Екатеринбург, Россия), [333vista@mail.ru](mailto:333vista@mail.ru);  
<https://orcid.org/0000-0002-0322-9973>

**Авторлар туралы мәліметтер:**

**Меньшиков П.В.**, ғылыми қызметкер ИГД УрО РҒА, лаб. тау жыныстарының жойылуы, (Екатеринбург қ., Ресей)

**Кутуев В.А.**, ғылыми қызметкер ИГД УрО РҒА, лаб. тау жыныстарының жойылуы, (Екатеринбург қ., Ресей)

**Жариков С.Н.**, техника ғылымдарының кандидаты, жетекші ғылыми қызметкер, меңгеруші, лаб. тау жыныстарын жою, ИГД УрО РАН, (Екатеринбург қ., Ресей)

**Information about the authors:**

**Menshikov P.V.**, researcher, Institute of Mining of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, lab. rock breaking (Ekaterinburg, Russia)

**Kutuev V.A.**, researcher, Institute of Mining of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, lab. rock breaking (Ekaterinburg, Russia)

**Zharikov S.N.**, Candidate of Technical Sciences, leading researcher, head. lab. rock destruction (Ekaterinburg, Russia)

16+

# Металлообработка. Сварка – Урал

12–15 марта 2024  
Екатеринбург

международная выставка технологий,  
оборудования, материалов для машиностроения,  
металлообрабатывающей промышленности  
и сварочного производства

крупнейший  
специализированный  
региональный проект в России



PRO  
EXPO

(342) 264-64-27  
[egorova@expoperm.ru](mailto:egorova@expoperm.ru)  
[metal-ekb.expoperm.ru](http://metal-ekb.expoperm.ru)

