

УДК 622.235.213

**Меньшиков Павел Владимирович**

научный сотрудник,  
лаборатория разрушения горных пород,  
Институт горного дела УрО РАН,  
620075, г. Екатеринбург,  
ул. Мамина-Сибиряка, 58, оф. 506  
e-mail: [menshikovpv@mail.ru](mailto:menshikovpv@mail.ru).

**Кутуев Вячеслав Александрович**

научный сотрудник,  
лаборатория разрушения горных пород,  
Институт горного дела УрО РАН  
e-mail: [9634447996@mail.ru](mailto:9634447996@mail.ru)

**Жариков Сергей Николаевич**

кандидат технических наук,  
ведущий научный сотрудник,  
заведующий лабораторией  
разрушения горных пород,  
Институт горного дела УрО РАН  
e-mail: [333vista@mail.ru](mailto:333vista@mail.ru)

#### **АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕТОДИК РАСЧЕТА СКОРОСТИ ДЕТОНАЦИИ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ\***

##### *Аннотация:*

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) порэмит-1А, нитронит Э-70, Э-100 и фортис 70, 85, 100 по методам расчета с учетом энергетической характеристики, теплоты взрыва эталонного ВВ, идеальной скорости детонации по А.Л. Кривченко, а также по формулам А.Н. Дремина и К.К. Шведова в смешанных системах для любой плотности и при совмещенном выражении для уравнения состояния и условия Чепмена-Жуге, с учетом уравнения состояния газов Ван-дер-Ваальса, с применением уравнения Клапейрона, формулы Вьеля с учетом неидеальности продуктов взрыва и формулы Таффанеля и Дотриши с использованием условия минимума скорости детонации и уравнения состояния продуктов взрыва. Проведен анализ расчетных значений скорости детонации с данными из Технических Условий и измеренными величинами.

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

DOI: 10.25635/2313-1586.2022.03.091

**Menshikov Pavel V.**

Researcher,  
Laboratory of rock destruction,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,  
620075 Ekaterinburg,  
58 Mamina-Sibiryaka Str.  
e-mail: [menshikovpv@mail.ru](mailto:menshikovpv@mail.ru).

**Kutuev Vyacheslav A.**

Researcher,  
Laboratory of rock destruction,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,  
e-mail: [9634447996@mail.ru](mailto:9634447996@mail.ru)

**Zharikov Sergey N.**

Candidate of Technical Sciences,  
Leading Researcher,  
Laboratory of rock destruction,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,  
Ekaterinburg, 58 Mamina-Sibiryaka Str.;  
e-mail: [333vista@mail.ru](mailto:333vista@mail.ru)

#### **ANALYSIS OF RESEARCH RESULTS OF METHODS FOR CALCULATION THE VELOCITY OF DETONATION OF EXPLOSIVES**

##### *Abstract:*

The article describes the hydrodynamic theory of detonation and well-known classical methods for calculating the detonation velocity based on conservation laws of the Chapman-Jouguet condition and equations of state and thermodynamic methods for calculating the detonation velocity based on the heat of the explosion and the composition of the detonation products. The calculation of the detonation velocity of industrial emulsion explosives poremit-1A, nitronite E-70, E-100 and fortis 70, 85, 100 was carried out using calculation methods taking into account the energy characteristics, the heat of explosion of the reference explosive, the ideal detonation velocity, according to Krivchenko A. L., as well as according to the formulas of A. N. Dremin and K. K. Shvedov in mixed systems for any density and with a combined expression for the equation of state and the Chapman-Jouguet condition, taking into account the Van der Waals gas equation of state, using Clapeyron's equations, Viel's formulas taking into account the non-ideality of the explosion products, and the Taffanel and Dotrice formulas, using the detonation velocity minimum condition and the equation of state of the explosion products. An analysis of the calculated values of the detonation velocity with the data from the Technical Conditions and the measured values was carried out.

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

\* Исследования выполнены в рамках Государственного задания №075-00412-22 ПР, темы 1 (2022-2024): (FUWE-2022-0005), рег. №1021062010531-8-1.5.1

## 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 измеряется 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 взрывания. 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.

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 эта теория получила в работах Я.Б. Зельдовича, Д. Неймана и В. Дёринга, 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 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 [1 - 3].

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 [1, 4, 5].

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 про-

дуктов детонации и не принимают во внимание тот факт, что детонационный фронт (передняя граница зоны химической реакции) распространяется по непрореагировавшему 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 – энергосодержание 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 рис. 1 в координатах «давление – объем» изображена детонационная волна по модели Зельдовича – Неймана, причем кривая АВ есть ударная адиабата сжатия ВВ, а кривая EF – продуктов детонации (адиабата Гюгонио), АВ – прямая Михельсона, а участок ВС на ней отображает зону химического пика [1, 2].

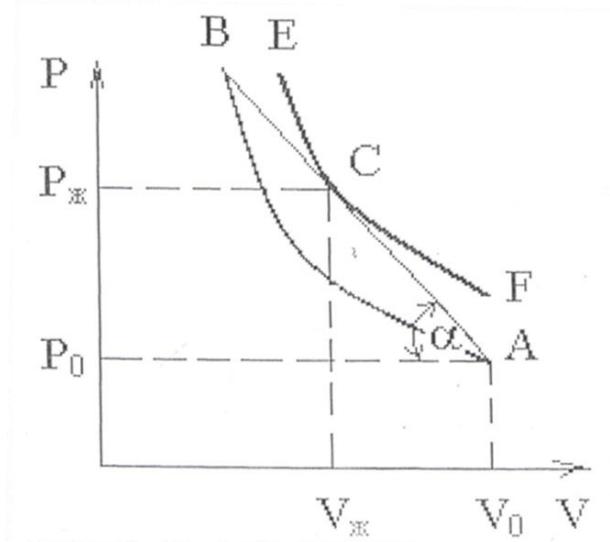


Рис. 1.  $P - V$  диаграмма детонационной волны [1, 2]

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 Б.Н. Кутузову [7], значение  $n$  для  $Q = 4190$  кДж/кг в зависимости от начальной плотности может быть принято равным (табл. 1).

Таблица 1

## Показатель политропы в зависимости от плотности

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) [5]:

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

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 Бергто (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.

А.Л. Кривченко [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]:

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

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

Считается, что фронт детонационной волны, распространяющийся по непрореагирующему 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 следующий 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) [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. А.Н. Дремин, С.Д. Савров, В.С. Трофимов и К.К. Шведов предлагают расчет скорости детонации для зарядов любой плотности вести по следующей формуле (10) [8, 10]:

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

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, 10]:

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

где индекс 01 относится к взрывчатому компоненту, а 02 – к добавке (флегматизатора). 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

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

А.Н. Дремин, С.Д. Савров, В.С. Трофимов и К.К. Шведов 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 [8 - 10]:

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

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 [11].

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) [12]:

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

где  $V_o$  – начальный удельный объем;

$k = C_p/C_v$  – показатель изэнтропы 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  $V_o / (V_o - \alpha)$ .

Косвенным путем получены значения коволюма для различных нитросоединений [13]:

$\alpha = 0,58 \div 0,59$  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 [14] 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 [15] 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) [12]:

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

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

$a$  – константа.

Для твердых гранулированных ВВ [15]

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

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 инициирования достигается при приближении размера диаметра боевика к диаметру заряда. В зависимости от массы инициатора скорость детонации АС-ДТ может быть описана [15] 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 [15]:

$$D / D_1 \approx 0,85 + 0,15R_1 / R, \quad (24)$$

где  $D$  и  $D_1$  – 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

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

для жидких ВВ

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

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 [16] 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 [16] 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. Вьелю была известна лишь теория ударной волны, созданная Гюгионо в 1887 г. [16].

Первая попытка расчета скорости детонации конденсированных ВВ с учетом неидеальности продуктов взрыва была сделана известным исследователем ВВ и порохов П. Вьелем [16], 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. Вьель первым рассмотрел вопросы взаимосвязи скорости детонации со скоростью звука в продуктах взрыва и коволюмом [16].

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) [16]:

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

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 [16]:

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

где  $V_0$  – начальный удельный объем;

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

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

$$U = \sqrt{\frac{mR}{M_0 k} T}. \quad (33)$$

Ландау, Покровским и Станюковичем предложена формула (34) расчета скорости детонации в интервале плотностей от 0,5 до 1,8 г/см<sup>3</sup>, которая справедлива для основных бризантных ВВ [16, 17]:

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

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

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

Г.Л. Авакян [18] для вычисления скорости детонации предложил пользоваться выражением (35):

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

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

$n$  – 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 натуральных измерений фактических величин скорости детонации таких ЭВВ, как Нитронит Э-70, Нитронит Э-100 [19], Порэмит-1А [20], Фортис (марки 70, 85 и 100) [21]. Сотрудниками лаборатории разрушения горных пород Института горного дела УрО РАН в период с 2004 по 2021 г. на карьерах в технологических скважинах, а также на полигонах испытаний взрывчатых материалов (ВМ) в гильзовых зарядах, в условиях предприятий ОАО «ЕВРАЗ 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 табл. 2. К сожалению, не по всем методикам получилось произвести расчет скорости детонации, например, по формулам (32) и (33) [16] возникает сложность, т.к. для вычисления необходимо знать идеальную скорость детонации, по формуле (34) [17] неизвестны численные значения констант, определяемые из измеренной скорости детонации, а результаты расчетов по формуле (35) [18] дают очень завышенные значения.

Таблица 2

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

Скорость детонации, м/с	Промышленное ЭВВ											
	порэмит-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	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 А.Л. Кривченко (формула (6))	5832	6502	5832	6502	5832	6502	5832	6502	5832	6502	5832	6502
По А.Н. Дрёмину и К.К. Шведову (формула (10)) <sup>3</sup>	1042	1683	960	1649	956	1645	979	1715	923	1656	836	1722
По А.Н. Дрёмину и К.К. Шведову совмещенное выражение (формула (15))	1427	1461	1570	2102	1570	2102	1342	1949	1570	2555	1342	3894
По уравнению Ван-дер-Ваальса (формула (17)) <sup>4</sup>	3212	4440	3708	4441	3737	4180	4347	4381	4454	4706	4254	6050
По уравнению 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

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

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

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

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

5 – Универсальная газовая постоянная  $R \approx 287$  Дж/(кг·К); коволюм 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 табл. 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 коволюм считался постоянным, тем не менее именно Вьель первым показал взаимосвязь скорости детонации со скоростью звука в продуктах взрыва и коволюмом, а другие исследователи заинтересовались этими идеями, что дало основу для дальнейшего развития гидродинамической теории детонации. Методы расчета по А.Н. Дрёмину и К.К. Шведову, 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 А.Л. Кривченко 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 А.Л. Кривченко 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-инициируемых 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 [22], 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 [23 - 26].

## Список литературы

1. Андреев Л.Ф., Беляев К.К., 1960. *Теория взрывчатых веществ*. Москва: Оборонгиз, 596 с.
2. Ремпель Г.Г., 1963. К вопросу об оценке длины зоны химической реакции за фронтом детонационной волны. *Взрывное дело*, № 52/9, С. 39 - 56.
3. Жариков С.Н., Кутуев В.А., 2022. О закономерностях протекания детонации взрывчатых веществ. *Взрывное дело*, № 135 - 92, С. 115 - 131.
4. Светлов Б.Я., Яременко Н.Е., 1973. *Теория и свойства промышленных ВВ*. Москва: Недра, 208 с.
5. Горбонос М.Г., 2011. *Методические указания по практическим занятиям и выполнению самостоятельных работ по дисциплине «Технология и безопасность взрывных работ» для студентов специальности 130403 «Открытые горные работы»*. Часть 1. Петрозаводск: Петрозаводский государственный университет, 51 с.
6. Андреев С.Г. и др., 2002. *Физика взрыва: в 2 т., Т.1*. Под ред. Л.П. Орленко. 3-е изд., перераб. и доп. Москва: Физматлит, 832 с.
7. Кутузов Б.Н., 1992. *Разрушение горных пород взрывом: учебник для вузов, 3-е изд., перераб. и доп.* Москва: Изд-во МГИ, 516 с.
8. Кривченко А.Л., Кривченко Д.А., Чуркин О.Ю., 2010. О принципах расчета параметров детонации в конденсированных и газовых системах. *Наука и современность*. № 1 - 2, С. 166 - 171.
9. Кривченко А.Л., 1984. Метод расчета параметров детонации конденсированных взрывчатых веществ. *Физика горения и взрыва*. № 3, С. 83 -86.
10. Дремин А.Н., Савров С.Д., Трофимов В.С., Шведов К.К., 1970. *Детонационные волны в конденсированных средах*. Москва: Наука, 164 с.
11. Веретенников В.А., Дремин А.Н., Шведов К.К., 1965. Об определении параметров детонации, конденсированных ВВ. *Физика горения и взрыва*, № 3, С. 3 - 9.
12. Юхансон К., Персон П., 1973. *Детонация взрывчатых веществ*. Москва: Мир, 352 с.
13. Дубнов Л.В., Бахаревич Н.С., Романов А.И., 1982. *Промышленные взрывчатые вещества*. Москва: Недра, 327 с.
14. Кук М.А., 1980. *Наука о промышленных взрывчатых веществах*. Москва: Недра, 453 с.
15. Барон В.Л., Кантор В.Х., 1989. *Техника и технология взрывных работ в США*. Москва: Недра, 375 с.
16. *Вопросы теории взрывчатых веществ. Кн. 1*, 1947. Москва; Ленинград: Изд-во Акад. наук СССР, 188 с.
17. Ландау Л.Д., 1969. *Собрание трудов: в 2 т., Т.1*. Под ред. Е.М. Лифшица. Москва: Наука, 512 с.
18. Авакян Г.Л., 1964. *Расчет энергетических и взрывчатых характеристик ВВ*. Москва: Изд-во ВИА, 84 с.
19. *Эмульсионное промышленное взрывчатое вещество «Нитронит». Технические условия ТУ 7276-003-58995878-2004*, 2004. Качканар, ООО «АВТ-Урал», 19 с.
20. *Эмульсионное промышленное взрывчатое вещество «Порэмит-1А». Технические условия ТУ 84-08628424-671-96*, 1996. Дзержинск, ФГУП ГосНИИ «Кристалл», 19 с.
21. *Эмульсионное промышленное взрывчатое вещество «Фортис»: Технические условия ТУ 7276-001-23308410-2006 (с изменениями, на 26.01.2015 г.)*, 2015. Москва, 21 с.
22. Меньшиков П.В., Жариков С.Н., Кутуев В.А., 2021. Определение ширины зоны химической реакции промышленного эмульсионного взрывчатого вещества порэмит 1А на основе принципа неопределенности в квантовой механике. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 5 - 2, С. 121 – 134. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_52\_0\_121.

23. Меньшиков П.В., Жариков С. Н., Кутуев В. А., 2020. Исследование детонационных характеристик ЭВВ порэммит 1А. *Проблемы недропользования*, № 4, С. 32 - 41, DOI: 10.25635/2313-1586.2020.04.032.

24. Кутуев В.А., 2016. Изучение детонационных характеристик промышленного эмульсионного взрывчатого вещества порэммит-1А, с использованием регистратора данных "ДАТАТРАП™". *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № S21, С. 101 - 109.

25. Кутуев В.А., Флягин А.С., Жариков С.Н., 2021. Исследование детонационных характеристик ПЭВВ НПГМ с различными исходными компонентами эмульсии при иницировании зарядов разными промежуточными детонаторами. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*, № 3, С. 175-187, DOI: 10.46689/2218-5194-2021-3-1-169-181.

26. Кутуев В.А., Меньшиков П.В., Жариков С.Н., 2016. Анализ методов исследования детонационных процессов ВВ. *Проблемы недропользования*, № 3, С. 78 - 87. DOI: <https://doi.org/10.18454/2313-1586.2016.03.078>

### References

1. Andreev L.F., Beliaev K.K., 1960. *Teoriya vzryvchatykh veshchestv* [Theory of explosives]. Moscow: Oborongiz, 596 p.

2. Rempel' G.G., 1963. К вопросу об отсенке длины зоны химической реакции за фронтом детонационной волны [On the issue of estimating the length of the chemical reaction zone behind the detonation wave front]. *Vzryvnoe delo*, № 52/9, P. 39 - 56.

3. Zharikov S.N., Kutuev V.A., 2022. О закономерностях протекания детонации взрывчатых веществ [On the patterns of detonation process of explosives]. *Vzryvnoe delo*, № 135 - 92, P. 115 - 131.

4. Svetlov B.Ya., Yaremenko N.E., 1973. *Teoriya i svoistva promyshlennykh VV* [Theory and characteristics of industrial explosives]. Moscow: Nedra, 208 p.

5. Gorbonos M.G., 2011. *Metodicheskie ukazaniya po prakticheskim zanyatiyam i vypolneniyu samostoyatel'nykh rabot po distsipline "Tekhnologiya i bezopasnost' vzryvnykh rabot' dlya studentov spetsial'nosti 130403 "Otkrytye gornye raboty"* [Methodological guidelines for practical classes and independent work on the discipline "Technology and safety of blasting" for students of the specialty 130403 "Open-pit mining"]. Chast' 1. Petrozavodsk: Petrozavodskii gosudarstvennyi universitet, 51 p.

6. Andreev S.G. i dr., 2002. *Fizika vzryva: v 2 t., Vol.1* [Physics of explosion: in 2 vols., Vol.1]. Pod red. L.P. Orlenko. 3-e izd., pererab. i dop. Moscow: Fizmatlit, 832 p.

7. Kutuzov B.N., 1992. *Razrushenie gornykh porod vzryvom: uchebnik dlya vuzov, 3-e izd., pererab. i dop.* [Destruction of rocks by explosion: textbook for universities, 3rd ed., reprint. and add.] Moscow: Izd-vo MGI, 516 p.

8. Krivchenko A.L., Krivchenko D.A., Churkin O.Yu., 2010. О принципах расчета параметров детонации в конденсированных и газовых системах [On the principles of calculation of detonation parameters in condensed and gas systems]. *Nauka i sovremennost'*. № 1 - 2, P. 166 - 171.

9. Krivchenko A.L., 1984. *Metod rascheta parametrov detonatsii kondensirovannykh vzryvchatykh veshchestv*. [A method for calculating the detonation parameters of condensed explosives]. *Fizika goreniya i vzryva*. № 3, P. 83 -86.

10. Dremine A.N., Savrov S.D., Trofimov V.S., Shvedov K.K., 1970. *Detonatsionnye volny v kondensirovannykh sredakh* [Detonation waves in condensed media]. Moscow: Nauka, 164 p.

11. Veretenikov V.A., Dremine A.N., Shvedov K.K., 1965. Об определении параметров детонации, конденсированных ВВ [On the determination of detonation parameters, condensed explosives]. *Fizika goreniya i vzryva*, № 3, P. 3 - 9.

12. Yuhanson K., Person P., 1973. Detonatsiya vzryvchatykh veshchestv [Detonation of explosives]. Moscow: Mir, 352 p.
13. Dubnov L.V., Bakharevich N.S., Romanov A.I., 1982. Promyshlennye vzryvchatye veshchestva [Industrial explosives]. Moscow: Nedra, 327 p.
14. Kuk M.A., 1980. Nauka o promyshlennykh vzryvchatykh veshchestvakh [The science of industrial explosives]. Moscow: Nedra, 453 p.
15. Baron V.L., Kantor V.Kh., 1989. Tekhnika i tekhnologiya vzryvnykh работ v SShA [Equipment and technology of blasting works in the USA]. Moscow: Nedra, 375 p.
16. Voprosy teorii vzryvchatykh veshchestv [Issues of the theory of explosives]. Kn. 1, 1947. Moscow; Leningrad: Izd-vo Akad. nauk SSSR, 188 p.
17. Landau L.D., 1969. Sbranie trudov: v 2 t., T.1. [Collected works: in 2 volumes, Vol. 1]. Pod red E.M. Lifshitsa. Moscow: Nauka, 512 p.
18. Avakyan G.L., 1964. Raschet energeticheskikh i vzryvchatykh kharakteristik VV [Calculation of energy and detonation characteristics of explosives]. Moscow: Izd-vo VIA, 84 p.
19. Emul'sionnoe promyshlennoe vzryvchatoe veshchestvo "Nitronit". Tekhnicheskie usloviya TU 7276-003-58995878-2004, 2004 [Emulsion industrial explosive "Nitronite". Technical specifications TU 7276-003-58995878-2004, 2004]. Kachkanar, OOO "AVT-Ural", 19 p.
20. Emul'sionnoe promyshlennoe vzryvchatoe veshchestvo "Poremit-1A". Tekhnicheskie usloviya TU 84-08628424-671-96, 1996 [Emulsion industrial explosive "Poremit-1A". Technical specifications TU 84-08628424-671-96, 1996]. Dzerzhinsk, FGUP GosNII "Kristall", 19 s.
21. Emul'sionnoe promyshlennoe vzryvchatoe veshchestvo "Fortis": Tekhnicheskie usloviya TU 7276-001-23308410-2006 (s izmeneniyami, na 26.01.2015 g.), 2015 [Emulsion industrial explosive "Fortis": Technical specifications TU 7276-001-23308410-2006 (as amended on 26.01.2015), 2015]. Moscow, 21 p.
22. Men'shikov P.V., Zharikov S.N., Kutuev V.A., 2021. Opredelenie shiriny zony khimicheskoi reaktsii promyshlennogo emul'sionnogo vzryvchatogo veshchestva poremit 1A na osnove printsipa neopredelennosti v kvantovoi mekhanike [Determination of the width of the chemical reaction zone of the industrial emulsion explosive poremit 1A based on the uncertainty principle in quantum mechanics]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № 5 - 2, P. 121 – 134. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_52\_0\_121.
23. Men'shikov P.V., Zharikov S. N., Kutuev V. A., 2020. Issledovanie detonatsionnykh kharakteristik EVV poremit 1A [Study of detonation characteristics of EEM poremit 1A]. Problemy nedropol'zovaniya, № 4, P. 32 - 41, DOI: 10.25635/2313-1586.2020.04.032.
24. Kutuev V.A., 2016. Izuchenie detonatsionnykh kharakteristik promyshlenno-go emul'sionnogo vzryvchatogo veshchestva poremit-1A, s ispol'zovaniem registratora dannykh "DATATRAPII™" [Study of detonation characteristics of the industrial emulsion explosive poremit-1A, using the DATATRAPII™ data recorder]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № S21, P. 101 - 109.
25. Kutuev V.A., Flyagin A.S., Zharikov S.N., 2021. Issledovanie detonatsionnykh kharakteristik PEVV NPGM s razlichnymi iskhodnymi komponentami emul'sii pri initsirovani zaryadov raznymi promezhutochnymi detonatorami [Study of detonation characteristics of industrial emulsion explosive NPGM with different initial components of the emulsion when initiating charges with different intermediate detonators]. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle, № 3, P. 175-187, DOI: 10.46689/2218-5194-2021-3-1-169-181.
26. Kutuev V.A., Men'shikov P.V., Zharikov S.N., 2016. Analiz metodov issledovaniya detonatsionnykh protsessov VV [Analysis of methods for the study of detonation processes of explosives]. Problemy nedropol'zovaniya, № 3, P. 78 - 87. DOI: <https://doi.org/10.18454/2313-1586.2016.03.078>