

УДК 622.235.213.2

DOI: 10.46548/21vek-2020-0952-0026

**ОЦЕНКА ЭКОТОКСИЧНОСТИ ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА ПРОМЫШЛЕННЫХ  
ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ**

©2020

**Гармашов Алексей Сергеевич**, аспирант, старший лаборант кафедры техносферной безопасности**Акинин Николай Иванович**, доктор технических наук, профессор,

заведующий кафедрой техносферной безопасности

**Михеев Денис Игоревич**, старший преподаватель кафедры техносферной безопасности*Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева**(125047, г. Москва, Миусская площадь, д. 9,**e-mails: akinin@muctr.ru, garmashov@muctr.ru, mikheevmd@mail.ru)*

**Аннотация.** С момента появления промышленности в нашем мире, в качестве неотъемлемой части прогресса, экологическим аспектам функционирования любой отрасли посвящается недостаточно времени, а порой они игнорируются. Из-за недостаточной изученности экологической составляющей любой отрасли производства или добычи полезных ископаемых под угрозой оказывается устойчивое развитие человечества. Главная задача настоящей работы заключается в описании и анализе некоторых расчетных подходов к оценке экотоксичности газообразных продуктов взрыва, полученных путем взрывания аммиачно-селитренных взрывчатых веществ. При глубоком анализе существующих расчетных методик для оценки экотоксичности газообразных продуктов взрыва становится понятно, что такие расчетные методы основаны на приближенной оценке и не всегда могут быть объективно достоверными. В ходе работы приведен анализ существующей проблемы с экологической точки зрения, описаны механизмы и особенности образования токсичных продуктов взрыва, с которыми сталкивались ученые при разработке расчетных методов определения газообразного состава продуктов взрывания. Проанализированы результаты расчетов программных комплексов "Real" и "Shock and Detonation", в сравнении с экспериментальными данными. Показано, что используемые методы расчета не могут быть применены для полноценного расчета качественного и количественного состава продуктов взрыва, и нуждаются в доработке.

**Ключевые слова:** газообразные продукты взрыва, промышленные взрывчатые вещества, состав продуктов взрыва, токсичность.

**EVALUATION OF ECOTOXICITY OF PRODUCTS OF EXPLOSION OF  
INDUSTRIAL EXPLOSIVES**

©2020

**Garmashov Alexey Sergeevich**, postgraduate student,

senior laboratory assistant department of technosphere safety

**Akinin Nikolai Ivanovich**, doctor of technical sciences, professor,

head of the department of technosphere safety

**Mikheev Denis Igolevich**, senior lecturer, department of technosphere safety*D.Mendeleev University of Chemical Technology of Russia**(125047, Moscow, Miusskaya square, 9, e-mails: akinin@muctr.ru, garmashov@muctr.ru, mikheevmd@mail.ru)*

**Annotation.** Since the emergence of industry in our world, as an integral part of progress, not enough time is devoted to the environmental aspects of the functioning of any industry, and sometimes this aspects are ignored. Due to insufficient knowledge of the ecological component of any branch of production or mining, the sustainable development of mankind is under threat. The main objective of this work is to describe and analyze some computational approaches to assessing the ecotoxicity of gaseous explosion products obtained by detonating ammonium nitrate explosives. With a deep analysis of the existing calculation methods for assessing the ecotoxicity of gaseous explosion products, it becomes clear that such calculation methods are based on an approximate estimate and may not always be objectively reliable. In the course of the work, an analysis of the existing problem is given from an environmental point of view, the mechanisms and features of the formation of toxic explosion products, which scientists encountered when developing calculation methods for determining the gaseous composition of explosion products, are described. The results of calculations of software systems "Real" and "Shock and Detonation" are analyzed in comparison with experimental data. It is shown that the calculation methods cannot be used for a full-fledged calculation of the qualitative and quantitative composition of the explosion products, and need to be improved.

**Keywords:** gaseous explosion products, industrial explosives, composition of explosion products, toxicity.

**Введение.** В ходе ежегодной пресс-конференции главы государства, а именно "Послания Федеральному Собранию", президент Российской Федерации заявил, что, начиная с 2021 года, необходимо усиленно развивать исследования отечественных и зарубежных

ученых по проблемам экологии [1].

Рассматривая крупные промышленные центры, необходимо выделить территории азиатской части России. Так как там находится основные месторождения полезных ископаемых, то экономически и логи-

стически верным решением является расположение горно-обогатительных комбинатов (ГОК) вблизи мест добычи.

Как и отрасли энергетики, доля выбросов которых составляет 78,9% на 2017 год, так и остальная промышленность, исключая отрасли землепользования, изменений в землепользовании и лесного хозяйства (ЗИЗЛХ) являются потребителями природных ископаемых (каменный уголь, золотоносные руды и т.д.), добыча которых происходит с помощью промышленных взрывчатых веществ (ПВВ) [2].

Промышленные взрывчатые вещества (ПВВ) – взрывчатые вещества, используемые в мирных целях. При использовании взрывных зарядов для частичного разрушения горных пород различной крепости существует опасность травмирования, утраты здоровья или же смерти не только от механического действия взрыва, но и от токсичных газовых выбросов, полученных путем взрывного превращения ПВВ. Стоит отметить, что продукты взрыва (ПВ) оказывают прямое воздействие на атмосферный воздух, поверхностные (в случае расположения мест добычи вблизи рек и озер) и подземные воды, почвенный покров.

По данным Федеральной Службы по Экологическому, Технологическому и Атомному Надзору (ФСЭТАН, Ростехнадзор) количество ПВВ, израсходованных организациями-потребителями в 2018 году составило 1.9 млн т (1.8 млн т в 2017 году) [3].

В настоящее время приняты различные организационно-технические мероприятия комплексного обеспечения безопасности работников от механического действия взрыва. Однако вопросам защиты человека и окружающей среды от токсичных газовых выбросов (продуктов взрыва) уделяется меньшее внимание. Полностью исключить применение взрывчатки, взрывное превращение которой ведет к образованию токсичных продуктов – невозможно.

Теоретически, при взрывании, в идеальных условиях, взрывчатое превращение ВВ с нулевым кислородным балансом (КБ) должно привести к образованию только конечных продуктов взрыва: углекислого газа ( $CO_2$ ), воды ( $H_2O$ ) в виде пара и азота ( $N_2$ ). В практических, производственных условиях, применяют ВВ с КБ близким к нулю, с некоторыми отклонениями в положительную или отрицательную область. При  $КБ > 0$  увеличивается эмиссия оксидов азота ( $NO_x$ ), а при  $КБ < 0$  – оксида углерода ( $CO$ ) [4-6].

С 1930-х годов начались поиски универсальной методики, которая отражала бы в лабораторных условиях картину, похожую на промышленное проведение взрывных работ. Основная проблема при проведении лабораторных опытов – значительная разница в результатах опытов, в сравнении с результатами, полученными при взрывных работах в производственных условиях. Ученые выделяют основные факторы, влияющие на образование ПВ: степень смешения компонентов, плотность заряда ВВ, вид оболочки патрона, обводненность заряда, влияние окружающих заряд горных пород, величина зазоров в шпуре/скважине,

размеры шпура/скважины, наличие забойки, и др. Другими словами – все физические и физико-химические условия, присутствующие при проведении взрывных работ, влияют на образование ПВ [5,7-12].

Ведя речь о теоретических способах оценки газовой составляющей ПВ стоит отметить, что многими учеными были сделаны попытки разработки методик по расчету газообразных составов продуктов взрыва. Большинство предложенных методик получили широкое распространение только в расчетах индивидуальных (однокомпонентных) ВВ, и довольно хорошо согласовывались с результатами лабораторных испытаний. Основной алгоритм, представленный в научных трудах, включал в себя предполагаемый расчет ПВ. Авторы принимали образование оксидов азота равным нулю, потому что для них стоит задача не в расчете состава ПВ, а в том, чтобы по составу ПВ составить уравнения для расчета теплоты взрыва, основываясь на ПВ. Так сказать, поступали от обратного [13].

Если же говорить о смесевых составах (многокомпонентных и гетерогенных ВВ), то результаты расчетов плохо согласовывались с экспериментальными данными. Главная сложность расчетов состоит в том, что невозможно точно определить истинный состав ПВ к моменту завершения процесса их расширения. Уравнение, связывающее формулу индивидуального или смесового ВВ с составом ПВ, называют уравнением реакции взрывчатого превращения. Это уравнение не даёт ни представления о большом количестве элементарных процессов, протекающих в зоне "хим-пика" детонационной волны (ДВ), ни точного состава ПВ, расширяющихся от состояния точки Чепмена-Жуге, через подвижное равновесие на изоэнтропе до конечного состояния ПВ. Оно показывает конечный результат реакции превращения ВВ в ПВ [13]. Нельзя не отметить, что при расчете состава ПВ, в расчет вносятся довольно большие допущения. Дело в том, что продукты распада компонентов вступают во взаимодействие (вторичные реакции) в газовой фазе.

**Цель** исследования заключалась в проведении количественного и качественного расчета составов ПВ для смесевых ВВ с дальнейшим анализом данных, с целью поиска новых расчетных подходов.

**Материалы и методы исследования.** Для реализации идеи мы использовали программные комплексы "Real" [14] и "Shock and Detonation", разработанный учеными РХТУ им. Д.И. Менделеева [15], использовавшиеся ранее для оценки экотоксичности промышленных взрывчатых составов на основе энергоемких компонентов утилизируемых боеприпасов [16-17].

Исходя из вышесказанного, нами была предпринята попытка получить расчетные данные, с максимальным приближением к литературным данным. В процессе расчета мы использовали вириальное уравнение состояния (1), наиболее подходящее под специфику расчетов.

$$p = \rho R_0 T (1 + B\rho + C\rho^2) \quad (1)$$

**Результаты исследования.** В таблицах 1 и 2 сведены результаты расчетов ПВ в сравнении с экспериментальными данными из [18].

Где  $p$  - давление,  $\rho$  - молярная плотность газовой фазы ( $\rho = ng/Vg$ ),  $R_0$  - универсальная газовая постоянная,  $T$  - температура;  $B$ ,  $C$  - вириальные коэффициенты.

Наибольшая корреляция с экспериментальными данными выявлена при температуре 2400K для Аммонита 6-ЖВ и 3080K для Игданита 5,5. В аналогичных расчетах в программе «Shock and Detonation», значения температуры составили 3254K и 2143K соответственно. Результаты расчетов и данные, полученные экспериментальным методом [18], сведены в таблице 1. Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными [18] представлено в таблице 2.

Таблица 1 – Результаты расчетов и экспериментальные данные

Данные	ВВ	Количество, моль/кг				
		$N_xO_y$	$CO_2$	$CO$	$H_2$	$CH_4$
Экспериментальные данные	Аммонит 6-ЖВ	0,1295	7,4777	0,1518	0,0536	0,0107
	Игданит 5,5	0,1696	2,0804	1,1830	0,4576	0,0893
Результаты расчета Real	Аммонит 6-ЖВ	0,0720	6,2663	0,2056	0,1212	0
	Игданит 5,5	0,3853	2,9577	0,9261	1,0990	0
Результаты расчета SD	Аммонит 6-ЖВ	0,0647	6,4700	0,0019	0,0010	0
	Игданит 5,5	0	3,8800	0,0007	0,0164	0,0001

Таблица 2 – Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными

Данные	ВВ	Сумма ПВ, моль/кг	$\Delta, \%$	Только $N_xO_y$ и $CO_2$ , моль/кг	$\Delta, \%$	В пересчете на условный $CO$ , моль/кг	$\Delta, \%$
Экспериментальные данные	Аммонит 6-ЖВ	7,8232	·	0,2813	·	0,9933	·
	Игданит 5,5	3,9799	·	1,3527	·	2,2857	·
Результаты расчета Real	Аммонит 6-ЖВ	6,6651	-14,80	0,2776	-1,30	0,6735	-32,20
	Игданит 5,5	5,3682	-34,88	1,3115	-3,05	3,4308	+50,10
Результаты расчета SD	Аммонит 6-ЖВ	6,5376	-16,43	0,0666	-76,33	0,4224	-57,47
	Игданит 5,5	3,8972	-2,08	0,0007	-99,95	0,0007	-99,97

Обращая внимание на отклонение результатов расчета от экспериментальных данных (табл. 2), необходимо отметить, что алгоритм расчета обеих программ основан на использовании вириального уравнения, однако, в некоторых случаях, результаты отличаются на несколько порядков. При сравнении количеств суммарных значений газообразных ПВ, большее отклонение от эксперимента наблюдается в результатах программы «Real». Если же акцентировать внимание на основных токсичных составляющих продуктов взрыва, то результаты расчета в «Shock and

Detonation» отличаются от результатов, полученных в программе «Real», и экспериментальных данных, в несколько раз. Беря во внимание последний столбец таблицы 2, можно заметить, что в результатах расчета обеих программ наблюдается отклонение не менее 32%. Суммарные количества оксидов азота и монооксида углерода в результатах расчета программы «Real» и экспериментом обладают минимальной разницей, однако при пересчете по методике [19] в условный монооксид углерода, в значениях наблюдается отклонение минимум в треть из-за того, что для пересчета концентраций оксидов азота в условный  $CO$ , коэффициент принимается равным 6,5, а у  $CO$  – 1. Этим и объясняется разброс данных, связанный с заниженными значениями  $NO$  в расчетах

**Заключение.** В качестве заключения необходимо отметить что на сегодняшний день отсутствуют адекватные расчетные методы определения состава газообразных ПВ, а реализация экспериментального анализа ПВ с минимальными финансовыми и техническими затратами – невозможна [20]. Рассматривая данный расчетный способ оценки экотоксичности ПВ, говорить о его применимости достаточно сложно, так как любые методы расчетов или прогнозирования, требуют доработки для учета практических наблюдений. Например, для ВВ на основе аммиачной селитры, на практике, наблюдаются большие концентрации оксидов азота в ПВ, даже при нулевом или близком к нулевому кислородному балансу, нежели в лабораторных условиях. Это объясняется неполнотой проходящих реакций из-за различных условий взрыва [4].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Государственный интернет-портал «Официальные сетевые ресурсы Президента России» (<http://kremlin.ru/events/pr-president/news/62582>) [электронный ресурс, дата обращения: 15.02.2020].
2. Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом, за 1990–2018 годы / Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), Часть 1 изд. Москва: 2020.
3. Годовой отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2018 году / Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору / Москва: 2019.
4. Дубнов Л.В., Бахаревиц Н.С., Романов А.И. Промышленные взрывчатые вещества // М.: «Недра», 1988. – С. 26-62.
5. Oluwoye I. et al. Atmospheric emission of  $NO_x$  from mining explosives: A critical review // *Atmospheric Environment*. – 2017. – Т. 167. – С. 81-96.
6. Холоденко Т.Ф., Колесник В.Е., Павличенко А.В. Влияние внутренних (рецептурных) особенностей эмульсионных взрывчатых веществ на эмиссию загрязняющих веществ в продуктах взрыва в атмосферу // *Геотехнічна механіка*. – 2016. – №. 131. – С. 121-132.
7. Б.Д. Росси. Ядовитые газы при подземных взрывных работах // М.: Недра, 1966. – С. 12-60.
8. З.Г. Поздников, Б.Д. Росси. Справочник по промышленным взрывчатым веществам и средствам взрыва // -

Изд. 2, перераб. и доп. / М.: «Недра», 1977.

9. Взрывное дело. Сборник 68/25. Борьба с ядовитыми газами при взрывных работах и новые методы испытаний промышленных ВВ / М.: «Недра», 1970. – С. 8-23.

10. Бабкин Р.С. Снижение выбросов оксидов азота при ведении взрывных работ на месторождениях, разрабатываемых открытым способом : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 25.00.20 / С.-Петербург. гос. гор. ун-т – 2018. – 20 с.

11. Skarlis S.A. et al. Combined experimental and kinetic modeling approaches of ammonium nitrate thermal decomposition //Thermochimica Acta. – 2014. – Т. 584. – С. 58-66.

12. Петров Е.А., Удовиченко В.П., Аверин А.А. Результаты экспериментальной оценки состава продуктов взрыва в зависимости от условий испытаний во взрывной камере // Вестник Научного центра. 2007. №2.

13. Физика взрыва / Под. Ред. Л.П. Орленко. – Изд. 3-е, переработанное. – В 2т. Т.1. / М.: «ФИЗМАТЛИТ», 2002. – С. 123-131.

14. Белов Г.В. «REAL Программный комплекс для моделирования равновесных состояний термодинамических систем при повышенных значениях температуры и давления» // Москва 1983-2007 - 23 с.

15. A.I. Sumin, V.N. Gamezo, B.N. Kondrikov, R.V. Raikova. Shock and detonation general kinetics and thermodynamics in reactive systems computer package. Trans. Of the 11-th (Int.) Detonation Symp., Snowmass, Colorado, USA. August 31-September 4, 1998, Bookcomp, Ampersand, 2000.

16. Анников В.Э., Акинин Н.И., Михеев Д.И., Ротенберг Е.В. Оценка экологической безопасности при утилизации артиллерийских боеприпасов // Взрывное дело. -№111/68. - 2014. - с. 275-282.

17. Акинин Н.И., Анников В.Э., Михеев Д. И., Трунин В. В. Разработка пороховых водно-гелевых составов пониженной экотоксичности // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2018. - № 2. - С. 81–88.

18. Доманов В.П., Варнаков Ю.В., Батраков Д.Н., Плешаков К.А., Варнаков К.Ю. Исследования газовой вредности взрывчатых веществ, предназначенных для формирования скважинных зарядов // Вестник Научного центра 2012. - №2. – С.51-56.

19. Постановление Госгортехнадзора РФ «Об утверждении «Правил безопасности в угольных шахтах» от 05.06.2003 N 50 (ред. от 20.12.2010) // Российская газета

20. Козырев С.А., Власова Е.А., Соколов А.В. Способ определения газовой вредности промышленного взрывчатого вещества // Патент России № 2407985. 2010. Бюл. № 36

*Статья поступила в редакцию 05.08.2020*

*Статья принята к публикации 14.09.2020*