

DOI: 10.24000/0409-2961-2021-11-47-52

УДК 622.235:622.272

© Коллектив авторов, 2021

Исследование и разработка компонентов газогенераторных составов на основе нитрата аммония для повышения безопасности производства взрывных работ

Д.А. Байсейтов, канд. хим. наук, ст. преподаватель, dauren_b91@mail.ru, **М.И. Тулепов**, канд. хим. наук, доцент, зав. кафедрой, **Ж.А. Амир**, аспирант, **А.Е. Оразбаев**, канд. хим. наук, ст. преподаватель, **С. Турсынбек**, преподаватель (КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Республика Казахстан)

В результате проведенных работ разработан газогенераторный состав NH_4NO_3 — 80 %, С — 15 %, Al — 5 %, который может быть использован для направленного разрушения крепких пород в режиме дефлаграции. Изучено влияние различного количества порошка алюминия на характеристики горения газогенераторного состава на основе нитрата аммония. Расчетными и экспериментальными данными установлено, что более 5 % алюминия вводить в состав нецелесообразно. Полигонными испытаниями показана эффективность разработанных газогенераторных составов, работающих в дефлаграционном режиме. Переход на низкоскоростной режим химического превращения газогенераторного состава позволяет исключить образование вредных, ядовитых газов и бризантное действие взрыва, образование ударных воздушных волн и разлет отдельных фрагментов породы.

Ключевые слова: газогенераторный состав, камень, нитрат аммония, взрывные работы, безопасность, пиротехнический патрон, дефлаграция.

Для цитирования: Байсейтов Д.А., Тулепов М.И., Амир Ж.А., Оразбаев А.Е., Турсынбек С. Исследование и разработка компонентов газогенераторных составов на основе нитрата аммония для повышения безопасности производства взрывных работ // Безопасность труда в промышленности. — 2021. — № 11. — С. 47–52. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-11-47-52

Введение

В последнее время при добыче блочного камня используют эффективные газогенераторные составы. Газогенераторные составы закладывают в шпуры диаметром не менее 28 мм, длиной не менее 80 мм по линии шпура в температурном режиме от -30 до 35 °С. При инициировании газогенераторного состава в шпуре происходит скоростное сгорание или дефлаграционное сгорание, за счет выделения газообразных продуктов создается усилие для откола монолита [1, 2]. В Санкт-Петербургском горном университете проводятся научные работы по созданию газогенераторных химических патронов, в которых разрушение конструкции происходит в шадящем режиме [3].

Известно [4–6], что пироксилиновый артиллерийский порох и баллиститное ракетное твердое топливо являются твердыми газогенерирующими материалами. При сгорании этих веществ выделяются газообразные продукты объемом до 1000 нл/кг. Температура сгорания самого низкого низкоэнергетического баллистита, способного устойчиво гореть при давлении не ниже 4 МПа, 1600–1700 К.

В последнее время широко используют газогенераторные составы на основе перхлоратов с углеводородами C_xH_y [7, 8]. В качестве углеводородов в этих составах используют такие полимеры, как полиэтилен, полипропилен, полиэтилентерефталат. Еще одним преимуществом данных составов является

возможность приготовления их непосредственно на местах работ, что в свою очередь позволяет повысить безопасность труда [9].

При разработке газогенераторных составов и изделий на их основе широко применяют нитраты. В настоящее время представляют интерес пиротехнические составы на основе нитрата аммония (НА) [10–13]. Это обусловлено прежде всего низкой стоимостью НА, низкой чувствительностью к механическим и детонационным воздействиям и существенно более низким содержанием вредных соединений в продуктах горения по сравнению с аналогами.

Цель работы — разработка газогенераторных составов, которые применимы без добавления дополнительных компонентов для раскалывания в шадящем режиме блочного камня или разрушения твердых минеральных пород.

Экспериментальная часть

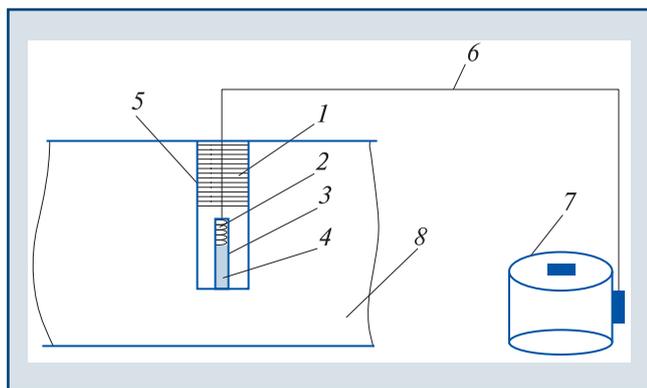
Составы готовили с различным соотношением компонентов: порошок НА использовали в качестве окислителя, порошок алюминия марки ПА-4 — в качестве горючего, порошок технического углерода — как газообразующий агент.

Для получения газогенераторных составов системы NH_4NO_3 —С—Al количество НА, алюминия, технического углерода меняли в ходе расчетов с учетом стехиометрии и возможности оптимизации содержания алюминия в исходной смеси компонентов для увеличения энергетики составов.

Скорость горения составов измеряли методом перегорающих проволок [14].

Термодинамические расчеты проведены при давлении 0,1 МПа с помощью программы TERRA [15], усовершенствованной и предназначенной для работы на электронно-вычислительной машине. Программа TERRA основана на принципе максимума энтропии, имеет обширную базу данных по термодинамическим свойствам веществ и позволяет получить полную информацию термодинамического анализа. Программа отличается высоким быстродействием и простотой в использовании. Для старта работы в программе TERRA задаются: исходный состав сырья в мольных долях, давление $P = 0,1$ МПа и энтальпия образования $I_{исх}$.

Разрушение камня на отдельные блоки проводили по схеме, представленной на рис. 1 (здесь 1 — быстрохватывающаяся смесь (цемент + CaCl_2); 2 — спираль накаливания; 3 — газогенераторный патрон; 4 — пиротехнический газогенераторный состав; 5 — шпур; 6 — кабель; 7 — лабораторный автотрансформатор; 8 — камень).



▲ Рис. 1. Схема эксперимента
▲ Fig. 1. Scheme of the experiment

Бурение шпура 5 велось ручными перфораторами. Диаметр шпура — 5 см, глубина — 30 см. В целях создания замкнутого объема устье шпура герметично заделывали быстротвердеющими смесями 1. Заряды 4 в шпурах формировали из полипропиленовой трубы 3 диаметром 10 мм и высотой 30 мм (рис. 2). Инициирование заряда осуществляли с помощью спирали накаливания 2, концевые отрезки которой подсоединяли к кабелю 6. Импульс подавался от лабораторного автотрансформатора 7 через кабель.

Результаты и их обсуждение

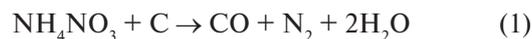
В качестве окислителя газогенераторных составов использовали НА, так как он способен выделить достаточное количество газообразных продуктов объемом до 980 л/кг. Кроме того, разложение составов на основе НА происходит в режиме низкоскоростной детонации или дефлаграции [16]. Работу проводили в целях поиска и создания новых газогенераторных составов, горение которых происходит в режиме



▲ Рис. 2. Общий вид пиротехнического патрона массой 40 г
▲ Fig. 2. General view of a pyrotechnic cartridge weighing 40 g

дефлаграции, в основном для нужд горной промышленности при шадящем (осторожном взрывании) разрушении естественных и искусственных объектов.

Реакция горения двойной смеси НА — углерод:



Содержание компонентов рассчитывали по формуле:

$$\%_{\text{гор}} = M_{\text{гор}} / (M_{\text{ок}} + M_{\text{гор}}) \cdot 100;$$

$$\%_{\text{ок}} = M_{\text{ок}} / (M_{\text{ок}} + M_{\text{гор}}) \cdot 100, \quad (2)$$

где $\%_{\text{гор}}$, $\%_{\text{ок}}$ — процентное содержание соответственно горючего и окислителя, $\%$; $M_{\text{гор}}$, $M_{\text{ок}}$ — молярные массы соответственно горючего и окислителя, г/моль.

Молярные массы НА и углерода равны соответственно 80 и 12 г/моль. Рассчитаем их процентное содержание:

$$\text{NH}_4\text{NO}_3 = 1 \cdot 80 / (1 \cdot 80 + 1 \cdot 12) \cdot 100 = 87;$$

$$\text{C} = 1 \cdot 12 / (1 \cdot 80 + 1 \cdot 12) \cdot 100 = 13.$$

Из расчета видно, что стехиометрической смесью НА и углерода является соотношение соответственно 87 и 13 масс. %.

Для определения оптимального состава и эффективности использования проведена серия расчетов параметров горения газогенераторного состава $\text{NH}_4\text{NO}_3 - \text{C} - \text{Al}$. Массовое соотношение окислителя и горючего в составе (NH_4NO_3 и C) принималось

равным 0,83 к 0,17. Массовая доля алюминия в газогенераторном составе изменялась от 0 до 9 %.

Основные расчетные термодинамические характеристики горения исследуемых составов приведены в табл. 1: значения энтальпии I , адиабатической температуры $T_{ад}$, числа молей M , газовой постоянной R , работоспособности продуктов сгорания RT , равновесного показателя адиабаты k и массовой доли конденсированных фаз z .

Состав	I , кДж/кг	$T_{ад}$, К	M , моль/кг	R , Дж/(кг·К)	RT , кДж/кг	k	z , %
NH_4NO_3 — 83 %, С — 17 %, Al — 0 %	-3350	1490	32,871	276,99	625,0	1,2099	1,9
NH_4NO_3 — 82 %, С — 17 %, Al — 1 %	-3280	1723	32,474	281,33	650,0	1,2272	5,7
NH_4NO_3 — 81 %, С — 17 %, Al — 2 %	-3220	1860	32,848	293,10	690,0	1,2261	9,4
NH_4NO_3 — 81 %, С — 16 %, Al — 3 %	-3150	1976	33,402	307,97	725,0	1,2194	13,4
NH_4NO_3 — 80 %, С — 15 %, Al — 5 %	-3080	2272	32,279	306,24	800,0	1,1900	17,0
NH_4NO_3 — 77 %, С — 16 %, Al — 7 %	-3010	2255	32,555	313,99	780,0	1,1879	18,6
NH_4NO_3 — 75 %, С — 16 %, Al — 9 %	-2950	2067	32,954	314,46	750,0	1,2357	18,2

Таблица 1

Как видно из табл. 1, увеличение содержания алюминия в составе приводит к росту адиабатической температуры $T_{ад}$, работоспособности продуктов сгорания RT и массовой доли конденсированных фаз. Введение алюминия выше 5 % вызывает снижение значений этих параметров. Газогенераторные составы пиротехнических патронов характеризуются следующими параметрами: работоспособность продуктов сгорания или сила пороха, удельная газопроизводительность. Эти характеристики являются определяющими факторами при разработке газогенераторных составов. Самое высокое значение RT наблюдается при содержании 5 % Al — 800 кДж/кг.

Также подсчитана удельная газопроизводительность V_H от содержания Al в смеси NH_4NO_3 -С-Al (табл. 2). Увеличение содержания Al не оказывает существенного влияния на изменения значений газопроизводительности, она меняется в диапазоне от 1003 до 951 л/кг.

Согласно данным табл. 1 и 2, оптимальным составом является рецептура пиротехнического патрона с содержанием 5 % Al.

На основании проведенных термодинамических расчетов предварительно определены следующие компоненты для синтеза газогенераторного состава № 5: NH_4NO_3 — 80 %, С — 15 %, Al — 5 %, так как именно этот состав характеризуется большим значением RT .

Экспериментальные исследования

Для сравнительного анализа расчетных данных проведено экспериментальное исследование горения данных составов. Следующий состав пиротехнического патрона готовился с различным соотношением компонентов: порошок НА, порошок технического углерода, порошок алюминия марки ПА-4.

Фото горения состава NH_4NO_3 -С-Al приведено на рис. 3. Экспериментальные образцы газогенераторных составов сжигали в атмосфере. Процесс

сопровождался выделением большого количества энергии, что свидетельствует об интенсификации реакции образования газообразных продуктов в процессе дефлаграционного горения.

Определялась скорость горения газогенераторных составов в системе NH_4NO_3 -С-Al в зависимости от содержания алюминия в пиротехническом патроне. Как видно из рис. 4, скорость горения исследуемого состава изменялась от 0,33 до 1,25 мм/с.

Таблица 2

Параметр	№ состава						
	1	2	3	4	5	6	7
V_H , л/кг ($P = 0,1$ МПа)	1003	1000	990	980	971	961	951

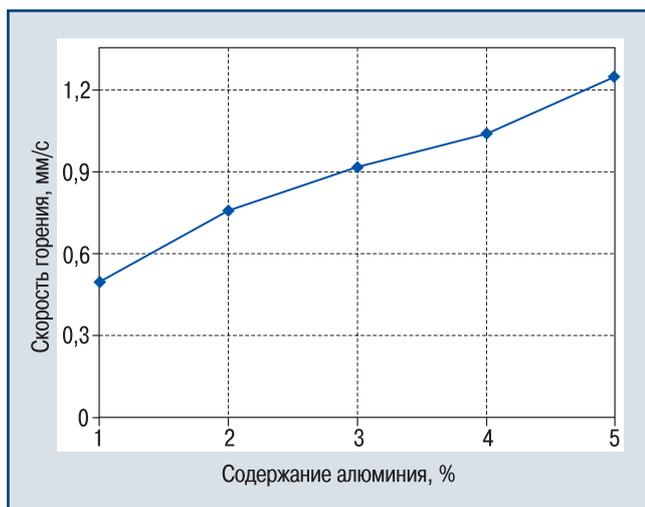


▲ Рис. 3. Фрагмент горения состава NH_4NO_3 -С-Al
▲ Fig. 3. Fragment of combustion of NH_4NO_3 -С-Al composition

Увеличение содержания алюминия позволяет повысить скорость горения составов за счет более полного восстановления НА. Оптимальное содержание алюминия 5 %. Дальнейшее увеличение содержания алюминия выше 5 % приводит к снижению скорости горения, так как выделившееся тепло расходуется на плавление и окисление избытка алюминия. При содержании алюминия более 5 % снижаются энерге-

тические характеристики композиции, т.е. при 7 % и выше алюминий не производит эффекта повышения работоспособности пиротехнического патрона. Это объясняется снижением давления, которое создается при сгорании композиции, даже если возрастает температура продуктов реакции, происходит увеличение объема конденсированных продуктов, следовательно, объем газовой фазы уменьшается. При этом оптимальное количество алюминия в составе не должно превышать 5 %, дальнейшее увеличение алюминия в составе приводит к удорожанию топлива.

В случае газогенератора состав должен иметь большую скорость горения. Приведенные данные на рис. 4 показали, что оптимальным является газогенераторный состав с содержанием алюминия 5 %. Результаты экспериментов хорошо согласуются с данными термодинамического расчета. По результатам сравнительных расчетов и экспериментальных работ выбрана следующая рецептура для создания газогенераторного состава: NH_4NO_3 – 80 %, С – 15 %, Al – 5 %.



▲ Рис. 4. Зависимость скорости горения от содержания алюминия в составе NH_4NO_3 -С-Al

▲ Fig. 4. Dependence of the combustion rate on the aluminum content in the composition of NH_4NO_3 -С-Al

Полигонные испытания

Для полигонных испытаний подготовлен камень Текельского месторождения (рис. 5).

В полигонных условиях проведены исследования по разрушению камня путем инициирования заряда (газогенераторный состав) спиралью накаливания (нихром). Камень, разрушенный газогенераторным составом NH_4NO_3 – 80 %, С – 15 %, Al – 5 %, приведен на рис. 6. После подачи импульса на спираль накаливания заряд сработал и камень был разрушен без разлета мелких фрагментов. Из этого можно сделать вывод, что при срабатывании газогенераторного состава NH_4NO_3 – 80 %, С – 15 %, Al – 5 % происходило эффективное разложение НА в замкнутом пространстве, при этом данный состав претерпевал



▲ Рис. 5. Камень, заряженный зарядом газогенераторного состава NH_4NO_3 – 80 %, С – 15 %, Al – 5 %

▲ Fig. 5. Stone charged with a charge of the gas generator composition of NH_4NO_3 – 80%, С – 15%, Al – 5 %



▲ Рис. 6. Камень после сгорания газогенераторного состава NH_4NO_3 – 80 %, С – 15 %, Al – 5 %

▲ Fig. 6. Stone after combustion of gas generator composition of NH_4NO_3 – 80 %, С – 15 %, Al – 5 %

физико-химическое превращение в режиме дефлаграционного горения.

В результате проведенных работ разработан газогенераторный состав NH_4NO_3 – 80 %, С – 15 %, Al – 5 %.

Al — 5 %, который может быть использован для направленного разрушения в режиме дефлаграции крепких пород с коэффициентом крепости 8. Изучено влияние различного количества порошка алюминия на характеристики горения газогенераторного состава на основе НА. Расчетными и экспериментальными данными установлено, что более 5 % алюминия вводить в состав нецелесообразно. Полигонными испытаниями показана эффективность разработанных газогенераторных составов, работающих в дефлаграционном режиме. Показано, что переход на низкоскоростной режим химического превращения газогенераторного состава (дефлаграцию) позволяет полностью исключить бризантное действие в зоне контакта пиротехнического патрона со стенками зарядной камеры. Кроме того, применение этих патронов делает процесс заряжания технологичным, а обращение с ними при хранении, перевозке и использовании более безопасным.

Основная особенность проведения полигонных испытаний заключается в том, что они не требуют дорогостоящего оборудования, отличаются простотой и быстротой процесса.

Заключение

По результатам проведенных исследований разработан газогенераторный состав на основе нитрата аммония для повышения эффективности и безопасности производства взрывных работ. Лабораторно-полигонными исследованиями подтверждены эффективность и безопасность использования газогенераторных составов при разрушении камня. Разрушение камня происходило без разлета отдельных фрагментов, формирования и распространения ударно-воздушной волны.

Список литературы

1. *Development and investigation of pyrotechnic gas generating burning compositions/* M. Tulepov, D. Baiseitov, L. Sassykov et al.// *Journal of Chemical Technology and Metallurgy.* — 2018. — Vol. 53. — № 2. — P. 281–288.
2. *Development of gas-generator chemical cartridges working in the mode of non-explosive destructive mixture/* M.I. Tulepov, S.E. Gabdrashova, N.M. Rakhova et al.// *Rasāyan Journal of Chemistry.* — 2018. — Vol. 11. — № 1. — P. 287–293. DOI: 10.7324/RJC.2018.1112013
3. *Лукашук А.В.* Применение химических генераторов давления для откалывания монолитов стенового камня// *Добыча, обработка и применение природного камня: сб. науч. тр.* — Магнитогорск: МагГТУ, 2007. — С. 99–102.
4. *Исследование и разработка компонентов газогенерирующих составов на основе нитропроизводных мочевины/* Г.В. Сакович, С.Г. Ильясов, И.В. Казанцев и др.// *Ползуновский вестник.* — 2010. — № 4-1. — С. 47–51.
5. *Greatrix D.R.* Scale Effects on Quasi-Steady Solid Rocket Internal Ballistic Behaviour// *Energies.* — 2010. — Vol. 3. — № 11. — P. 1790–1804. DOI: 10.3390/en3111790
6. *Blanks R.F., Wittrig T.S., Peterson D.A.* Bidirectional adiabatic synthesis gas generator// *Chemical Engineering Science.* —

1990. — Vol. 45. — Iss. 8. — P. 2407–2413. DOI: 10.1016/0009-2509(90)80122-U

7. *Kohga M., Handa S.* Thermal Decomposition Behaviors and Burning Characteristics of Composite Propellants Prepared Using Combined Ammonium Perchlorate/Ammonium Nitrate Particles// *Journal of Energetic Materials.* — 2018. — Vol. 36. — Iss. 1. — P. 93–110. DOI: 10.1080/07370652.2017.1316794

8. *Study of Pyrotechnic Blue Strobe Compositions Based on Ammonium Perchlorate and Tetramethylammonium Nitrate/* D. Juknelevicius, A. Dufer, M. Rusan et al.// *European Journal of Inorganic Chemistry.* — 2017. — № 7. — P. 1113–1119. DOI: 10.1002/ejic.201601486

9. *Испытания образцов эмульсионного взрывчатого вещества Senatel Magnum до и после введения маркирующей композиции на взрывчатые свойства и критерии безопасности/* Ж.А. Амир, Д.А. Байсейтов, С.Е. Гизатова и др.// *Безопасность труда в промышленности.* — 2021. — № 6. — С. 75–81. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-6-75-81

10. *Reduction of dust emission by monodisperse system technology for ammonium nitrate manufacturing/* M. Skydanenko, V. Sklabinskyi, S. Saleh, S. Barghi// *Processes.* — 2017. — Vol. 5. — № 3. — P. 37–49. DOI: 10.3390/pr5030037

11. *Combustion simulations of aqueous urea ammonium nitrate monofuel at high pressures/* B. Mosevitzky, D.A. Grinberg, G.E. Shter, G.S. Grader// *Combustion and Flame.* — 2016. — Vol. 166. — P. 295–306. DOI: 10.1016/j.combustflame.2016.01.030

12. *Денисюк А.П., Е Зо Тве, Черных С.В.* Исследование закономерностей горения порохов с нитратом аммония// *Успехи в химии и химической технологии.* — 2007. — № 7. — С. 119–123.

13. *Баллистические пороха с нитратом аммония/* Е.В. Ульянова, А.П. Денисюк, Е Зо Тве, Д.Л. Русин// *Успехи в химии и химической технологии.* — 2011. — № 12 (128). — С. 30–34.

14. *Методы исследования горения энергетических материалов. Лабораторный практикум/* В.П. Синдицкий, В.Ю. Егоршев, М.В. Березин, В.В. Серушкин. — М.: ПХТУ им. Д.И. Менделеева, 2010. — 103 с.

15. *Трусов Б.Г.* Программная система моделирования фазовых и химических равновесий при высоких температурах// *Инженерный журнал: наука и инновации.* — 2012. — № 1 (1). DOI: 10.18698/2308-6033-2012-1-31

16. *Березуев Ю.А., Головин Е.В., Кундышев Е.В.* Интенсификация добычи блочного камня с применением газогенераторов давления шпуровых (ГДШ). URL: [http://www.kdu.edu.ua/statti/2007-5-1\(46\)/104.pdf](http://www.kdu.edu.ua/statti/2007-5-1(46)/104.pdf) (дата обращения: 01.08.2021).

dauren_b91@mail.ru

Материал поступил в редакцию 9 августа 2021 г.

«Bezopasnost Truda v Promyshlennosti»/ «Occupational Safety in Industry», 2021, № 11, pp. 47–52.
DOI: 10.24000/0409-2961-2021-11-47-52

Study and Development of the Components of Gas Generator Compositions Based on the Ammonium Nitrate to Improve Blasting Operations Safety

D.A. Bayseytov, Cand. Sci. (Chem.), Senior Lecturer, dauren_b91@mail.ru

M.I. Tulepov, Cand. Sci. (Chem.), Assoc. Prof., Head of the Department

Zh.A. Amir, Candidate

A.Ye. Orazbayev, Cand. Sci. (Chem.), Senior Lecturer

S. Tursynbek, Lecturer

Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Republic of Kazakhstan

Absract

The article is devoted to the study and development of the components of gas generator compositions based on the ammonium nitrate to improve safety of blasting operations. This is primarily due to the low cost of ammonium nitrate, low sensitivity to mechanical and detonation effects and a significantly lower content of harmful compounds in the combustion products compared to the analogues. PA-4 aluminum powder was used as fuel, carbon black powder — as a gas-forming agent. The effect was studied concerning different amounts of aluminum powder on the combustion characteristics of a gas generator composition based on the ammonium nitrate.

Calculated and experimental data showed that it is unreasonable to introduce more than 5 % of aluminum into the composition. According to the results of the conducted study, a gas generator composition based on the ammonium nitrate was developed to increase blasting operations efficiency and safety. Laboratory and polygon studies confirmed the efficiency and safety of using gas generator compositions at the destruction of stone. Destruction of the stone occurred without scattering of individual fragments, formation, and propagation of an air shock wave. Thus, the urgent task is to ensure blasting operations safety using gas generator compositions, which will allow to eliminate the formation of harmful, toxic gases and the high explosive effect.

Key words: gas generator composition, stone, ammonium nitrate, blasting operations, safety, pyrotechnic cartridge, deflagration.

References

1. Tulepov M., Baiseitov D., Sassykova L., Kazakov Y., Gabdrashova S., Mansurov Z., Dalton A. Development and investigation of pyrotechnic gas generating burning compositions. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2018. Vol. 53. № 2. pp. 281–288. (In Russ.).
2. Tulepov M.I., Gabdrashova S.E., Rakhova N.M., Sassykova L.R., Baiseitov D.A., Elemesova Z., Korchagin M.A., Sendivelan S., Pustovalov I.O., Mansurov Z.A. Development of gas-generator chemical cartridges working in the mode of non-explosive destructive mixture. *Rasāyan Journal of Chemistry*. 2018. Vol. 11. № 1. pp. 287–293. DOI: 10.7324/RJC.2018.1112013
3. Lukashchuk A.V. Application of the chemical pressure generators for chipping monoliths of the wall stone. *Dobycha, obrabotka i primeneniye prirodnogo kamnja: sb. nauch. tr.* (Extraction, processing, and application of the natural stone: collection of the scientific works). Magnitogorsk: MagGTU, 2007. pp. 99–102. (In Russ.).
4. Sakovich G.V., Ilyasov S.G., Kazantsev I.V., Ilyasov D.S., Averin A.A., Shatnyy M.V. Study and development of the com-

ponents of gas-generating compositions based on the urea nitro derivatives. *Polzunovskiy vestnik = Polzunovskiy bulletin*. 2010. № 4–1. pp. 47–51. (In Russ.).

5. Greatrix D.R. Scale Effects on Quasi-Steady Solid Rocket Internal Ballistic Behaviour. *Energies*. 2010. Vol. 3. № 11. pp. 1790–1804. DOI: 10.3390/en3111790

6. Blanks R.F., Wittrig T.S., Peterson D.A. Bidirectional adiabatic synthesis gas generator. *Chemical Engineering Science*. 1990. Vol. 45. Iss. 8. pp. 2407–2413. DOI: 10.1016/0009-2509(90)80122-U

7. Kohga M., Handa S. Thermal Decomposition Behaviors and Burning Characteristics of Composite Propellants Prepared Using Combined Ammonium Perchlorate/Ammonium Nitrate Particles. *Journal of Energetic Materials*. 2018. Vol. 36. Iss. 1. pp. 93–110. DOI: 10.1080/07370652.2017.1316794

8. Juknelevicius D., Dufter A., Rusan M., Klapötke T.M., Ramanavicius A. Study of Pyrotechnic Blue Strobe Compositions Based on Ammonium Perchlorate and Tetramethylammonium Nitrate. *European Journal of Inorganic Chemistry*. 2017. № 7. pp. 1113–1119. DOI: 10.1002/ejic.201601486

9. Amir Zh.A., Bayseytov D.A., Gizatova S.E., Kudyarova Zh.B., Tulepov M.I. Tests of Samples of Emulsion Explosive Senatel Magnum before and after Introduction of the Marking Composition for Explosive Properties and Safety Criteria. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2021. № 6. pp. 75–81. (In Russ.). DOI: 10.24000/0409-2961-2021-6-75-81

10. Skydanenko M., Sklabinskyi V., Saleh S., Barghi S. Reduction of dust emission by monodisperse system technology for ammonium nitrate manufacturing. *Processes*. 2017. Vol. 5. № 3. pp. 37–49. DOI: 10.3390/pr5030037

11. Mosevitzky B., Grinberg D.A., Shter G.E., Grader G.S. Combustion simulations of aqueous urea ammonium nitrate monofuel at high pressures. *Combustion and Flame*. 2016. Vol. 166. pp. 295–306. DOI: 10.1016/j.combustflame.2016.01.030

12. Denisyuk A.P., E Zo Tve, Chernykh S.V. Investigation of the regularities governing the combustion of propellants with ammonium nitrate. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii = Advances in Chemistry and Chemical Technology*. 2007. № 7. pp. 119–123. (In Russ.).

13. Ulyanova E.V., Denisyuk A.P., E Zo Tve, Rusin D.L. Ballistic gunpowder with ammonium nitrate. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii = Advances in Chemistry and Chemical Technology*. 2011. № 12 (128). pp. 30–34. (In Russ.).

14. Sinditskiy V.P., Egorshv V.Yu., Berezin M.V., Serushkin V.V. Methods for studying the combustion of energetic materials. Laboratory workshop. Moscow: RKhTU im. D.I. Mendeleeva, 2010. 103 p. (In Russ.).

15. Trusov B.G. Code System for Simulation of Phase and Chemical Equilibriums at Higher Temperatures. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii = Engineering Journal: Science and Innovation*. 2012. № 1 (1). (In Russ.). DOI: 10.18698/2308-6033-2012-1-31

16. Berezuev Yu.A., Golovin E.V., Kundyshev E.V. Intensification of the block stone production using borehole pressure gas generators. Available at: [http://www.kdu.edu.ua/stat-ti/2007-5-1\(46\)/104.pdf](http://www.kdu.edu.ua/stat-ti/2007-5-1(46)/104.pdf) (accessed: August 1, 2021). (In Russ.).

Received August 9, 2021