



## Оценка применения состава А-2у в качестве котельного топлива

*К. М. Колмаков✉, Г. В. Козлов, А. Ю. Муйземнек*

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный университет», г. Пенза, Россия,  
e-mail: [voennii@list.ru](mailto:voennii@list.ru)

Поступила в редакцию: 01.10.2020 г., после доработки: 21.12.2020 г., принята в печать: 23.12.2020 г.

**Аннотация** – Одна из важных проблем обеспечения химической безопасности связана с необходимостью ликвидации или утилизации больших количеств вторичных взрывчатых веществ (ВВ), образующихся при расснаряжении различных типов боеприпасов. Существующая практика утилизации взрывчатого снаряжения боеприпасов, основанная на их открытом сжигании, не предусматривает полезного использования ВВ и характеризуется высокой взрывоопасностью и негативным влиянием на окружающую среду. В статье проведена оценка альтернативного сжиганию способа – использование в качестве твердого котельного топлива взрывчатых веществ, получаемых при утилизации боеприпасов. Проведено моделирование процесса сжигания исходного и модифицированного состава А-2у в стандартных тепловых котлоагрегатах. Показана возможность безопасного и эффективного применения утилизируемых взрывчатых веществ в качестве твердых котельных топлив непосредственно на территории арсеналов боеприпасов.

**Ключевые слова:** состав А-2у, твердые котельные топлива, моделирование процесса сжигания, утилизируемые взрывчатые вещества.

---

### Chemical hazard sources. Hazardous chemical substances

## Assessment of using A-2u explosive composition as a boiler fuel

*Konstantin M. Kolmakov✉, Gennadiy V. Kozlov, and Alexander Yu. Muizemnek*

Penza State University, Penza, Russia, e-mail: [voennii@list.ru](mailto:voennii@list.ru)

Received: October 1, 2020, Revised: December 21, 2020, Accepted: December 23, 2020

**Abstract** – One of the urgent problems of ensuring chemical safety is associated with the necessity of elimination or disposal of large quantities of secondary explosives generated during the demilitarization of various types of ammunition. The existing practice of disposing explosives derived from ammunition is usually based on their open burning, which does not provide for further useful use of explosives and is characterized by high explosiveness and negative impact on the environment. The article is focused on evaluation of an alternative method to combustion – the potential use of explosives obtained during the ammunition disposal, as a solid boiler fuel. The modeling of the combustion process of the original and modified A-2u secondary explosive

composition in standard thermal boilers has been carried out. The possibility of safe and effective use of the utilized explosives as solid boiler fuels directly on the territory of ammunition arsenals is shown.

*Keywords:* A-2u composition, solid boiler fuels, combustion process modeling, utilized explosives.

---

## ВВЕДЕНИЕ

Необходимость ликвидации или утилизации больших количеств вторичных взрывчатых веществ (ВВ), образующихся при расснаряжении различных типов боеприпасов (БП), обуславливает поиск и разработку способов решения этой проблемы. До сих пор на полигонах часто применяется практика утилизации взрывчатого снаряжения боеприпасов, основанная на их открытом сжигании. Однако такой способ не предусматривает полезного использования ВВ и характеризуется высокой взрывоопасностью и негативным влиянием на окружающую среду.

Существует несколько способов извлечения разрывных зарядов из корпусов боеприпасов, реализованных в промышленном масштабе, в том числе с получением вторичных ВВ, которые используются в качестве промышленных взрывчатых составов в чистом виде или при минимальной их модификации.

Наиболее известными из них являются гидроструйный [1–3] и гидрокавитационный способы [4–9]. Способы можно применять для расснаряжения утилизируемых БП с разрывными зарядами из состава А-IX-2 (механическая смесь флегматизированного гексогена и алюминиевой пудры), что позволяет извлекать из БП неплавкие ВВ. Данные способы доведены до промышленного применения и реализованы, в том числе, в виде мобильных комплексов.

Однако можно отметить ограничения в применении указанных способов, связанные с большим расходом воды (десятки литров в минуту) и сложности с очисткой отработанной воды. Но самая сложная проблема заключается в том, что получаемые с помощью гидродинамических технологий расснаряжения ВВ обладают низкой стабильностью, малым сроком хранения и повышенной чувствительностью к механическим воздействиям. Так, взрывчатый состав А-2у, извлекаемый из БП с разрывными зарядами А-IX-2, имеет допустимый срок хранения не более 5 сут, что ограничивает его применение [10–12]. По истечении указанного срока состав А-2у, в соответствии с требованиями разработчика способа утилизации, должен быть уничтожен.

Разработан ряд рецептов промышленных ВВ, содержащих в своем составе вторичный гексоген, например, Эмульсен-ГА (ТУ 07511819-149-2003) и Арсенит-Г (ТУ 7276-010-56466532-2002). Однако их использование не разрешено Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор) в связи с неудовлетворением требований по чувствительности к механическим воздействиям.

В ряде работ представлены результаты исследований по модификации состава А-2у, и улучшении его эксплуатационных свойств. Показано, что стабилизация, флегматизация и грануляция исходного состава повышает его

безопасность и увеличивает срок хранения до 1 года [13, 14].

Тем не менее, применение модифицированного состава А-2у сдерживается рядом перечисленных факторов, и ввиду этого скапливается большое количество невостребованного ВВ с ограниченным сроком хранения.

Важно еще раз подчеркнуть, что применяемое до сих пор уничтожение извлеченного А-2у методом сжигания на открытых площадках при атмосферном давлении считается экологически вредным. Так, в работе [15] отмечалось, что при открытом сжигании или инсинерации происходит загрязнение окружающей среды несгоревшими взрывчатыми примесями, которые попадают в воздух, воду и почву.

Исследования показали высокое токсическое действие гексогена на животных [16], а также на человека. У части рабочих, занятых сушкой и просеиванием гексогена, были зафиксированы отравления, расстройства вегетативной нервной системы, расстройства сна [16].

Второй компонент состава А-2у – алюминий также может оказывать вредное воздействие. Хотя в действующих нормативных документах [17] указан класс опасности алюминия, а также его оксида – 3, токсическое действие может быть вызвано воздействием алюминиевой пыли или аэрозоля. Такое воздействие в результате вдыхания содержащих алюминий пыли или дыма может привести к поражению легких. При попадании частиц алюминия в глаза происходят очаговые отравления, изменяется капсула хрусталика и пигментация роговицы, возникает помутнение стекловидного тела. Возможно раздражение слизистых оболочек глаз, носа, рта, поражение кожи; может возникнуть фиброз легких («алюминоз»). ПДК для алюминия, сплавов алюминия (в пересчете на А1) составляет 2 мг/м<sup>3</sup>. Класс опасности аэрозоля алюминия – 2 [18, 19]. То же касается и токсичности алюминия и его оксида, особенно в виде аэрозоля для атмосферного воздуха населенных мест – ПДК по аэрозолю оксида алюминия (среднесуточная) составляет 0,03 мг/м<sup>3</sup>, и класс опасности 2. Сообщалось, что алюминий и его соединения обладают мутагенным действием и негативным влиянием на репродуктивную функцию [20].

Каким бы малым ни казался выброс частичек гексогена и алюминия при процессах сжигания, они останутся в окружающей среде на десятилетия. Именно поэтому вокруг площадок для сжигания создается отравленная зона. Она очень хорошо выражена в радиусе до 1,5 км, а при многолетней работе эта зона может охватывать до 30 км. В ближней зоне выпадают крупные аэрозольные частицы, а мелкие могут распространяться на десятки километров [21].

В данной статье предлагается альтернативное сжиганию решение проблемы утилизации состава А-2. Таким способом может стать применение извлеченных ВВ в качестве топлива в штатных котельных агрегатах непосредственно в местах хранения и утилизации боеприпасов. Это также позволит исключить транспортировку опасных продуктов, загрязнение окружающей территории и возможность нелегального распространения ВВ.

Рассмотрена возможность полной или частичной замены твердых

котельных топлив на модифицированное алюминийсодержащее ВВ, извлеченное из корпуса боеприпасов методом вымывания на основе научного подхода с учетом характеристик котельных агрегатов.

Таким образом, целью данной работы является оценка возможности использования взрывчатых веществ, получаемых при утилизации состава А-2у, в качестве твердого котельного топлива.

### 1. ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДИФИЦИРОВАННОГО А-2У

При расчетах характеристик горения утилизируемых ВВ состав описывался условными формулами в виде  $C_aH_bO_cN_dMe_f$  на 1 кг смеси [22–24].

Пересчет коэффициентов ведется по формуле (1):

$$a_{i1} = \sum_{i=1}^n a_{iM} \cdot \alpha_i \cdot \frac{1000}{M_i}, \quad (1)$$

где  $a_{i1}$  – коэффициент элемента в условной формуле для 1 кг смеси,  $a_{iM}$  – коэффициент элемента в молекулярной формуле вещества (компонента смеси),  $M_i$  – молекулярная масса компонента [г/моль],  $\alpha_i$  – массовая доля компонента в смеси.

Условные формулы для компонентов и составов (1 кг), а также необходимый для их полного окисления объем воздуха представлены в таблице 1.

**Таблица 1.** Условные формулы ВВ и их компонентов (на 1 кг)

**Table 1.** Conditional molecular formulas of explosives and its components (per 1 kg)

Вещество	Условная формула 1 кг вещества	Стехиометрический объем воздуха, м <sup>3</sup>
Алюминий	Al <sub>37</sub>	5,925
Вода	H <sub>111,11</sub> O <sub>55,56</sub>	–
Гексоген	C <sub>13,51</sub> H <sub>27,03</sub> O <sub>27,03</sub> N <sub>27,03</sub>	0,722
Церезин	C <sub>71,21</sub> H <sub>145,51</sub>	11,503
Na-КМЦ	C <sub>30,89</sub> H <sub>46,33</sub> O <sub>30,89</sub> Na <sub>3,86</sub>	2,993
А-IX-2	C <sub>13,12</sub> H <sub>26,36</sub> O <sub>20,54</sub> N <sub>20,54</sub> Al <sub>7,41</sub>	1,68
А-2у (А-IX-2 75% + Н <sub>2</sub> О 25%)	C <sub>9,84</sub> H <sub>47,578</sub> O <sub>29,3</sub> N <sub>15,41</sub> Al <sub>5,56</sub>	1,26
Модифицированный А-2у (суспензия)	C <sub>10,17</sub> H <sub>47,51</sub> O <sub>29,31</sub> N <sub>15,18</sub> Al <sub>5,46</sub> Na <sub>0,058</sub>	1,28
Модифицированный А-2у (гранулы)	C <sub>12,82</sub> H <sub>31</sub> O <sub>22,5</sub> N <sub>19,1</sub> Al <sub>6,89</sub> Na <sub>0,08</sub>	1,63

При оценке характеристик горения модифицированного ВВ приняты следующие допущения:

- горение происходит при избытке воздуха;
- в результате горения образуются продукты полного окисления, азот выделяется в молекулярном виде (N<sub>2</sub>) (таблица 2);
- все тепло, которое выделяется при горении ВВ, расходуется на разогрев продуктов горения, расчетная температура горения будет максимальной.

**Таблица 2.** Состав продуктов горения состава А-2у при полном окислении**Table 2.** Composition of A-2u combustion products under complete oxidation

Продукт горения	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O
Количество, моль/кг	12,82	15,5	9,55	3,445	0,04

Поскольку собственного кислорода в составе ВВ недостаточно для полного окисления, догорание продуктов разложения будет проходить за счет кислорода воздуха. Необходимое количество кислорода определяется по формуле (2):

$$n_{O_2} = a + \frac{1}{4}b + \frac{3}{4}e + \frac{1}{4}h - \frac{1}{2}c, \quad (2)$$

где a, b, e, h, c – содержание грамм/атомов соответственно углерода, водорода, алюминия, натрия и кислорода в составе ВВ.

При нормальных условиях необходимое количество кислорода составит  $n(O_2) = 14,51$  моля или 325 литров (н.у.) или, соответственно, 1,6 м<sup>3</sup> воздуха.

Теплота горения энергетического материала (ЭМ)  $Q_{\Gamma}$  определится по разности между теплотой, которая выделится при горении  $Q_{ic2}$ , и теплотой, необходимой на испарение воды  $\sum Q_{исп}^{H_2O}$  и разогрев азота воздуха  $Q_{N_2}$  (3):

$$Q_{\Gamma} = \sum Q_{ic2} - Q_{исп}^{H_2O} - Q_{N_2} \quad (3)$$

Поскольку горение топлива в котельных системах происходит при постоянном давлении, то для расчета температуры горения ВВ использованы изобарные теплоты образования продуктов горения и изобарные теплоемкости [19, 22–24], представленные в таблице 3.

**Таблица 3.** Термодинамические характеристики продуктов горения**Table 3.** Thermodynamic characteristics of combustion products

Вещество	CO <sub>2г</sub>	H <sub>2</sub> O <sub>г</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3г</sub>	Na <sub>2</sub> O <sub>г</sub>
Q <sup>о</sup> <sub>обр</sub> , кДж/моль	393	286	0	0	1644	416
C <sub>р</sub> , Дж/моль·°К	56	48	30	30	83	73
Q <sup>о</sup> <sub>исп</sub> , кДж/моль		41				

Температура горения ВВ – T<sub>г</sub> определяется как отношение теплоты сгорания к теплоемкости системы (4):

$$T_{\Gamma} = \frac{Q_{\Gamma}}{\sum C_{pi} \cdot n_i}, \quad (4)$$

где n<sub>i</sub> – число молей соответствующего продукта горения.

Значение температуры горения ВВ, определенные по зависимости (4), представлены в таблице 4.

Объем газообразных продуктов горения (включая испаренную воду и азот из воздуха) определяется по формуле (5):

$$V_0 = \sum n_i \cdot 22,4 \quad (5)$$

где n<sub>i</sub> – число молей газообразных продуктов, л/кг.

Объем газообразных продуктов горения рассчитанных по зависимости (5) составит 2190 л/кг. Часть продуктов горения (V<sub>пр</sub>) образуется при протекании внутримолекулярных окислительно-восстановительных реакций за счет

кислорода, содержащегося в ВВ (таблица 4). Но ввиду отрицательного кислородного баланса ВВ для получения продуктов полного окисления требуется дополнительный объем воздуха.

Значения параметров сгорания компонентов и гексогена с учетом его состава представлены в таблице 4 [25, 26].

**Таблица 4.** Характеристики горения состава А-2у и его компонентов  
**Table 4.** Combustion characteristics of А-2u composition and its components

Вещество	Q <sub>сг</sub> , кДж/кг	T <sub>г</sub> , °К	V <sub>пр</sub> за счет кислорода ВВ, м <sup>3</sup>
Гексоген	9478		0,908
Алюминий	31037		–
Na-КМЦ	17500		–
А-IX-2	15137	3796	0,51
А-2у (А-IX-2 75% + Н <sub>2</sub> О 25%)	11352	3014	0,93
Модифицированный А-2у (суспензия)	11747	3179	0,91
Модифицированный А-2у (гранулы)	13582	3919	0,56

В таблице 5 представлены значения удельной теплоты сгорания некоторых котельных топлив, применяемых в котельных агрегатах для производства тепла и парогенерации [27–30].

**Таблица 5.** Теплота сгорания котельных топлив  
**Table 5.** Heat of combustion of boiler fuels

Топливо	Теплота сгорания, МДж/кг
Уголь – антрацит	32 – 34
Уголь – полуантрацит	26 – 32
Уголь каменный	15 – 27
Уголь бурый	13 – 16
Торф	12
Древесина	10 – 19
Природный газ	35 – 43
Мазут	40

Анализ рассмотренных данных показывает, что по теплотворной способности модифицированные А-2у соответствует низкокалорийным топливам – торфу, бурому углю и древесине. Следовательно, по теплотворной способности отсутствуют ограничения на применение А-2у в качестве котельных топлив.

## 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ МОДИФИЦИРОВАННОГО А-2У ОТ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ

Механизм горения конденсированных ВВ изложен в трудах Андреева К.К., Беляева А.Ф., Зельдовича Я.Б. [22–25] и в более поздних и обобщенных работах [26]. Исходные физические предпосылки и основные закономерности, установленные в теории теплового распространения пламени для газовых

смесей, являются общими для процессов горения вообще и преобладающими при рассмотрении процессов горения конденсированных ВВ.

При установившемся стационарном режиме горения массовая скорость горения равняется массовой скорости испарения конденсированной фазы. В работах Зельдовича показано, что теория горения газовых смесей с некоторыми дополнениями может быть распространена и на случай горения конденсированных ВВ. При переходе от описания горения газовой смеси к горению паров ВВ нужно учесть потери энергии, затрачиваемые на испарение конденсированной фазы. Согласно Зельдовичу, для расчета массовой скорости распространения горения в парах ВВ применима зависимость (6):

$$\rho u = \sqrt{\frac{2\lambda_r}{Q_r} \left( \frac{RT_r^2}{E} \right)^{n+1} (T_r - T_0)^{-n} (n+1)! W(T_r)}, \quad (6)$$

где  $\lambda_r$  – коэффициент теплопроводности пара при температуре горения,  $T_r$  – температура горения,  $T_0$  – начальная температура,  $W(T_r)$  – скорость реакции при температуре  $T_r$ ,  $E$  – энергия активации,  $Q_r$  – теплота реакции за вычетом теплоты испарения,  $n$  – порядок реакции.

В случае мономолекулярной реакции уравнение (6) можно представить в виде (7):

$$\rho u = \frac{RT^2}{E} \sqrt{\frac{2\lambda_r \rho Z e^{-\frac{E}{RT}}}{Q(T_r - T_0)}}, \quad (7)$$

где  $\rho$  – плотность пара при температуре  $T_r$ .

Из уравнения (7) следует, что зависимость скорости горения от давления имеет в данном случае такой же вид, как и для газовых смесей (8):

$$u = B p^{\frac{n}{2}} \quad (8)$$

Результаты экспериментальных исследований показывают, что горение бризантных ВВ в большинстве случаев сопровождается реакциями в конденсированной фазе, при которых выделяется значительная доля теплоты реакции. Кроме того, как сам ход реакции, так и конечные продукты в условиях горения меняются в зависимости от давления. При атмосферном давлении разложение ВВ не является достаточно полным и практически весь внутримолекулярный азот соединения выделяется в виде NO, в то время как при давлениях порядка нескольких десятков атмосфер, окислы азота не наблюдаются.

Для тугоплавких и труднолетучих ВВ предложена модель горения в конденсированной фазе (к-фазе) [25, 26]. Когда ВВ обладает высокой реакционной и теплотворной способностью в к-фазе, возникает довольно узкая зона тепловыделения, которая формируется рядом с поверхностью газификации. Тепловыделения в этой зоне достаточно для поддержания самораспространяющейся тепловой волны, которая будет распространяться со скоростью не меньшей, чем от тепловыделения в газовой фазе. А малое тепловыделение ( $Q^*$ ) химических реакций в к-фазе, окажется достаточными для нагрева слоя ВВ до температуры кипения  $T_{кип}$ . Зависимость температуры

кипения от давления описывается законом Клапейрона-Клаузиуса, что применимо при давлении не выше 10 МПа.

Для органических ВВ температура плавления определяется по линейной аппроксимации уравнения Клапейрона-Клаузиуса (9):

$$T_{пл} = T_{пл}^0 + \check{T}_p p, \quad (9)$$

где  $T_{пл}^0$  – температура плавления при  $p = 10^5$  Па,  $\check{T}_p$  – коэффициент, равный (200... 300) К/ГПа.

В современной литературе не представлена необходимая для инженерных расчетов информация о кинетических параметрах уравнений и составе продуктов горения в зонах химических реакции. Необходимо учитывать, что состав продуктов в зонах реакции не является равновесным. Предполагается, что скорость горения ВВ определяется тепловыделением при температуре  $T_r$  в пределах:  $T_{кип} \leq T_r \leq T_{гм}$ . Поэтому уравнение зависимости скорости горения ВВ от давления и температуры обычно записывают в форме (10):

$$u_B = B_0 p^v \exp(\beta_T T_\phi) \quad (10)$$

где  $B_0$ ,  $v$  и  $\beta_T$  – константы, не зависящие от температуры и давления.

Для случая газофазной модели горения (Зельдовичу Я.Б.) (11):

$$v = n/2, \quad \beta_T = E_p/2RT_{гм}^2; \quad (11)$$

где  $n = 0, 1, 2$  – порядок реакции.

При горении в к-фазе (12):

$$v = E_p/2q_{исп}, \quad \beta_T = (T_{кип} - T_r - q_{пл}/C_k)^{-1}, \quad (12)$$

где  $q_{исп}$  и  $q_{пл}$  – удельная теплота испарения и плавления ВВ, соответственно;  $C_k$  – теплоемкость ВВ в к-фазе.

Как правило, зависимость скорости горения от давления определяют экспериментально при температуре ВВ ( $T_r$ ), равной  $T_0^{st} = 298$  К (стандартное значение). Тогда зависимость (12) принимает вид (13):

$$u_B = B p^v \exp[\beta_T (T_r - T_0^{st})], \quad (13)$$

где  $B = B_0 \exp(\beta_T T_0^{st})$  – эмпирическая константа.

Линейная аппроксимация константы  $B$  для гексогена приведены в таблице 6 [23].

**Таблица 6.** Константы горения и температуропроводность гексогена  
**Table 6.** Combustion constants and thermal diffusivity of RDX

ВВ	$B, \text{ м/с/ГПа}$	$T_{гм}, \text{ К}$	$\chi_k 10^{-7}, \text{ м}^2/\text{с}$
Гексоген	1,44	3325	1,11

В таблице 6 приведены значения максимальной температуры горения  $T_{гм}$  при  $p \sim 10^5$  Па для случая, когда все тепло реакционной зоны поступает только в непрореагировавшее ВВ (адиабатическое горение). При горении в стандартных условиях величина  $\beta_T$  имеет порядок  $10^{-3}$ . Следует иметь в виду,

что теория, в рамках которой выведена формула (13), разрабатывалась применительно к задачам традиционной ракетной и артиллерийской техники, когда горение происходит при высоких давлениях. Если давление горения составляет десятые доли ГПа, считается что теплопроводность газа не зависит от давления.

Теплофизические характеристики ВВ и расчетные значения постоянных в уравнении (13) представлены в таблице 7 [26].

Величина  $\beta_T$  для к-фазы в зависимости (13) является функцией от температуры ВВ или температуры теплоносителя ( $T_T$ ). Поэтому в таблице 7 значение  $\beta_T$  представлено для стандартной температуры  $T_T = T_0^{st} = 298^\circ\text{K}$ . Значения  $\nu$  для газовой фазы рассчитывалось из предположения одномолекулярности реакции горения.

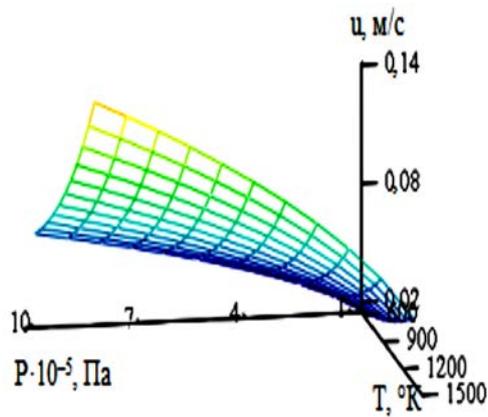
**Таблица 7.** Теплофизические характеристики гексогена  $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_6\text{N}_6$

**Table 7.** Thermophysical characteristics of RDX  $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_6\text{N}_6$

M, г/моль	$C_k,$ кДж/моль·гр	$E_p,$ кДж/моль	$q_{пл},$ кДж/моль	$q_{жп},$ кДж/моль	$T_{пл},$ °K	$T_{жп},$ °K	$T_{гм},$ °K	$T_{кр},$ °K	B, м/с/ГПа	Г-фаза		К-фаза	
										$\nu$	$\beta_T$	$\nu$	$\beta_T$
222	280	197,3	93,21	108,68	476	613	3325	490	1,44	0,5	0,0011	1,1	0,0041

Из данных таблицы 7 следует, что температура кипения ВВ ( $T_{жп}$ ) выше критической температуры ( $T_{кр}$ ) теплового взрыва. Следовательно, при температуре 1100–1400 К, характерной для слоевого сжигания твердого топлива в топках котлоагрегатов [22–25], горение ВВ будет проходить в газовой фазе и при попадании в зону горения модифицированный ВВ обязательно воспламенится и сгорит. Время сгорания будет зависеть от температуры и давления в топке, а также от размеров гранул.

Результаты расчета скорости горения модифицированного ВВ  $u_B = f(p, T)$  представлены на рисунке 1. В зависимости от условий его скорость горения может составлять от 2 см/с при  $T = 600^\circ\text{K}$  и давлении  $p = 10^5$  Па до 17 см/с при  $T = 1500^\circ\text{K}$  и  $P = 10^6$  Па. Время сгорания гранул модифицированного ВВ диаметром 6 мм при атмосферном давлении и температуре  $1000^\circ\text{C}$ , характерных для котельных агрегатов слоевого сжигания топлива, составит порядка 0,1 с.



**Рис. 1.** Зависимость скорости горения гексогена от температуры и давления.

**Fig. 1.** Dependence of RDX combustion rate on temperature and pressure.

Проведенные расчеты позволили определить скорость горения модифицированного А-2у в условиях работы топок котлоагрегатов и время сгорания гранул этого состава. Это позволит определить возможные объемы сжигания А-2у в энергоустановках.

### **3. ОБОСНОВАНИЕ ВЕЛИЧИНЫ МАССОВОГО РАСХОДА А-2У ПРИ СЖИГАНИИ В ТОПКЕ КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА**

Котельные агрегаты характеризуются разнообразием конструкций топочных устройств (топок) [27–31], которые предназначены для сжигания топлива с целью выделения заключенного в нем тепла. Конструкции топок разнообразны, и каждая из них соответствует определенному виду топлива и способу сжигания. В современных котельных установках обычно используются 3 типовых способа сжигания твердого топлива: слоевой, факельный и вихревой.

Места дислокации объектов хранения БП, где предполагается проведение мероприятий по их утилизации, характеризуются малой численностью населения и, как следствие, применением котельных малой и средней мощности с паропроизводительностью 2,5–25 т/ч. Эти агрегаты применяют для производства насыщенного или перегретого пара, который обеспечивает производственные потребности, работу системы обогрева помещений и горячее водоснабжение. В тепловых агрегатах такой мощности, традиционно применяются топки слоевого сжигания твердого кускового топлива.

Таким образом, условия безопасного применения А-2у совместно со штатным котельным топливом целесообразно установить применительно к топкам слоевого сжигания. Характеристики твердотопливных паровых котлов малой и средней мощности с топками слоевого сжигания паропроизводительностью 2,5–25 т/ч представлены в таблице 8 [27–31].

Топка котельного агрегата представляет собой проточную систему, в которую непрерывно подаются топливо и окислитель, а из нее отводятся продукты горения. Твердое топливо в топку подается механическими забрасывателями на подвижную колосниковую решетку, под которую дутьевым вентилятором нагнетается воздух. Продукты горения из топочного пространства удаляются вентилятором дымоудаления. Применение дутьевого вентилятора и вентилятора дымоудаления в сочетании с контрольно-измерительными приборами и автоматикой обеспечивает автоматизацию подачи топлива и воздуха в топку, а также поддержание заданного разрежения в топочном пространстве, которое должно составлять 15–30 Па [29–32]. Для поддержания разрежения в топочном пространстве производительность вентилятора дымоудаления обеспечивается на 10% больше полного объема топочных газов с учетом их температуры.

Сжигание А-2у не должно приводить к повышению давления в топочном пространстве, а производительность вентилятора дымоудаления должна с запасом превышать объем продуктов совместного сжигания А-2у и штатного топлива.

Оценка термодинамических параметров горения в топке котла

проведена на основе моделирования процесса совместного сжигания штатного топлива и модифицированного состава А-2у при различных значениях величины массового расхода с использованием многоцелевой программной системы конечно-элементного анализа ANSYS [33] применительно к котлу КЕ-2,5-14С.

**Таблица 8.** Характеристики твердотопливных паровых котлов

**Table 8.** Characteristics of solid fuel steam boilers

Характеристика	Тип котла				
	КЕ-2,5-14С	КЕ-4-14С	КЕ-6,5-14С	КЕ-10-14С	КЕ-25-14С
Паропроизводительность, т/ч	2,5	4,0	6,5	10	25
Расход топлива $m_T$ , кг/ч	292	468	760	1140	2922
Мощность, обеспечиваемая при сгорании топлива, $P_H$ , МВт/ч	1,82	2,91	4,37	7,27	18,2
Топочное устройство	ПТЛ-РПК 2-1,8/1,525	ТЛЗМ 1,87/2,4	ТЛЗМ 1,87/3,0	ТЛЗМ 1,87/3,0	ТЧЗМ 2,7/5,6
Габариты топки, мм					
Длина	3085	3600	4550	4550	7190
Ширина	2060	2300	2300	2300	3320
Высота	2600	3175	3175	3175	3175
Размер колосниковой решетки, мм					
Длина	1860	1870	1870	1870	2700
Ширина	1925	2400	3000	3000	5600
Активная площадь зеркала горения, $m^2$	2,7	3,3	4,4	4,4	13,5
Объем топочной камеры, $m^3$	10,0	9,6	14,4	17,6	39,7
Максимальный объем топлива в топке, $m^3$	-	1,15	1,54	1,54	-
Питатель топлива	ПТЛ-400	ПТЛ-400	ПТЛ-400	ПТЛ-400	ПТЛ-600
Вентилятор воздуха	ВДН-8/1500	ВДН-9/1000	ВДН-9/1000	ВДН-10/1000	ВДН-12,5/1000
Производительность вентилятора, $m^3/ч$	10460	9930	9930	13620	26600
Вентилятор дымоудаления	ДН-9/1500	ДН-9/1500	ДН-9/1500	ДН-10/1500	ДН-17/1000
Производительность вентилятора, $m^3/ч$	14900	14900	14900	20450	74290
Полное давление, Па	2220	2220	2220	2680	3240
Диапазон изменения нагрузки, %	25–100				
Коэффициент избытка воздуха	Не более 1,3-1,5				
Основной вид топлива	Каменный и бурый угли				
Влажность топлива, %	до 40				
Зольность топлива, %	до 35				
Содержание мелочи (0–6 мм), %	до 60				
Максимальный размер куска, мм	40				

На рисунке 2 показана двумерная модель котла КЕ-2,5-14С. Она содержит 35535 элементов и 69896 узлов.

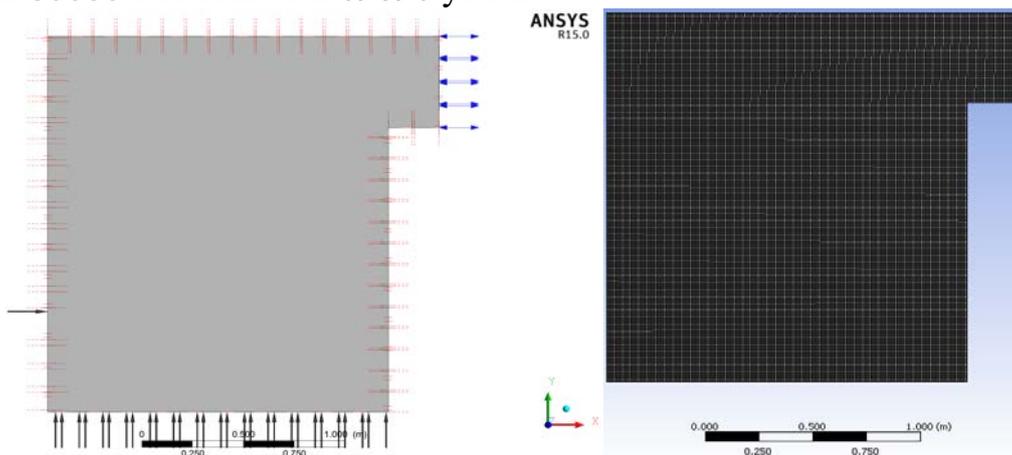


Рис. 2. Двумерная модель топки котла КЕ-2,5-14С.

Fig. 2. Two-dimensional model of the boiler furnace KE-2,5-14S.

Снизу через слой горящего угля в топку с постоянной скоростью подаются продукты горения с температурой 1400°C. Скорость потока продуктов горения определяется их объемом при стехиометрическом соотношении и коэффициентом избытка воздуха, значение которого принято равным 1,1, а также площадью зеркала горения топки. Теплоты сгорания и объем воздуха, необходимый для окисления 1 кг топлива представлены соответственно в таблицах 5 и 9.

Таблица 9. Объем воздуха для окисления 1 кг топлива

Table 9. Air volume for oxidation of 1 kg of fuel

Уголь	Условная формула 1 кг вещества	Стехиометрический объем воздуха, м <sup>3</sup>	Объем воздуха при избытке	
			1,1	1,3
Бурый уголь, влажность 20%	$C_{40}H_{54,22}O_{27,11}N_{2,29}$	4,5	4,9	5,9
Бурый уголь, влажность 30%	$C_{35}H_{61,33}O_{30,67}N_2$	3,9	4,3	5,1
Каменный уголь, влажность 12%	$C_{61,6}H_{57,33}O_{11,62}N_{1,26}$	7,9	8,7	10,3
Каменный уголь, влажность 16%	$C_{58,8}H_{59,84}O_{13,61}N_{1,2}$	7,5	8,3	9,8

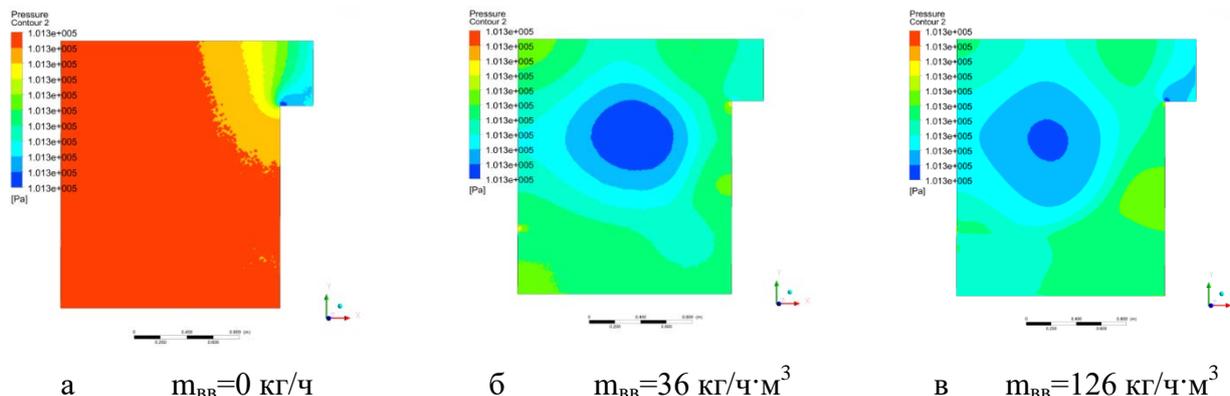
Сбоку через штатные питатели топлива перпендикулярно стенке котла подается струя продуктов горения с соответствующей температурой (таблица 4) и постоянной величиной расхода. Скорость этого потока определяется объемом продуктов горения при заданном массовом расходе и площадью окон питательного устройства.

На выходе из топки задается температура газов 900°C, соответствующая нижнему пределу оптимальных значений [27, 31], и разрежение в продуктах горения 20 Па. Продукты горения угля и А-2у представляют собой идеальный газ. Процессы теплообмена в топке не учитываются.

Исходные данные для моделирования представлены в таблице 10. Верхний предел диапазона изменения величины массового расхода А-2у при совместном сжигании с углем принят на основе данных, представленных в таблице 12 из условия обеспечения 75% номинальной мощности котла КЕ-25-14С за счет сжигания А-2у.

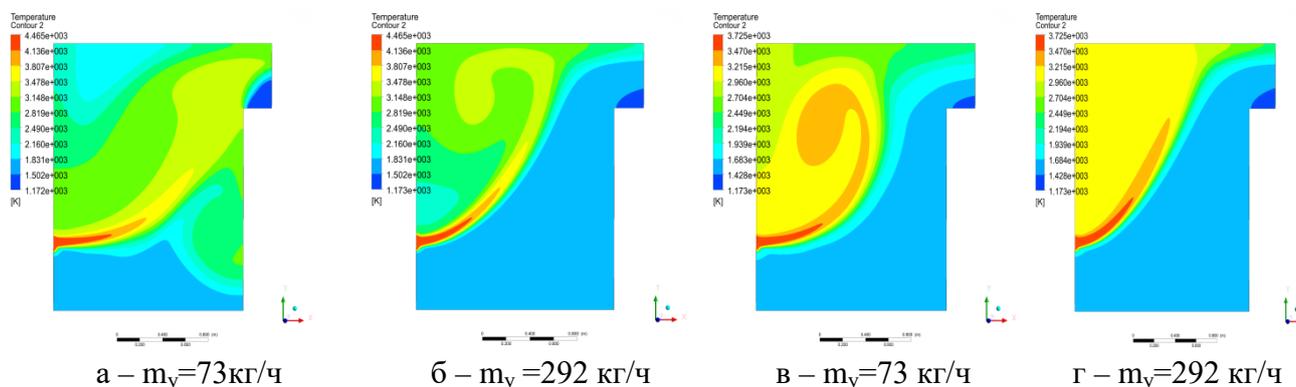
В процессе моделирования рассчитаны распределения давления, температуры и скорости продуктов горения в топке, а также значения минимального и максимального давления в топке котла. На первом этапе моделирования рассчитывались параметры горения при сжигании бурого и каменного углей на полной нагрузке котла. Результаты оценки максимального давления в топке при полной штатной нагрузке котла каменным углем приняты за стандартные (вариант 1). Результаты расчетов представлены в таблице 11.

На рисунке 3 представлены результаты оценки распределения давления в топке для совместного сжигания бурого угля и ВВ в виде гранул при различных значениях массового расхода ВВ при нагрузке котла по углю 25%. Распределения температуры и скорости продуктов горения в топке показаны соответственно на рисунках 4 и 5.



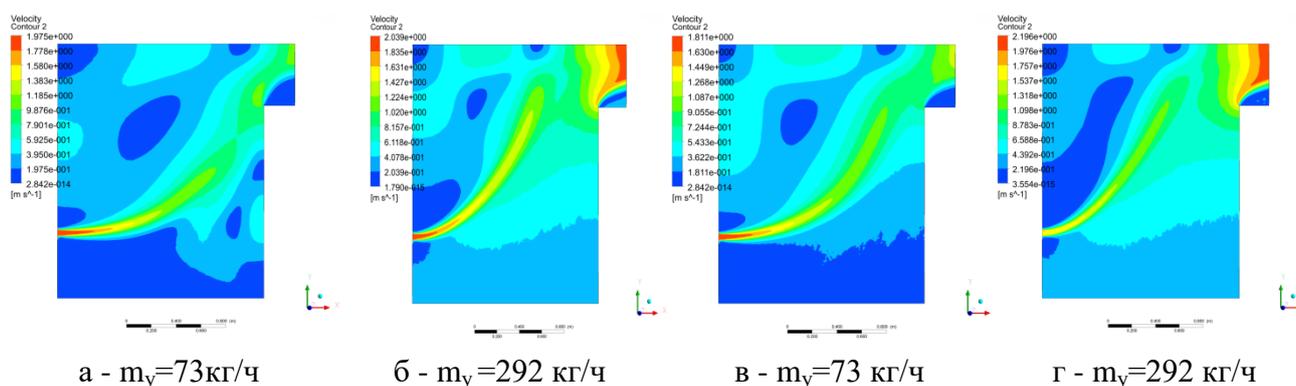
**Рис. 3.** Распределение давления в топке котла КЕ-2,5-14С: а – 100% нагрузка котла каменным углем котла; б, в – 25% нагрузка котла бурым углем и гранулированным А-2у.

**Fig. 3.** Distribution of pressure in the furnace of KE-2.5-14S boiler: а – 100% load with boiler coal; б, с – 25% load with brown coal and granulated А-2u.



**Рис. 4.** Распределение температуры продуктов горения в топке котла КЕ-2,5-14С при сжигании каменного угля с минимальной и максимальной нагрузкой ( $m_y$ ) по углю совместно с А-2у при массовом расходе  $m_{\text{ВВ}}=360 \text{ кг/ч}$ ; а, б – гранулированный А-2у; в, г – суспензия А-2у.

**Fig. 4.** Temperature distribution of combustion products in the furnace of KE-2.5-14C boiler with burning coal with coal minimum and maximum load ( $m_y$ ) together with А-2u at mass flow rate  $m = 360 \text{ kg/h}$ ; а, б – granulated А-2u; с, д – suspension of А-2u.



**Рис. 5.** Распределение скорости продуктов горения в топке котла КЕ-2,5-14С при сжигании каменного угля с минимальной и максимальной нагрузкой ( $m_y$ ) по углю совместно с А-2у при величине массового расхода  $m_{ВВ} = 360$  кг/ч; а, б – гранулированный А-2у; в, г – суспензия А-2у.

**Fig. 5.** Distribution of rate of combustion products in the furnace of KE-2.5-14C boiler with burning coal with coal minimum and maximum load ( $m_y$ ) together with A-2u at mass flow rate  $m = 360$  kg/h; a, b – granulated A-2u; c, d – suspension of A-2u.

**Таблица 10** Исходные данные для моделирования  
**Table 10.** Input data for modeling

Параметр	Вариант									
	1	2	3	5	5	6	7	8	9	10
Нагрузка котла по углю, %	100	25	25	25	25	25	25	25	100	25
Вид угля	Кам	Бур	Бур	Бур	Бур	Бур	Бур	Кам	Кам	Кам
Расход угля, кг/ч	292	73	73	73	73	73	73	73	292	73
Агрегатное состояние ВВ	Тв	Тв	Тв	Тв	Тв	Тв	Тв	Тв	Тв	Тв
Расход ВВ на котел, кг/ч	0	36	90	180	360	260	3600	360	360	360
Расход ВВ на 1 м <sup>3</sup> топки, кг/чм <sup>3</sup>	0	3,6	9,0	18,0	36,0	126,0	360,0	36,0	36,0	36,0
Объем продуктов горения ВВ, м <sup>3</sup> /ч	0	22	54	108	216	756	2160	216	216	324
Скорость потока продуктов горения ВВ, м/с	0	0,46	0,93	1,85	6,47	18,48	18,48	1,85	1,85	1,69
Требуемая производительность вентилятора воздуха, м <sup>3</sup> /ч	3428	402	402	402	402	402	402	699	3428	699
Скорость потока воздуха, м/с	0,35	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,35	0,07	0,07
Запас производительности вентилятора воздуха, %	67	96	96	96	96	96	96	93	67	93
Производительность вентилятора дымоудаления, м <sup>3</sup> /ч	4246	489	560	679	917	2105	5194	1244	4246	2048
Запас производительности вентилятора дымоудаления, %	72	97	96	95	94	86	65	92	72	86

Таблица 11. Результаты расчетов

Table 11. Calculation results

Параметр	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Нагрузка котла по углю, %	100	25	25	25	25	25	25	25	100	25
Вид угля	Кам.	Бур.	Бур.	Бур.	Бур.	Бур.	Бур.	Кам.	Кам.	Кам.
Расход угля, кг/ч	292	73	73	73	73	73	73	73	292	73
Агрегатное состояние ВВ	Тв	Тв	Тв	Тв	Тв	Тв	Тв	Тв	Тв	Тв
Расход ВВ на котел, кг/ч	0	36	90	180	360	260	3600	360	360	360
Расход ВВ на 1 м <sup>3</sup> топки, кг/чм <sup>3</sup>	0	3,6	9,0	18,0	36,0	126,0	360,0	36,0	36,0	36,0
Мощность, обеспечиваемая при сгорании угля P <sub>у</sub> , МВт/ч	2,03	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,51	2,03	0,51
Мощность, обеспечиваемая при сгорании ВВ P <sub>ВВ</sub> , МВт/ч	0	0,14	0,34	0,68	1,36	4,76	13,61	1,36	1,36	1,18
Суммарная мощность: P = P <sub>у</sub> + P <sub>ВВ</sub> , МВт/ч	2,03	0,44	0,64	0,98	1,66	5,07	13,91	1,87	3,39	1,69
Отношение P <sub>ВВ</sub> /P	0	0,32	0,53	0,69	0,82	0,94	0,98	0,73	0,40	0,70
Отношение P <sub>ВВ</sub> /P <sub>н</sub>	0	0,08	0,19	0,37	0,75	2,62	7,48	0,75	0,75	0,65
Максимальное давление в топке котла P <sub>max</sub> , Па	101307	101307	101305	101305	101305	101313	101370	10130	101308	101305
$\Delta P = P_{\max(\text{вари})} - P_{\max(\text{Ст})}$ , Па	0	0	-2	-2	-2	-2	6	3	-1	1

Таблица 12. Расход А-2у для обеспечения 75% мощности котла

Table 12. Consumption A-2u to provide 75% of boiler power

Характеристика	Котел				
	KE-2,5-14C	KE-4-14C	KE-6,5-14C	KE-10-14C	KE-25-14C
Производительность пара, т/ч	2,5	4	6,5	10	25
Объем топки, м <sup>3</sup>	10	10	14	18	40
Расход топлива m <sub>т</sub> , кг/ч	292	468	760	1140	2922
Мощность, обеспечиваемая при сгорании угля, МВт/ч	1,82	2,91	4,37	7,27	18,2
Требуемый расход А-2у для обеспечения 75% мощности котла, кг/ч	360	580	870	1140	3600
Требуемый расход А-2у для обеспечения 75% мощности котла на 1 м <sup>3</sup> топки, кг/чм <sup>3</sup>	36	60	60	65	90

Из полученных результатов следует, что сжигание модифицированного А-2у в виде гранул или в виде суспензии совместно с бурым или каменным углем с величиной расхода, обеспечивающей 75% номинальной мощности котла КЕ-2,5-14С, не приводит к изменению максимального давления в топке по сравнению с режимом сжигания угля при полной нагрузке котла. При этом обеспечивается достаточный запас производительности вентиляторов воздуха и дымоудаления.

Сжигание модифицированного А-2у совместно с бурым углем в котле КЕ-2,5-14С с величиной расхода 126 кг/ч на 1 м<sup>3</sup> топки, которая превышает величину расхода котла КЕ-25-14С на полной нагрузке, обеспечит повышение давления в топке лишь на 6 Па (вариант 7 таблицы 11). Такое значение величины расхода, во-первых, не имеет практического применения в силу ограничения по тепловой мощности котла, а, во-вторых, такое изменение давления вполне может быть компенсировано вентилятором дымоудаления. Кроме, того система дымоудаления твердотопливных котлов рассчитана на высокую зольность низкокалорийных топлив (бурого угля или торфа). Поэтому повышенная зольность, образующаяся при сжигании А-2у, укладывается в допустимые нормативы и отводится штатной системой дымоудаления.

Таким образом, обоснована возможность безопасного совместного сжигания модифицированного А-2у в виде гранул или в виде суспензии с бурым или каменным углем в котлах серии КЕ паропроизводительностью от 2,5 до 25 т/ч с максимальной величиной равномерного расхода А-2у соответственно от 36 до 90 кг/ч на 1 м<sup>3</sup> топки. Для окончательного заключения о применимости состава А-2у в качестве компонентов котельного топлива в местах хранения и утилизации БП в штатных котельных агрегатах необходимо провести дополнительные исследования по оценке эрозионного воздействия оксида алюминия с учетом проблемы накапливания и хранения золошлаковых остатков (ЗШО).

Сжигание получаемого А-2у в качестве котельного топлива в котлоагрегатах при температурах 1000–1400°С обеспечит полное сгорание компонентов и исключит рассеивания их на окружающей территории. Это позволит сократить токсичную нагрузку и повысит уровень химической безопасности среды. При сжигании в котельных алюминийсодержащего состава А-2у получаемого при утилизации 1 т БП возможно получение тепловой энергии в количестве 2 10<sup>3</sup> Гкал.

### ВЫВОДЫ

1. Проведена оценка энергетических характеристик модифицированного алюминийсодержащего состава А-2у в виде гранул и суспензии. Теплота сгорания А-2у в виде гранул и суспензии составляет, соответственно, 13,6 и 11,8 МДж/кг; температура горения 3919 и 3179°К; объем газообразных продуктов сгорания за счет кислорода, содержащегося в составе 0,56 и 0,91 м<sup>3</sup>, а общий объем газообразных продуктов сгорания – 2,19 м<sup>3</sup>/кг. Это обуславливает возможность использования разработанного модифицированного А-2у в качестве котельного топлива.

2. Проведена оценка зависимости скорости горения гексогена от давления и температуры. При температуре 1000°К и давлении 10<sup>5</sup> Па, характерных для топок слоевого сжигания топлива, скорость горения модифицированного А-2у составляет 2–3 см/с.
3. Проведено моделирование процесса сжигания модифицированного А-2у в виде гранул и водной суспензии совместно с твердым топливом в топке котельного агрегата КЕ-2,5-14С с применением программы конечно-элементного анализа ANSYS. Установлена возможность сжигания модифицированного А-2у в виде гранул или в виде суспензии совместно с бурым или каменным углем в котлах серии КЕ паропроизводительностью от 2,5 до 25 т/ч с максимальной величиной равномерного расхода, соответственно, от 36 до 90 кг/ч на 1 м<sup>3</sup> топки без изменения максимального давления в топке по сравнению с режимом сжигания угля при полной нагрузке котла. Окончательный вывод о возможности применения состава А-2у в качестве компонентов котельного топлива в штатных котельных агрегатах непосредственно на территории арсеналов БП потребует оценки эрозионного воздействия оксида алюминия и решения проблемы накопления и хранения ЗШО.

Список литературы:

1. Мацеевич Б.В., Глинский В.П., Свиридов Е.М. (2007). Расснаряжение артиллерийских снарядов среднего калибра гидродинамическим методом и получение состава Г-2У. Материалы международной конференции «Комплексная утилизация обычных видов боеприпасов», 19-21 сентября, Красноармейск. Красноармейск: КНИИМ, С. 60 - 64.
2. Горбачев А.В., Гордюхин А.А., Мелешко В.Ю. (2011). Состояние и перспективы расснаряжения боеприпасов методом струйной кавитации. Тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы утилизации ракет и боеприпасов», 19-20 октября 2011, г. Красноармейск. Красноармейск: КНИИМ, С. 10 - 15.
3. Сладков В.Ю., Дудина Ю.В. (2011). Перспективные методы расснаряжения и утилизации боеприпасов. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*, 2, 302 - 307.
4. Патент 2195630 РФ, 2002.
5. Conn A.F., Giracey M.T. (1988). Using water jet to wash out explosive and propellants. *Proceedings of 9th International Symposium of Jet Cutting Technology*, Sendai, Japan, pp. 307 - 340.
6. Пат. 4391339 США, 1983.
7. Conn A.F., Johnson V.E., Landenmuth W.I., Frederick G.S. (1984). Some industrial applications of Cavijet® cavitation fluid jets. *Proceedings of 7th International Symposium on Jet Cutting Technology*. Ottawa, Canada, June 26-28.
8. *Demilitarization/disposal of conventional munitions manual, TM-9-1300-277* (1982). US Army. Part 6.
9. Fossey R.D., Summers D.A. (1996). The Second decade of water jet demilitarization. New concerns, new solutions. *Proceedings of 13th International Conference on Jetting Technology*, Sardinia, Italy. University of Missouri-Rolla, USA: BHR Group Conference Series Publication.
10. Садовский А.И., Катъкин Ю.Ф., Сидоров М.И. (2000). *Итоги предварительных (заводских) испытаний комплекса ГКМ4 по утилизации артиллерийских снарядов методом гидрокавитационного вымывания разрывного заряда из гексогеносодержащих*

- взрывчатых составов. Сборник докладов Российской НТК «Комплексная утилизация обычных видов боеприпасов».* Красноармейск: КНИИМ, С. 56 - 61.
11. ТУ 075 118 19-108-97. Взрывчатый состав А-2у (влажный А-IX-2).
  12. Колмаков К.М., Романовский А.Л., Козлов Г.В. (2014). Повышение производительности гидрокавитационного метода расснаряжения боеприпасов. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*, 5, 201 - 211.
  13. Kolmakov K.M., Rozen A.E., Roshchin A.V., Panin E.O., Podval'nyi A.M. (2017). A kinetic model of the reaction of dispersed aluminum with water under exposure to hydrocavitation and stabilization of the final product. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 11(4), 684 - 690. <https://doi.org/10.1134/S1990793117040170>
  14. Пат. 2528726 РФ, 2014.
  15. Горбачев В.А., Мелешко В.Ю., Павловец Г.Я., Закариев Г.З. (2016). Сжигание взрывчатых веществ, полученных при вымывании из снарядов, в кипящем слое. *Сборник докладов X юбилейной Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы утилизации ракет и боеприпасов. безопасность, ресурсосбережение, экология».* М.: РАРАН, С 132 - 139.
  16. *Вредные вещества в промышленности.* Справочник для химиков, инженеров и врачей (1976). 7-е изд., Т. 2. Л.: Химия.
  17. ГОСТ 12.3.043-90. Система стандартов безопасности труда. Процессы производственные нанесения оптических покрытий на детали. Общие требования безопасности.
  18. ГОСТ 12.1.005-88. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.
  19. Злобинский Б.М., Иоффе В.Г., Злобинский В.Б. (1972). *Воспламеняемость и токсичность металлов и сплавов.* М.: Металлургия.
  20. Шугалей И.В., Гарабаджиу А.В., Илюшин М.А., Судариков А.М. (2012). Некоторые аспекты влияния алюминия и его соединений на живые организмы. *Экологическая химия*, 21(3), 172 - 186.
  21. Мацеевич Б.В., Глинский В.П., Яжук А.П. (1995). *Зарубежный опыт. Методы, организация, экономика производств утилизации обычных боеприпасов в США, ФРГ, Англии. Сборник докладов I Российской НТК «Комплексная утилизация обычных видов боеприпасов».* Красноармейск: МЦНИИНТИККПК, С. 294 - 300.
  22. Андреев К.К., Беляев А.Ф. (1960). *Теория взрывчатых веществ.* М.: Оборонгиз.
  23. Андреев К.К. (1966). *Термическое разложение и горение взрывчатых веществ.* М.: Наука.
  24. Зельдович Я.Б., Компанец А.С. (1955). *Теория детонации.* М.: Техничко-теоретическая литература.
  25. Зельдович Я.Б., Баренблат Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М. (1980). *Математическая теория горения и взрыва.* М.: Наука.
  26. Орленко Л.П. (ред.) (2002). *Физика взрыва.* В 2 т., 3-е изд., перераб. Т. 1. М.: Физматлит.
  27. Кочева М.А., Болдин С.В. (2005). *Теплогенерирующие установки.* Учебное пособие. Н. Новгород: Нижегород. гос. архит.-строит. ун-т.
  28. *Справочник по котельным установкам малой производительности* (1989). Под ред К.Ф. Роддатиса. М.: Энергоатомиздат.
  29. Фокин В.М. (2006). *Теплогенерирующие установки систем теплоснабжения.* М.: Машиностроение.
  30. Твердотопливные паровые котлы КЕ 2,5/4,0/6,5/10/25. Технические характеристики и комплектация котлов КЕ. [https://biyskiykotelnyuzavod.ru/catalog/kotel\\_ke/](https://biyskiykotelnyuzavod.ru/catalog/kotel_ke/) (дата обращения 30.09.2020).
  31. Котлы паровые серии КЕ. Чертежи котлов КЕ (компоновка, сборочные чертежи). <https://dkwr.ru/kotlyke.html> (дата обращения 30.09.2020).
  32. Колмаков К.М., Козлов Г.В., Чеканский В.М. (2010). Исследование и разработка технологических методов безопасной утилизации вторичных взрывчатых веществ и смесового твердого ракетного топлива, используемых в качестве основных

энергетических компонентов для обогащения котельных топлив на базе твердых бытовых отходов. Отчет о НИР шифр «Мегаполис». М.: ЗАО «Ареал-98».

33. Чигирев А.В. (2004). *ANSYS для инженеров*. М.: «Машиностроение».

#### References:

1. Matseevich, B.V., Glinskiy, V.P., & Sviridov, E.M. (2007). Depletion of medium-caliber artillery shells by hydrodynamic method and obtaining the G-2U composition. *Proceedings of International Conference "Integrated disposal of conventional types of ammunition"*, September 19-21, Krasnoarmeysk. Krasnoarmeysk: KNIIM, pp. 60 - 64 (in Russ.).
2. Gorbachev, A.V., Gordyukhin, A.A., & Meleshko, V.Yu. (2011). State and prospects of ammunition demilitarization by jet cavitation method. *Proceedings of VIIIth International Scientific and Technical Conference "Actual problems of disposal of missiles and ammunition"*, October 19-20, 2011, Krasnoarmeysk. Krasnoarmeysk: KNIIM, pp. 10 - 15 (in Russ.).
3. Sladkov, V.Yu., & Dudina, Yu.V. (2011). Advanced methods of ammunition demilitarization and disposal. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhn. nauki = Bulletin of Tula State University. Technical science*, 2, 302 - 307 (in Russ.).
4. Pat. 2195630, Russian Federation, 2002.
5. Conn, A.F., & Giracey, M.T. (1988). Using water jet to wash out explosive and propellants. *Proceedings of 9th International Symposium of Jet Cutting Technology*, Sendai, Japan, pp. 307 - 340.
6. Pat. 4391339, USA, 1983.
7. Conn, A.F., Johnson, V.E., Landenmuth, W.I., & Frederick, G.S. (1984). Some industrial applications of Cavijet® cavitation fluid jets. *Proceedings of 7th International Symposium on Jet Cutting Technology*. Ottawa, Canada, June 26-28.
8. *Demilitarization/disposal of conventional munitions manual, TM-9-1300-277* (1982). US Army. Part 6.
9. Fossey, R.D., & Summers, D.A. (1996). The Second decade of water jet demilitarization. New concerns, new solutions. *Proceedings of 13th International Conference on Jetting Technology*, Sardinia, Italy. University of Missouri-Rolla, USA: BHR Group Conference Series Publication.
10. Sadovskiy, A.I., Kat'kin, Yu.F., & Sidorov, M.I. (2000). *Results of preliminary (factory) tests of GKM4 complex for disposal of artillery shells by method of hydrocavitation washing out of bursting charge from hexogen-containing explosive compositions*. In: *Collection of reports of Russian Scientific and Technical Conference "Complex utilization of conventional types of ammunition"*. Krasnoarmeysk: KNIIM, pp. 56 - 61 (in Russ.).
11. Technical Specifications TU 075 118 19-108-97. Explosive composition A-2u (wet A-IX-2) (in Russ.).
12. Kolmakov, K.M., Romanovskiy, A.L., & Kozlov, G.V. (2014). Improving the performance of hydrocavitation ammunition demilitarization. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhn. nauki = Bulletin of Tula State University. Technical science*, 5, 201 - 211 (in Russ.).
13. Kolmakov, K.M., Rozen, A.E., Roshchin, A.V., Panin, E.O., & Podval'nyi, A.M. (2017). A kinetic model of the reaction of dispersed aluminum with water under exposure to hydrocavitation and stabilization of the final product. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 11(4), 684 - 690. <https://doi.org/10.1134/S1990793117040170>
14. Pat. 2528726, Russian Federation, 2014.
15. Gorbachev, V.A., Meleshko, V.Yu., Pavlovets, G.Ya., & Zakariyev, G.Z. (2016). *Combustion of explosives obtained by washing out of shells in fluidized bed*. In: *Collection of reports of Xth jubilee International scientific-practical conference "Actual problems of disposal of missiles and ammunition. Safety, resource conservation, ecology"*. М.: RARAN, pp. 132 - 139 (in Russ.).
16. *Hazardous substances in industry. Handbook for Chemists, Engineers, and Physicians* (1976).

- 7th Ed., V. 2. L.: Khimiya (in Russ.).
17. GOST (State Standard) ГОСТ 12.3.043-90. Occupational safety standards system. Manufacturing processes for applying optical coatings to parts. General safety requirements (in Russ.).
  18. GOST (State Standard) 12.1.005-88. Occupational safety standards system. General sanitary and hygienic requirements for the air in the working area (in Russ.).
  19. Zlobinskiy, B.M. & Ioffe, V.B. (1972). *Flammability and toxicity of metals and alloys*. M.: Metallurgiya (in Russ.).
  20. Shugalei, I.V., Garabadzhiu, A.V., Ilyushin, M.A., & Sudarikov, A.M. (2012). Some aspects of influence of aluminum and its compounds on living organisms. *Ekologicheskaya khimiya = Environmental Chemistry*, 21(3), 172 - 186 (in Russ.).
  21. Matseevich, B.V., Glinskiy, V.P., & Yazhuk, A.P. (1995). *Foreign practices. Methods, organization, economics of conventional ammunition utilization industries in the USA, Germany, England*. In: *Collection 1 of reports of the Russian Scientific and Technical Conference "Integrated disposal of conventional types of ammunition"*. Krasnoarmeysk: MTsNIINTIKKPK, pp. 294 - 300 (in Russ.).
  22. Andreev, K.K., & Belyaev, A.F. (1960). *Theory of explosives*. M.: Oborongiz (in Russ.).
  23. Andreev, K.K. (1966). *Thermal decomposition and combustion of explosives*. M.: Nauka (in Russ.).
  24. Zeldovich, Ya.B., & Kompaneets, A.S. (1955). *Detonation theory*. M.: Tekhniko-teoreticheskaya literatura (in Russ.).
  25. Zeldovich, B.Ya., Barenblat, G.I., Librovich, V.B., & Makhviladze, G.M. (1980). *Mathematical theory of combustion and explosion*. M.: Nauka (in Russ.).
  26. Orlenko, L.P. (Editor) (2002). *Explosion physics*. In 2 volumes, 3<sup>rd</sup> edition, V. 1. M.: Fizmatlit (in Russ.).
  27. Kocheva, M.A., & Boldin, S.S. (2005). *Heat generating installations*. Tutorial. N. Novgorod: Nizhny Novgorod. Gos. arkhitekt. stroit. univ. (in Russ.).
  28. *Handbook of small-capacity boiler plants* (1989). Edited by K.F. Roddatis. M.: Energoatomizdat (in Russ.).
  29. Fokin, V.M. (2006). *Heat generating installations of heat supply systems*. M.: Mashinostroenie (in Russ.).
  30. Solid fuel steam boilers KE 2,5/4,0/6,5/10/25. Technical characteristics and complete set of KE boilers. [https://biyskiykotelnyuzavod.ru/catalog/kotel\\_ke/](https://biyskiykotelnyuzavod.ru/catalog/kotel_ke/) (accessed 30.09.2020).
  31. Steam boilers of the KE series. Drawings of KE boilers (layout, assembly drawings). <https://dkwr.ru/kotlyke.html> (accessed 30.09.2020).
  32. Kolmakov, K.M., Kozlov, G.V., & Chekanskiy, V.M. (2010). Research and development of technological methods for safe disposal of secondary explosives and mixed solid rocket fuel used as main energy components for enrichment of boiler fuels based on solid domestic waste. Research Report, Megapolis. M.: ZAO Areal-98 (in Russ.).
  33. Chigirev, A.V. (2004). *ANSYS for engineers*. M.: Mashinostroenie (in Russ.).