

Применение потенциала горючести и эксергетического показателя для оценки пожарной опасности грузов железнодорожного транспорта

© Л.А. Королева¹ ✉, А.Г. Хайдаров², Г.К. Ивахнюк², Ю.Е. Актерский¹

¹ Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т, 149)

² Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет) (Россия, 190013, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т, 26)

АННОТАЦИЯ

Введение. Проблемы обеспечения пожарной безопасности при транспортировке опасных грузов (ОГ) на железнодорожном транспорте не решены в полном объеме. Отмечается недостаточная объективность оценки горючести веществ и материалов, отсутствие комплексного показателя, позволяющего с единых методологических позиций решать задачи повышения энергетической эффективности и обеспечения экологической и пожарной безопасности.

Цель настоящей работы — обоснование возможности и преимуществ эксергетического подхода для оценки пожарной опасности ОГ на железнодорожном транспорте.

Материалы и методы. Применение потенциала горючести как комплексного показателя пожарной опасности грузов имеет ряд ограничений. Перспективным для оценки и прогнозирования пожарной опасности является эксергетический подход. Обоснование целесообразности его применения проведено на примере существующих и перспективных грузов железнодорожного транспорта.

Результаты и их обсуждение. Были установлены зависимости показателей пожарной опасности (температуры вспышки, пределов распространения пламени, температуры самовоспламенения, теплоты сгорания) компонентов жидких и газообразных топлив от химической эксергии.

Изменение физической эксергии при разливе и горении изучали на примере сжиженного природного газа и сжиженных углеводородных газов различного состава. Получены модели изменения физической эксергии рассматриваемых продуктов в зависимости от температуры и давления.

Для самовозгорающихся грузов определены зависимости физической эксергии от энергии активации, критической температуры окружающей среды, теплоемкости самонагревающихся материалов. Установлено влияние коэффициента теплопроводности и влажности на значение эксергии.

Определены изменения эксергии в зависимости от элементного состава твердых коммунальных отходов, зольности, содержания летучих веществ и фиксированного углерода. Наибольшими значениями рассматриваемого показателя обладают полимеры и резины.

Для оценки пожарной и экологической опасности веществ и материалов введен эксергетический показатель, который положен в основу классификации грузов.

Выводы. Применение эксергетического показателя позволяет повысить объективность оценки, дает возможность учитывать в единой системе технико-экономические, экологические критерии и показатели пожарной опасности.

Ключевые слова: опасные грузы; углеводороды; сжиженные газы; самовозгорающиеся грузы; твердые коммунальные отходы; эксергия; теплота сгорания

Для цитирования: Королева Л.А., Хайдаров А.Г., Ивахнюк Г.К., Актерский Ю.Е. Применение потенциала горючести и эксергетического показателя для оценки пожарной опасности грузов железнодорожного транспорта // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 1. С. 16–31. DOI: 10.22227/PVB.2021.30.01.16-31

✉ Королева Людмила Анатольевна, e-mail: lyudamil@mail.ru

Using the flammability potential and the exergy indicator to assess the fire hazard of the rail transportation of cargoes

© Lyudmila A. Koroleva¹ ✉, Andrey G. Khaydarov², Grigoriy K. Ivakhnyuk², Yuriy E. Akterskiy¹

¹ Saint-Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation)

² Saint-Petersburg State Institute of Technology (Moskovskiy Avenue, 26, Saint Petersburg, 190013, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. Problems of fire safety of dangerous goods (DG) in the process of their rail transportation have not been fully resolved. The flammability assessment of substances and materials is insufficiently impartial; an integrated indicator, that allows to apply a consolidated methodological standpoint to improve their energy efficiency and environmental/fire safety is unavailable.

The purpose of this work is to substantiate the feasibility and advantages of the exergy approach to assessing the fire hazard of the exhaust gas emitted from railroad transport.

Materials and methods. The use of the flammability potential as an integrated indicator of the fire hazard of cargoes has a number of limitations. The exergy approach has a strong potential if applied to the assessment and prediction of fire hazards. Present-day and potential railroad cargoes serve as examples that substantiate the feasibility of this approach.

Results and its discussion. Dependences between fire hazard indicators (flash points, flame propagation limits, auto-ignition points, heat of combustion) demonstrated by the components of liquid and gaseous fuels and the chemical exergy were identified.

A study of changes in the physical exergy triggered by spills and combustion were illustrated by liquefied natural gas and liquefied hydrocarbon gases having various compositions. Physical exergy change patterns depending on the temperature and pressure of the above products were developed.

For self-ignitable cargoes, dependences between the physical exergy and activation energy, critical ambient temperature, and heat capacity of self-heating materials were identified. The influence of thermal conductivity and humidity coefficients on the exergy value is established.

Exergy changes were determined depending on the elemental composition of solid municipal waste, ash, volatile matter and fixed carbon content. Polymers and rubbers have the highest values of this indicator.

An exergy indicator was introduced to assess fire and environmental hazards of substances and materials; it serves as the basis for the classification of cargoes.

Conclusions. The use of the exergy indicator allows to increase the objectivity of assessments and take account of technical, economic, environmental criteria and indicators of fire hazards within an integrated system.

Keywords: dangerous goods; hydrocarbons; liquefied gases; cargoes liable to spontaneous combustion; solid municipal waste (SMW); exergy; heat of combustion

For citation: Koroleva L.A., Khaydarov A.G., Ivakhnyuk G.K., Akterskiy Yu.E. Using the flammability potential and the exergy indicator to assess the fire hazard of the rail transportation of cargoes. *Pozharovzryvbezopasnost'/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(1):16-31. DOI: 10.22227/PVB.2021.30.01.16-31 (rus).

✉ Lyudmila Anatolyevna Koroleva, e-mail: lyudamil@mail.ru

Введение

Обеспечению безопасности при перевозке опасных грузов (ОГ) на железнодорожном транспорте посвящено значительное число работ [1–6]. Вовлечение в хозяйственную деятельность большого количества ресурсов, эксплуатация сложных технических систем, рост потребления энергии и другие мероприятия приводят к увеличению объемов и номенклатуры перевозимых ОГ. Анализ статистических данных свидетельствует о нерешенности вопросов обеспечения пожарной безопасности при их транспортировке. Так, в ноябре 2012 г. потерпел крушение товарный поезд в Мьянме, вспыхнул пожар, при этом 25 человек погибли и 40 получили травмы. В июле 2013 г. в г. Ляк-Мегантик (Канада) сошел с рельсов состав, сформированный из 73 цистерн с нефтью. Пожар тушили 2 дня, погибло 47 человек. В ноябре 2017 г. недалеко от г. Лобуди (Демократическая Республика Конго) загорелись вагоны поезда, перевозившего легковоспламеняющиеся и горючие вещества. Безвозвратные потери в результате железнодорожного инцидента составили 30 человек. Особенности железнодорожного транспорта определяют сложности тушения таких пожаров, возможность распространения горения

на большие площади, массовой гибели людей и возникновения значительного ущерба.

Перспективным для повышения безопасности является системный подход, основанный на получении и анализе данных, характеризующих пожарную опасность, прогнозировании их изменений, определении основных характеристик систем предотвращения пожара и пожарной защиты [6–9]. Его реализация предъявляет высокие требования к извлечению и систематизации исходной информации, оценке показателей пожарной опасности, которые применяются не только для целей классификации, но и являются исходными данными для инженерных расчетов [9, 10].

Определение горючести веществ и материалов, расчет показателей пожарной опасности представляют собой цели значительного количества исследований [9, 11–14]. Группа горючести определена как один из основных показателей оценки пожарной опасности веществ.

Значительный вклад в научную разработку проблем пожарной безопасности внес В.Т. Монахов. Выделив три группы горючести, он предложил классификацию веществ и материалов (с некоторыми изменениями она вошла в Федеральный закон № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях

пожарной безопасности»¹⁾), рассмотрение которой позволяет сделать вывод, что «горючесть материалов должна зависеть от этапа их жизненного цикла», однако «не определено, каким образом она может при этом изменяться» [12]. Отмечается недостаточная объективность оценки горючести веществ и материалов [12].

Кроме того, вопросы определения пожарной опасности веществ и материалов на железнодорожном транспорте рассматриваются отдельно от задач повышения энергетической эффективности и снижения выбросов в окружающую среду, что определяется наличием методологических проблем, затрудняющих учет различных показателей в единой системе [15, 16].

Цель настоящей работы — обоснование возможности и преимуществ эксергетического подхода для оценки пожарной опасности ОГ на железнодорожном транспорте. Для ее достижения были решены следующие задачи:

- проведен анализ применения потенциала горючести как характеристики горючести веществ;
- установлены связи между эксергией и показателями пожаровзрывоопасности для грузов на железнодорожном транспорте;
- обоснована возможность учета теплофизических условий возникновения горения через эксергию;
- на основании проведенных расчетно-экспериментальных исследований определены условия и закономерности изменения эксергии;
- выявлены преимущества эксергетического подхода для оценки пожарной опасности ОГ на железнодорожном транспорте.

Материалы и методы

Для характеристики горючести вещества В.Т. Монаховым был введен комплексный показатель пожарной опасности — потенциал горючести ΔP_r , представляющий собой избыточную или недостаточную энергию, заключенную в горючей системе [9]. Понятие потенциала горючести основывается на термодинамическом рассмотрении предельных по горючести газовых смесей и связано со значениями энтальпий компонентов смеси при исходной температуре и температуре горения.

Использование величины ΔP_r позволяет:

- 1) дифференцировать смеси на горючие $\Delta P_r < 0$ и негорючие $\Delta P_r > 0$. $\Delta P_r = 0$ соответствует предельной по горючести смеси [9];

2) определять состав смесей, обладающих определенной горючестью или заданной огнетушащей или флегматизирующей эффективностью;

3) рассчитывать нижний предел воспламенения;

4) определять огнетушащие и флегматизирующие концентрации.

Однако использование потенциала горючести имеет ряд ограничений:

- его численное значение изменяется в зависимости от температуры горения, которая не является одинаковой для различных смесей;
- не учитываются возможные химические изменения флегматизатора; флегматизирующая способность определяется только изменением его энтальпии при нагревании;
- величина ΔP_r зависит от определяющего размера сосуда, в котором распространяется горение. Основной причиной является влияние диаметра сосуда на адиабатическую температуру горения предельной по горючести смеси;
- имеются трудности расчета ΔP_r для жидкостей и твердых веществ, что обусловлено особенностями их горения и невозможностью точно определить зависимость потенциала горючести от параметров состояния веществ в конденсированном состоянии;
- применение потенциала горючести не позволяет сравнивать процессы и технологии с точки зрения энергоэкологической эффективности и экологической безопасности.

Кроме того, в работе [13] отмечается, что «понятие потенциала горючести — эмпирическое, поэтому не всегда представляется возможным четко определить область применимости методов, основанных на его использовании».

Перспективным для оценки и прогнозирования пожарной опасности является эксергетический подход [15, 16]. Имеется значительное количество работ, посвященных исследованию эксергетической эффективности и экологической безопасности технических систем и процессов [17–20]. Пожарная опасность при этом не рассматривалась. Применение эксергетического подхода при комплексном решении вопросов, направленных на повышение энергетической эффективности процессов, снижение экологической и пожарной опасности, создает условия для преодоления методологических проблем при необходимости учета различных показателей в единой системе.

При этом ключевым является понятие эксергии, предложенное югославским ученым З. Рантом в 1953 г. для обозначения технической работоспособности [21, 22]. Современное определение закреплено в информационно-техническом справочнике по наилучшим доступным технологиям ИТС 48–2017

¹ Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федеральный закон № 123-ФЗ от 22 июля 2008 г. : принят Государственной Думой 4 июля 2008 г.; одобрен Советом Федерации 11 июля 2008 г.

«Повышение энергетической эффективности при осуществлении хозяйственной и (или) иной деятельности».

Эксергия e является аналогом энергии Гиббса G , внешне отличается от нее только температурой [21–23]:

$$e = \Delta H - T_0 \Delta S,$$

где e — удельная эксергия вещества, кДж/моль;

ΔH — изменение энтальпии, кДж/моль;

ΔS — изменение энтропии, кДж/(моль·К);

T_0 — температура окружающей среды, К.

Эксергия является функцией параметров системы и параметров окружающей среды. Она включает физическую, химическую, кинетическую и потенциальную составляющие. Для большинства реальных технических систем кинетическая и потенциальная эксергия малы, не имеют практического значения [21, 23] и к анализу в данном исследовании не принимались.

Эксергия рассматривается как мера отклонения параметров состояния термодинамической системы от условий окружающей среды. Физическая эксергия учитывает различия в давлении (механическая составляющая) и температуре (термическая составляющая), химическая определяет отклонения в составе при температуре и давлении окружающей среды и подразделяется на реакцию и концентрационную.

Обоснование целесообразности применения эксергетического метода для оценки и прогнозирования пожарной опасности было проведено на примере существующих и перспективных грузов железнодорожного транспорта, относящихся к классам 2–4 и 9 (по ГОСТ 19433–88²).

Расчеты физической и химической эксергии проводились следующим образом.

1. Для моделирования процессов, связанных с авариями при транспортировке опасных грузов классов 2 и 3, была использована программа HYSYS, включающая различные методы расчета термодинамических свойств и обеспечивающая надежные результаты для расчетов смесей углеводородов, используемых в нефтехимической и химической промышленности. Нами предложен программный комплекс, встроенный в программный пакет HYSYS с помощью технологии Active X. Его применение позволяет проводить расчеты физической $e_{\text{физ}}$ и химической $e_{\text{хим}}$ эксергии, эксергетического коэффициента полезного действия и определять низшую теплоту сгорания грузов железнодорожного транспорта [24].

2. Для определения эксергии самовозгорающихся твердых веществ (классы 4 и 9) были выбраны термореактивные пористые и дисперсные материалы (травяная, крилевая, рыбная, ржаная, кормовая мука, дрожжи, древесные опилки и др.). Учитывая равенство давлений внутри скопления вещества и в окружающей среде, расчеты физической эксергии $e_{\text{физ}}$ проводили по формуле [25]:

$$e_{\text{физ}} = C_p \left[(T - T_0) - T_0 \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) \right], \quad (1)$$

где T_0 — температура окружающей среды, К;

T — температура нагрева вещества, К, принималась равной температуре тления $T_{\text{тл}}$ и самовоспламенения $T_{\text{св}}$;

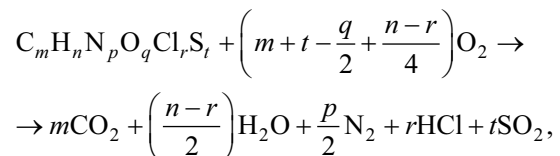
C_p — удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·К).

3. Расчет критической температуры окружающей среды, при которой, возможно, самонагревание T_0^k проводили по «Методике определения теплового самовозгорания веществ и материалов», разработанной ВНИИПО³. Исходные данные для расчета: энергию активации, температуры компенсации, тления, самовоспламенения и другие показатели пожарной опасности — определяли по данным, представленным в [26–28].

4. В качестве перспективного груза для железнодорожного транспорта были рассмотрены твердые коммунальные отходы (ТКО).

Основываясь на информации по морфологическому составу [16, 29, 30], расчет теплоты сгорания и химической эксергии общей массы ТКО и их отдельных фракций проводили в соответствии с моделью прогнозирования, предложенной F. Eboh, P. Ahlström, T. Richards [16, 29].

В основе расчетов лежит предположение, что 1 кг отходов (общая формула $C_m H_n N_p O_q Cl_r S_t$) подвергается полному сгоранию в соответствии с реакцией:



где m, n, p, q, r, t — количество атомов соответственно углерода C, водорода H, азота N, кислорода O, хлора Cl и серы S, принимаемое в соответствии с данными [29, 31].

Принято, что параметры окружающей среды (температура и давление) при перевозке отходов составляют $T_0 = 298,15$ К и $P_0 = 101,325$ кПа.

² ГОСТ 19433–88. Грузы опасные. Классификация и маркировка: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 19 августа 1988 г. № 2957.

³ Методика определения теплового самовозгорания веществ и материалов: согласована с ГУПИС МЧС России письмом № 18/2/848 от 2 апреля 2004 г. и утверждена ФГУ ВНИИПО МЧС России 21 апреля 2004 г.

Результаты и их обсуждение

Были найдены зависимости от химической энергии $e_{\text{хим}}$, кДж/моль, показателей пожарной опасности: температуры вспышки $T_{\text{всп}}$, нижнего и верхнего концентрационного предела распространения пламени (соответственно НКПР и ВКПР), нижнего

и верхнего температурного предела распространения пламени (соответственно НТПР и ВТПР), температуры самовоспламенения $T_{\text{св}}$, низшей теплоты сгорания $Q_{\text{н}}$. Определены величины достоверности аппроксимации R^2 . Объектами исследования выбраны вещества — компоненты жидких, паро- и газообразных топлив (табл. 1).

Таблица 1. Регрессионные уравнения для расчета показателей пожарной опасности компонентов жидких и газообразных топлив
Table 1. Regression equations for calculating values of fire hazard indicators for components of liquid and gaseous fuels

Номер No.	Показатель пожарной опасности Fire hazard indicator	Уравнение регрессии Regression equation	R^2
Алканы / Alkanes			
1	$T_{\text{всп}}$ Flash point	$T_{\text{всп}} = 0,03e_{\text{хим}} - 137,76$ $T_{\text{flash point}} = 0,03e_{\text{chem}} - 137,76$	0,98
2	НКПР / Lower concentration limit of flame propagation	НКПР = $3751,13e_{\text{хим}}^{-0,97}$ Lower concentration limit of flame propagation = $3751,13e_{\text{chem}}^{-0,97}$	0,99
3	ВКПР / Upper concentration limit of flame propagation	ВКПР = $692,45e_{\text{хим}}^{-0,55}$ Upper concentration limit of flame propagation = $692,45e_{\text{chem}}^{-0,55}$	0,95
4	НТПР Lower temperature limit of flame propagation	НТПР = $-1,19 \cdot 10^{-6} e_{\text{хим}}^2 + 0,04 e_{\text{хим}} - 174,00$ Lower temperature limit of flame propagation = $-1,19 \cdot 10^{-6} e_{\text{chem}}^2 + 0,04 e_{\text{chem}} - 174,00$	0,99
5	ВТПР Upper temperature limit of flame propagation	ВТПР = $-1,59 \cdot 10^{-6} e_{\text{хим}}^2 + 0,05 e_{\text{хим}} - 173,00$ Upper temperature limit of flame propagation = $-1,59 \cdot 10^{-6} e_{\text{chem}}^2 + 0,05 e_{\text{chem}} - 173,00$	0,99
6	$T_{\text{св}}$ Auto-ignition temperature	$T_{\text{св}} = 4,00 \cdot 10^{-6} e_{\text{хим}}^2 - 0,09 e_{\text{хим}} + 637,01$ Auto-ignition temperature $T_{\text{ai}} = 4,00 \cdot 10^{-6} e_{\text{chem}}^2 - 0,09 e_{\text{chem}} + 637,01$	0,74
Алканы и циклоалканы / Alkanes и cycloalkanes			
7	$T_{\text{всп}}$ Flash point	$T_{\text{всп}} = 1,35 \cdot 10^{-6} e_{\text{хим}}^2 - 0,04 e_{\text{хим}} + 171,00$ $T_{\text{flash point}} = 1,35 \cdot 10^{-6} e_{\text{chem}}^2 - 0,04 e_{\text{chem}} + 171,00$	0,99
8	НКПР / Lower concentration limit of flame propagation	НКПР = $5628,00e_{\text{хим}}^{-1,02}$ Lower concentration limit of flame propagation = $5628,00e_{\text{chem}}^{-1,02}$	0,99
9	ВКПР / Upper concentration limit of flame propagation	ВКПР = $1030,00e_{\text{хим}}^{-0,60}$ Upper concentration limit of flame propagation = $1030,00e_{\text{chem}}^{-0,60}$	0,97
10	НТПР Lower temperature limit of flame propagation	НТПР = $-6,27 \cdot 10^{-7} e_{\text{хим}}^2 + 0,03 e_{\text{хим}} - 135,00$ Lower temperature limit of flame propagation = $-6,27 \cdot 10^{-7} e_{\text{chem}}^2 + 0,03 e_{\text{chem}} - 135,00$	0,99
11	ВТПР Upper temperature limit of flame propagation	ВТПР = $-5,85 \cdot 10^{-7} e_{\text{хим}}^2 + 0,03 e_{\text{хим}} - 113,00$ Upper temperature limit of flame propagation = $-5,85 \cdot 10^{-7} e_{\text{chem}}^2 + 0,03 e_{\text{chem}} - 113,00$	0,99
12	$T_{\text{св}}$ Auto-ignition temperature	$T_{\text{св}} = 6,83 \cdot 10^{-6} e_{\text{хим}}^2 - 0,11 e_{\text{хим}} + 632,00$ Auto-ignition temperature $T_{\text{ai}} = 6,83 \cdot 10^{-6} e_{\text{chem}}^2 - 0,11 e_{\text{chem}} + 632,01$	0,75
Ароматические / Aromas			
13	$T_{\text{всп}}$ Flash point	$T_{\text{всп}} = -1,46 \cdot 10^{-6} e_{\text{хим}}^2 + 0,04 e_{\text{хим}} - 130,00$ $T_{\text{flash point}} = -1,46 \cdot 10^{-6} e_{\text{chem}}^2 + 0,04 e_{\text{chem}} - 130,00$	0,93
14	НКПР Lower concentration limit of flame propagation	НКПР = $2,88 \cdot 10^{-8} e_{\text{хим}}^2 - 5,24 \cdot 10^{-4} e_{\text{хим}} + 2,90$ Lower concentration limit of flame propagation = $2,88 \cdot 10^{-6} e_{\text{chem}}^2 - 5,24 \cdot 10^{-4} e_{\text{chem}} + 2,90$	0,98

Номер No.	Показатель пожарной опасности Fire hazard indicator	Уравнение регрессии Regression equation	R ²
15	ВКПР Upper concentration limit of flame propagation	$ВКПР = 1,94 \cdot 10^{-7} e_{хим}^2 - 2,58 \cdot 10^{-3} e_{хим} + 14,20$ Upper concentration limit of flame propagation = $1.94 \cdot 10^{-7} e_{chem}^2 - 2.58 \cdot 10^{-3} e_{chem} + 14.20$	0,81
16	НТПР Lower temperature limit of flame propagation	$НТПР = -4,94 \cdot 10^{-6} e_{хим}^2 + 0,07 e_{хим} - 189,00$ Lower temperature limit of flame propagation = $-4.94 \cdot 10^{-6} e_{chem}^2 + 0.07 e_{chem} - 189.00$	0,96
17	ВТПР Upper temperature limit of flame propagation	$ВТПР = -3,58 \cdot 10^{-6} e_{хим}^2 + 0,06 e_{хим} - 157,00$ Upper temperature limit of flame propagation = $-3.58 \cdot 10^{-6} e_{chem}^2 + 0.06 e_{chem} - 157.00$	0,93
Карбоциклические (циклоалканы и ароматические) / Carbocyclic (cycloalkanes and aromatic)			
18	T _{всп} Flash point	$T_{всп} = 7,25 \cdot 10^{-6} e_{хим}^2 + 0,10 e_{хим} - 276,00$ $T_{flash\ point} = 7.25 \cdot 10^{-6} e_{chem}^2 + 0.10 e_{chem} - 276.00$	0,79
19	НКПР Lower concentration limit of flame propagation	$НКПР = 4,08 \cdot 10^{-8} e_{хим}^2 - 6,93 \cdot 10^{-4} e_{хим} + 3,40$ Lower concentration limit of flame propagation = $4.08 \cdot 10^{-8} e_{chem}^2 - 6.93 \cdot 10^{-4} e_{chem} + 3.40$	0,70
20	ВКПР Upper concentration limit of flame propagation	$ВКПР = 3,31 \cdot 10^{-7} e_{хим}^2 - 4,08 \cdot 10^{-3} e_{хим} + 18,30$ Upper concentration limit of flame propagation = $3.31 \cdot 10^{-7} e_{chem}^2 - 4.08 \cdot 10^{-3} e_{chem} + 18.30$	0,76
21	НТПР Lower temperature limit of flame propagation	$НТПР = -0,58 \cdot 10^{-6} e_{хим}^2 + 0,04 e_{хим} - 143,00$ Lower temperature limit of flame propagation = $-0.58 \cdot 10^{-6} e_{chem}^2 + 0.04 e_{chem} - 143.00$	0,74
22	ВТПР Upper temperature limit of flame propagation	$ВТПР = -0,92 \cdot 10^{-6} e_{хим}^2 + 0,04 e_{хим} - 133,0$ Upper temperature limit of flame propagation = $-0.92 \cdot 10^{-6} e_{chem}^2 + 0.04 e_{chem} - 133.0$	0,72
Углеводороды (алканы, алкены, алкины, карбоциклические) / Hydrocarbons (alkanes, alkenes, alkynes, carbocyclic)			
23	T _{всп} Flash point	$T_{всп} = 0,03 e_{хим} - 131,08$ $T_{flash\ point} = 0.03 e_{chem} - 131.08$	0,86
24	Q _н Lower heat of combustion	$Q_{н} = 0,94 e_{х} + 66,70$ Lower heat of combustion = $0.94 e_{x} + 66.70$	0,99

Изменение физической эксергии изучали на примере сжиженного природного газа (СПГ) (ГОСТ Р 57431-2017⁴) и сжиженных углеводородных газов (СУГ) (ГОСТ 27578-2018⁵) различного состава, транспортирующихся при условиях, отличных от условий окружающей среды (температура и давление) (рис. 1).

Расчеты, проведенные в программе HYSYS, показали, что эксергетический потенциал для СУГ выше, чем для СПГ. При разгерметизации оборудова-

ния физическая эксергия СПГ уменьшается быстрее, что определяется особенностями его рассеивания в атмосфере. Точка резкого падения физической эксергии соответствует температурам кипения рассматриваемых продуктов при атмосферном давлении (рис. 2).

Сравнительная оценка пожарной опасности СУГ и СПГ показала, что природный газ обладает более высокими значениями T_{св}, минимальной энергии зажигания, НКПР, меньшими величинами нормальной скорости распространения пламени и максимального давления взрыва. Эти данные хорошо коррелируют с полученными значениями эксергии. Химическая эксергия СУГ примерно в 2,5–3 раза выше аналогичного показателя СПГ.

⁴ ГОСТ Р 57431–2017 (ИСО 16903:2015). Газ природный сжиженный. Общие характеристики : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 30 марта 2017 г. № 219-ст.

⁵ ГОСТ 27578–2018. Газы углеводородные сжиженные для автомобильного транспорта. Технические условия : принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 27 июля 2018 г. № 110-П).

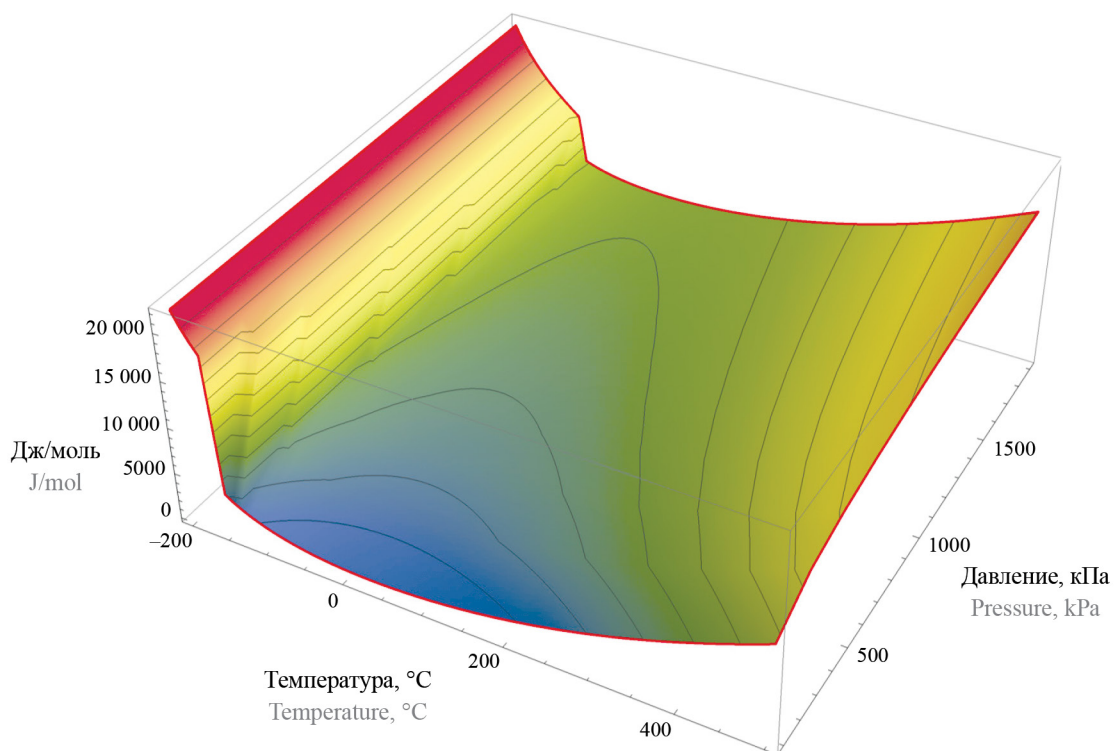


Рис. 1. Изменение физической эксергии, Дж/моль, сжиженных газов в зависимости от температуры и давления
Fig. 1. Change in physical exergy, J/mol, of liquefied gases depending on temperature and pressure

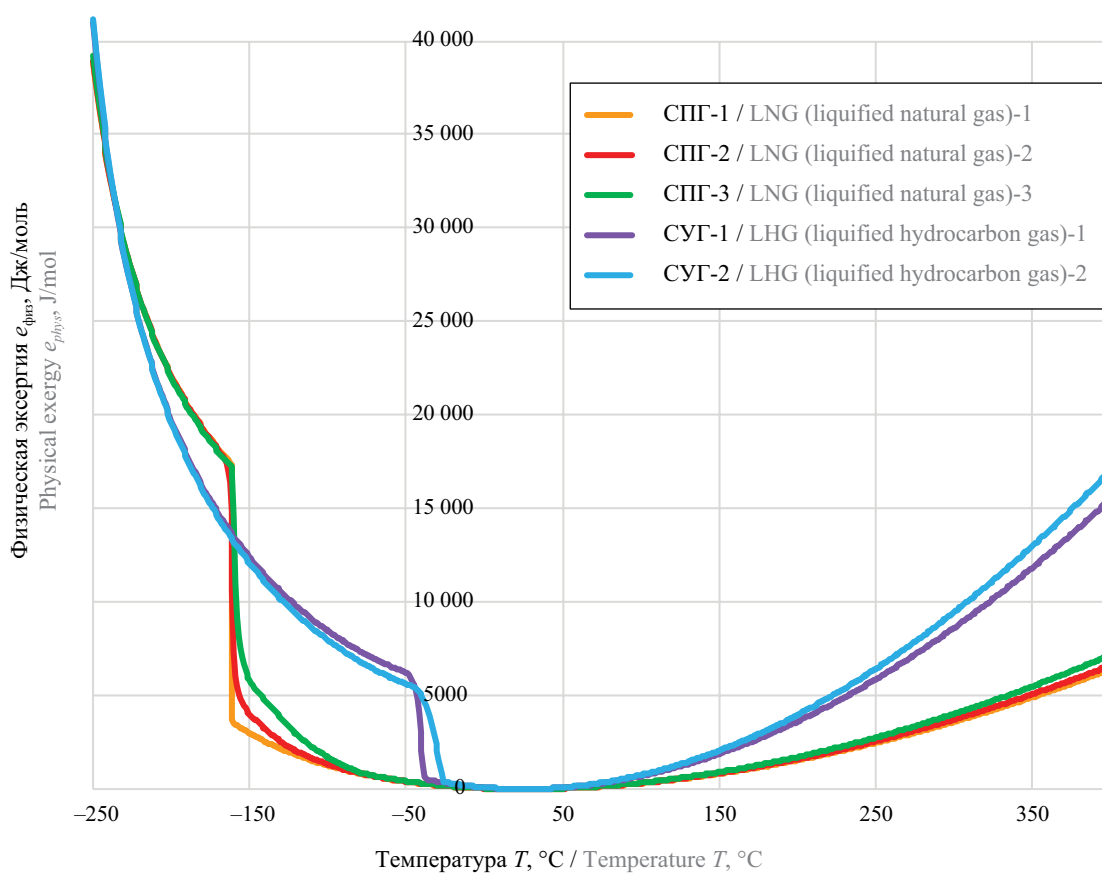


Рис. 2. Зависимость физической эксергии от температуры для СПГ и СУГ
Fig. 2. Dependence of physical exergy on temperature for LNG and LHG

Для самовозгорающихся грузов по формуле (1) произведен расчет физической эксергии, кДж/кг, и определены ее изменения (табл. 2). С уменьшением энергии активации значение рассматриваемой величины возрастает. С ростом критической температуры окружающей среды эксергия падает.

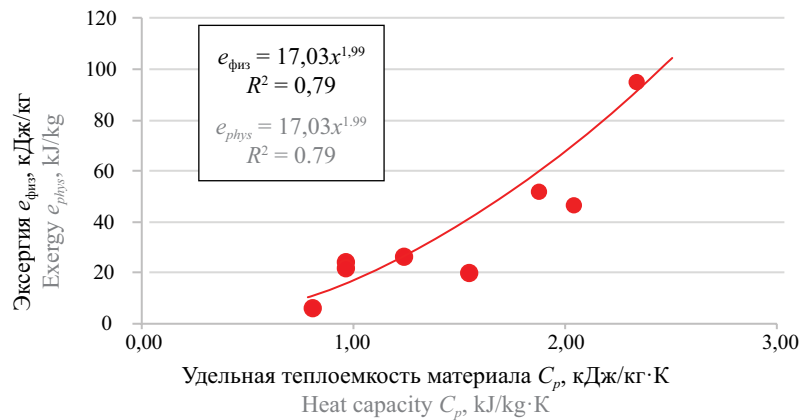
С увеличением теплоемкости самонагревающегося материала эксергия увеличивается, при этом уменьшается темп охлаждения (рис. 3).

Определено, что эксергия практически не зависит от коэффициента теплопроводности самонагревающихся материалов. Однако его увеличение

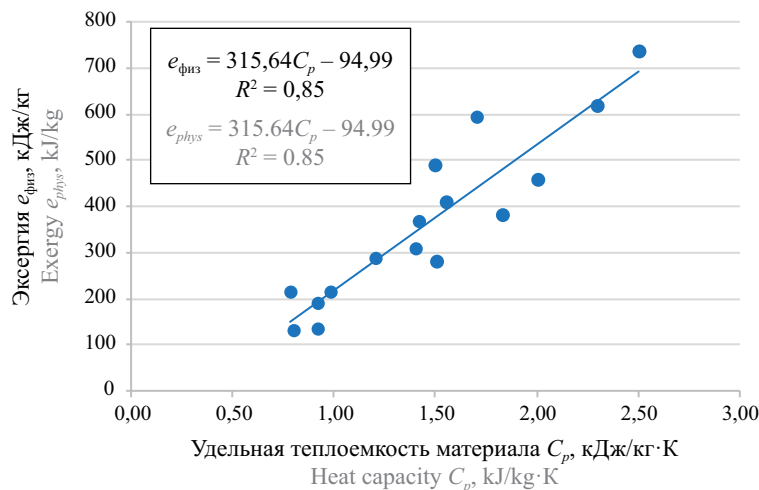
Таблица 2. Регрессионные уравнения зависимостей физической эксергии от энергии активации и критической температуры окружающей среды

Table 2. Regression equations describing dependencies of physical exergy on activation energy and critical ambient temperature

Показатель Indicator	Физическая эксергия $e_{\text{физ}}$, кДж/кг Physical exergy e_{phys} , kJ/kg			
	$T = T_{\text{тл}} / T = T_{\text{см}}$		$T = T_{\text{св}} / T = T_{\text{ат}}$	
	Уравнение регрессии Regression equation	R^2	Уравнение регрессии Regression equation	R^2
Энергия активации E_a , кДж/моль Activation energy E_a , kJ/mol	$e_{\text{физ}} = 434\,864 \cdot E_a^{-2,05}$ $e_{\text{phys}} = 434,864 \cdot E_a^{-2,05}$	0,79	$e_{\text{физ}} = 31\,387 \cdot E_a^{-1,16}$ $e_{\text{phys}} = 31,387 \cdot E_a^{-1,16}$	0,84
Критическая температура окружающей среды $T_0^{\text{к}}$, К Critical ambient temperature $T_0^{\text{к}}$, K	$e_{\text{физ}} = 292,3 \cdot \ln(T_0^{\text{к}}) + 1751,9$ $e_{\text{phys}} = 292,3 \cdot \ln(T_0^{\text{к}}) + 1751,9$	0,71	$e_{\text{физ}} = 8 \cdot 10^9 \cdot T_0^{\text{к}-3,05}$ $e_{\text{phys}} = 8 \cdot 10^9 \cdot T_0^{\text{к}-3,05}$	0,87



a



b

Рис. 3. Зависимость физической эксергии от теплоемкости самонагревающихся материалов при $T = T_{\text{тл}}$ (a) и $T = 600\text{ °C}$ (b)
Fig. 3. Dependence of physical exergy on the heat capacity of self-heating materials, at $T = T_{\text{см}}$ (a), at $T = 600\text{ °C}$ (b)

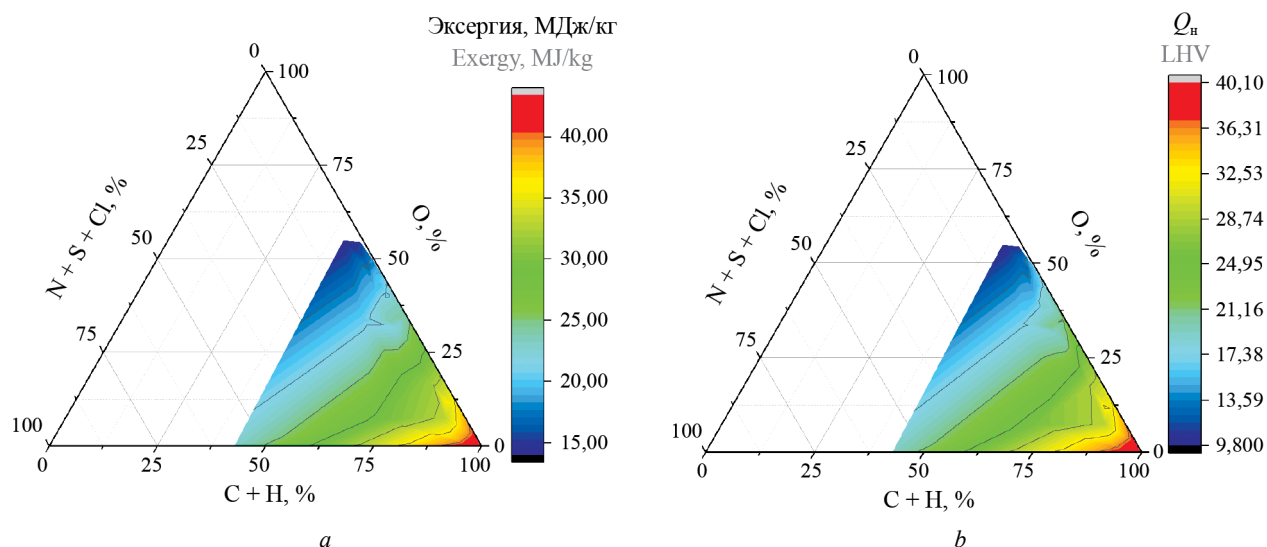


Рис. 4. Изменения химической эксергии (a) и низшей теплоты сгорания (b) от элементного состава ТКО

Fig. 4. Changes in chemical exergy (a) and lower value of the heat of combustion (b) triggered by the elemental composition of municipal solid waste (MSW)

сопровождается ростом критического размера неподвижного скопления материала. Влияние влажности на изменение эксергии зависит от причины процесса (тепловой, химической, микробиологической), свойств самовозгорающихся материалов (например, способности частиц к агломерации при увеличении влажности, возможности химического взаимодействия с H₂O).

Анализируя полученные данные, можно констатировать, что увеличение склонности к самовозгоранию сопровождается ростом эксергии.

Далее были рассмотрены ТКО, для которых рассчитаны $e_{\text{хим}}$, МДж/кг, $Q_{\text{н}}$, МДж/кг, и определены их зависимости от элементного состава отходов, что иллюстрирует рис. 4.

Было исследовано изменение эксергии в зависимости от зольности A , %, содержания летучих веществ V , %, и фиксированного углерода FC , %, (рис. 5). Показатели A , V , FC определены по данным [30]. Показано, что эксергия повышается с возрастанием содержания летучих веществ. Увеличение фиксированного углерода приводит к уменьшению рассматриваемого показателя. Эксергия растет при снижении зольности.

Сравнительная характеристика компонентов отходов представлена на табл. 3. Вещества и материалы перечислены в убывающей последовательности.

Проведенный анализ показал, что отходы могут быть разделены на четыре группы, включающие компоненты:

1) сорняки, кожура плодов, листья, дерево, ореховая скорлупа, овощи и др., состоящие из пектина, гемицеллюлозы, целлюлозы и лигнина с высоким FC и средними значениями других показателей;

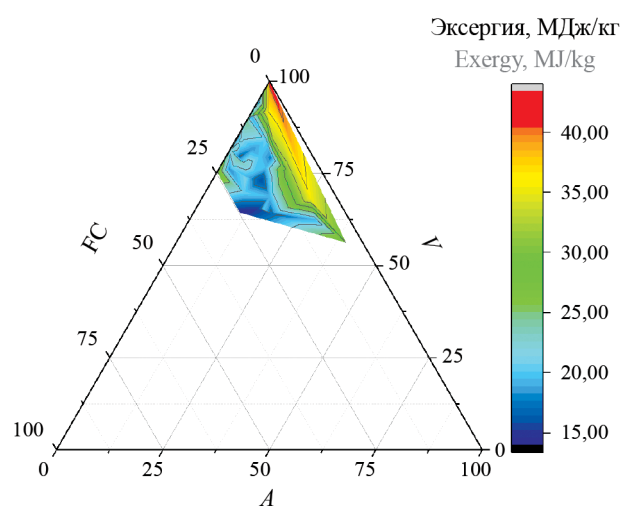


Рис. 5. Изменение химической эксергии в зависимости от содержания летучих веществ, фиксированного углерода и зольности

Fig. 5. A change in chemical exergy depending on the content of volatile substances, fixed carbon and ash content

2) хлопок, пищевой крахмал, картофель, туалетная бумага, бумага для печати, картон, состоящие из повторяющихся звеньев глюкозы, различным образом ориентированных в пространстве;

3) шерсть и химические волокна, имеющие низкое содержание Н и О, высокое содержание S и N, высокие значения $Q_{\text{н}}$ и $e_{\text{хим}}$;

4) пластмассы и резины, имеющие высокие значения V (практически 100 %), C, H, $Q_{\text{н}}$ и $e_{\text{хим}}$ и низкое содержание O, N, A, FC.

Наибольшей химической эксергией обладают пластмассы и резины.

Таблица 3. Сравнительная характеристика компонентов отходов в зависимости от значений низшей теплоты сгорания и химической эксергии**Table 3.** Comparative characteristics of waste components depending on lower values of heat combustion and chemical exergy

Показатель Value	Компоненты отходов Waste components
A, %	Кости > овощи > бумага для печати > резина > картон > листья > сорняки > поливинилхлорид > кожура фруктов > химические волокна > скорлупа от орехов > древесина > шерсть > хлопок > крахмал пищевой > полипропилен > полиэтилен > туалетная бумага > полиэтилентетрафталат > полистирол Bones > vegetables > printing paper > rubber > cardboard > leaves > weeds > polyvinyl chloride > fruit peel > chemical fibers > nut shells > wood > wool > cotton > food starch > polypropylene > polyethylene > toilet paper > polyethylene terephthalate > polystyrene
V, %	Полиэтилен > полипропилен > полистирол > туалетная бумага > полиэтилентетрафталат > хлопок > крахмал пищевой > химические волокна > шерсть > поливинилхлорид > дерево > картон > бумага для печати > кожура фруктов > сорняки > листья > орехи > овощи > резина > кости Polyethylene > polypropylene > polystyrene > toilet paper > polyethylene terephthalate > cotton > food starch > chemical fibers > wool > polyvinyl chloride > wood > cardboard > printing paper > fruit peel > weeds > leaves > nuts > vegetables > rubber > bones
FC, %	Ореховая скорлупа > резина > кожура фруктов > листья > сорняки > дерево > шерсть > крахмал пищевой > картон > хлопок > химическое волокно > поливинилхлорид > овощи > бумага для печати > полиэтилентетрафталат > туалетная бумага > кости > полистирол > полиэтилен > полипропилен Nut shells > rubber > fruit peels > leaves > weeds > wood > wool > food starch > cardboard > cotton > chemical fiber > polyvinyl chloride > vegetables > printing paper > polyethylene terephthalate > toilet paper > bones > polystyrene > polyethylene > polypropylene
C, %	Полистирол > полиэтилен > полипропилен > резина > полиэтилентетрафталат > шерсть > химическое волокно > кости > ореховая скорлупа > сорняки > дерево > листья > кожура фруктов > картон > хлопок > бумага для печати > овощи > туалетная бумага > крахмал > продукты питания > поливинилхлорид Polystyrene > polyethylene > polypropylene > rubber > polyethylene terephthalate > wool > chemical fiber > bones > nutshells > weeds > wood > leaves > fruit peel > cardboard > cotton > printing paper > vegetables > toilet paper > starch > food > polyvinyl chloride
H, %	Полиэтилен > полипропилен > полистирол > резина > кости > ореховая скорлупа > сорняки > крахмал > продукты питания > хлопок > бумага для печати > картон > кожура фруктов > дерево > туалетная бумага > листья > овощи > шерсть > химическое волокно > поливинилхлорид > полиэтилентетрафталат Polyethylene > polypropylene > polystyrene > rubber > bones > nut shells > weeds > starch > food > cotton > printing paper > cardboard > fruit peel > wood > toilet paper > leaves > vegetables > wool > chemical fiber > polyvinyl chloride > polyethylene terephthalate
O, %	Туалетная бумага > крахмал пищевой > бумага для печати > овощи > картон > хлопок > листья > кожура фруктов > дерево > сорняки > ореховые скорлупы > полиэтилентетрафталат > химическое волокно > кости > шерсть > резина > полипропилен > полистирол > полиэтилен > поливинилхлорид Toilet paper > food starch > printing paper > vegetables > cardboard > cotton > leaves > fruit peels > wood > weeds > nut shells > polyethylene terephthalate > chemical fiber > bones > wool > rubber > polypropylene > polystyrene > polyethylene > polyvinyl chloride
N, %	Шерсть > кости > химическое волокно > овощи > крахмалистые > кожура фруктов > орехи > резина > хлопок > сорняки > листья > дерево > картон > бумага для печати > полиэтилентетрафталат > туалетная бумага > полиэтилен > поливинилхлорид > полипропилен > полистирол Wool > bones > chemical fiber > vegetables > starch > fruit peel > nuts > rubber > cotton > weeds > leaves > wood > cardboard > printing paper > polyethylene terephthalate > toilet paper > polyethylene > polyvinyl chloride > polypropylene > polystyrene
Cl, %	Поливинилхлорид > резина > хлопок > дерево > бумага для печати > бамбук > картон > кожура фруктов > крахмал > продукты питания > полиэтилен > полипропилен > полистирол Polyvinyl chloride > rubber > cotton > wood > printing paper > bamboo > cardboard > fruit peel > starch > food > polyethylene > polypropylene > polystyrene
S, %	Шерсть > резина > кости > овощи > химическое волокно > листья > поливинилхлорид > картон > ореховая скорлупа > бумага для печати > листья > туалетная бумага > кожура фруктов > крахмал пищевой > хлопок > дерево > полистирол > полиэтилен > полиэтилентетрафталат > полипропилен Wool > rubber > bones > vegetables > chemical fiber > leaves > polyvinyl chloride > cardboard > nut shells > printing paper > leaves > toilet paper > fruit peel > food > starch > cotton > wood > polystyrene > polyethylene > polyethylene terephthalate > polypropylene

Показатель Value	Компоненты отходов Waste components
Q_n , МДж/кг Lower heat combustion value, MJ/kg	Полиэтилен > полипропилен > полистирол > пластиковая упаковка > резина > акриловое волокно > рыбные кости > полиэтиленотетрафталат > полиэфирные волокна > хлопок > кости животных > поливинилхлорид > шерсть > опилки > скорлупа орехов > дерево > щепа > сорняки > кожура фруктов > туалетная бумага > картон > листья > бумага для печати > крахмал пищевой > овощи Polyethylene > polypropylene > polystyrene > plastic packaging > rubber > acrylic fiber > fish bones > polyethylene terephthalate > polyester fibers > cotton > animal bones > polyvinyl chloride > wool > sawdust > nut shells > wood > wood chips > weeds > fruit peel > toilet paper > cardboard > leaves > printing paper > food starch > vegetables
Q_v , МДж/кг Upper heat combustion value, MJ/kg	Полиэтилен > полипропилен > полистирол > пластиковая упаковка > резина > акриловое волокно > кости > полиэтиленотетрафталат > полиэфирные волокна > хлопок > скорлупа орехов > опилки > шерсть > поливинилхлорид > древо > щепа > кожура фруктов > сорняки > туалетная бумага > картон > листья > крахмал пищевой > бумага для печати > овощи Polyethylene > polypropylene > polystyrene > plastic packaging > rubber > acrylic fiber > bones > polyethylene terephthalate > polyester fibers > cotton > nut shells > sawdust > wool > polyvinyl chloride > wood > wood chips > fruit peel > weeds > toilet paper > cardboard > leaves > food starch > printing paper > vegetables
Химическая эксергия, МДж/кг Chemical exergy, MJ/kg	Полиэтилен > полипропилен > полистирол > пластиковая упаковка > резина > акриловое волокно > рыбные кости > полиэтиленотетрафталат > кости животных > полиэфирные волокна > хлопок > скорлупа орехов > поливинилхлорид > опилки > дерево > щепа > кожура фруктов > сорняки > туалетная бумага > картон > листья > крахмал пищевой > бумага для печати > овощи Polyethylene > polypropylene > polystyrene > plastic packaging > rubber > acrylic fiber > fish bones > polyethylene terephthalate > animal bones > polyester fibers > cotton > nut shells > polyvinyl chloride > sawdust > wood > wood chips > fruit peel > weeds > toilet paper > cardboard > leaves > food starch > printing paper > vegetables

Между эксергией и теплотой сгорания ТКО получена прямая пропорциональная зависимость (рис. 6).

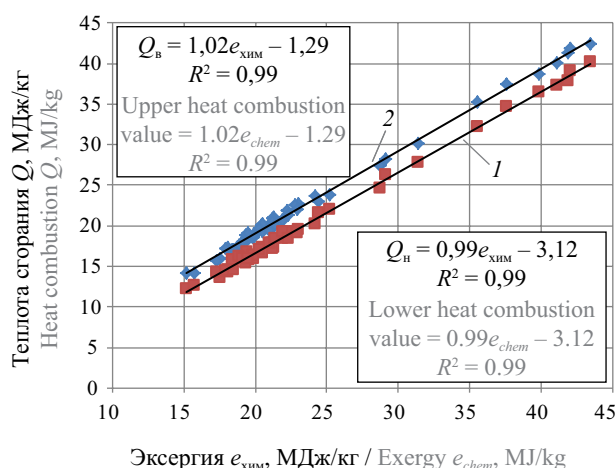


Рис. 6. Зависимость теплоты сгорания от эксергии для ТКО: 1 — $Q_n = f(e_{хим})$; 2 — $Q_v = f(e_{хим})$

Fig. 6. Dependence of combustion heat on exergy for MSW: 1 — lower heat combustion value = $f(e_{chem})$; 2 — upper heat combustion value = $f(e_{chem})$

Выявленные закономерности позволяют обосновать применение эксергетического показателя

для прогностической оценки пожарной опасности ТКО как грузов на железнодорожном транспорте.

Проанализировав пожароопасные свойства веществ — грузов на железнодорожном транспорте, соотнеся их со значениями эксергии, представляется целесообразным ввести эксергетический показатель для оценки пожарной и экологической опасности веществ, материалов и изделий:

$$П_э = \frac{e}{30},$$

где e — удельная эксергия груза, МДж/кг;

30 — минимальная удельная эксергия груза, относящегося к классу Э3, МДж/кг.

Классификация веществ и материалов по эксергетическому показателю представлена в табл. 4.

К классу Э2 относятся шерсть, химические волокна, картон, бумага, крахмал, сухие листья, сухая трава, сушеные овощи и кожура плодов.

Класс Э3 включает в себя пластмассы и резины, обладающие наибольшими значениями эксергетического показателя ТКО.

Введение эксергетического показателя добавит процедуре определения класса опасности ТКО объективности в плане назначения более высокого класса в целях обеспечения безопасности.

Таблица 4. Классификация грузов по эксергетическому показателю**Table 4.** Classification of loads by the exergy indicator

Класс Class	Значение эксергетического показателя The value of the exergy indicator	Группа горючести Flammability group
Э0 — негорючие E0 — nonflammable	$P_e < 0,1$ $P_e < 0.1$	Негорючие Nonflammable
Э1 — с низким значением эксергетического показателя E1 — low value of the exergy indicator	$0,1 \leq P_e < 0,5$ $0.1 \leq P_e < 0.5$	Трудногорючие Low flammable
Э2 — со средним значением эксергетического показателя E2 — medium value of the exergy indicator	$0,5 \leq P_e < 1,0$ $0.5 \leq P_e < 1.0$	Горючие Flammable
Э3 — с высоким значением эксергетического показателя E3 — high value of the exergy indicator	$P_e \geq 1,0$ $P_e \geq 1.0$	

Выводы

Проведя сравнительный анализ применения потенциала горючести и эксергетического показателя для оценки пожарной опасности ОГ на железнодорожном транспорте, следует выделить следующие преимущества последнего:

1) дает возможность преодолеть методологические проблемы при необходимости учета в единой системе технико-экономических, экологических критериев и показателей пожарной опасности;

2) является количественной характеристикой, зависящей не только от параметров системы, но также от параметров окружающей среды и характеристик рассматриваемого процесса;

3) позволяет провести унификацию требований к вредным веществам, содержащимся в сырье, продуктах, полупродуктах и отходах, при их хранении, применении, производстве и опасным грузам с точки зрения их пожарной и экологической опасности, оценить вредное воздействие продуктов их сгорания;

4) является уточняющим параметром при выборе стратегии управления отходами, его использование позволяет, с одной стороны, увеличить объективность оценки пожарной и экологической опасности отходов, с другой — провести сравнительный анализ эксергетической эффективности процессов их переработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Huang W., Shuai B., Zuo B., Xu Y., Antwi E. A systematic railway dangerous goods transportation system risk analysis approach: The 24 model // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2019. Vol. 61. Pp. 94–103. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.05.021
- Ovidi F., van der Vlies V., Kuipers S., Landucci G. HazMat transportation safety assessment: Analysis of a “Viareggio-like” incident in the Netherlands // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2020. Vol. 3. P. 103985. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103985
- Huang W., Zhang Y., Zuo B., Yua Y., De Dieu G.J., Xu Y. Using an expanded Safety Failure Event Network to analyze railway dangerous goods transportation system risk-accident // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2020. Vol. 65. P. 104122. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104122
- Huang W., Liu Y., Zhang Y., Zhang R., Xu M., De Dieu G.J. et al. Fault tree and fuzzy D-S evidential reasoning combined approach: An application in railway dangerous goods transportation system accident analysis // Information Sciences. 2020. Vol. 520. Pp. 117–129. DOI:10.1016/j.ins.2019.12.089
- Huang W., Zhang R., Xu M., Yu Y., Xu Y., De Dieu G.J. Risk state changes analysis of railway dangerous goods transportation system: Based on the cusp catastrophe model // Reliability Engineering & System Safety. 2020. Vol. 202. P. 107059. DOI: 10.1016/j.res.2020.107059
- Бочаров Б.В., Жуков В.И., Стручалин В.Г. Комплексная безопасность на железнодорожном транспорте и метрополитене : монография : в 2 ч. Ч. 2 : Безопасность движения и безопасность в чрезвычайных ситуациях / под ред. В.М. Пономарева, В.И. Жукова. М. : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2015. 494 с.
- Vincent C., Corn S., Longuet C., Aprin L., Rambaud G., Ferry L. Experimental and numerical thermo-mechanical analysis of the influence of thermoplastic slabs installation on the assessment of their fire hazard // Fire Safety Journal. 2019. Vol. 3. P. 102850. DOI: 10.1016/j.fire-saf.2019.102850

8. *Bariha N., Mishra I.M., Srivastava V.C.* Fire and explosion hazard analysis during surface transport of liquefied petroleum gas (LPG): A case study of LPG truck tanker accident in Kannur, Kerala, India // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2016. Vol. 40. Pp. 449–460. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.01.020
9. *Монахов В.Т.* Методы исследования пожарной опасности веществ. 2-е изд., перераб. М. : Химия, 1979. 424 с.
10. *Steen-Hansen A., Storesund K., Sesseng C.* Learning from fire investigations and research — A Norwegian perspective on moving from a reactive to a proactive fire safety management // *Fire Safety Journal*. 2020. Vol. 3. P. 103047. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.103047
11. *Jiao Z., Escobar-Hernandez H.U., Parker T., Wang Q.* Review of recent developments of quantitative structure-property relationship models on fire and explosion-related properties // *Process Safety and Environmental Protection*. 2019. Vol. 129. Pp. 280–290. DOI: 10.1016/j.psep.2019.06.027
12. *Корольченко А.Я.* Проблемы определения горючести веществ // *Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety*. 2015. Т. 24. № 12. С. 6–10. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.12.6-10
13. *Шебеко Ю.Н., Иванов А.В., Ильин А.Б.* О расчете концентраций горючего и флегматизатора в экстремальной точке области воспламенения // *Физика горения и взрыва*. 1981. № 4. С. 33–35.
14. *Guoa F., Hase W., Ozaki Y., Konno Y., Inatsuki M., Nishimura K. et al.* Experimental study on flammability limits of electrolyte solvents in lithium-ion batteries using a wick combustion method // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2019. Vol. 109. P. 109858. DOI: 10.1016/j.exptthermfluidsci.2019.109858
15. *Королева Л.А., Хайдаров А.Г., Ивахнюк Г.К., Коваль Д.Н.* Эксергетический подход к оценке энергоэкологической эффективности и пожарной опасности грузовых перевозок на железнодорожном транспорте // *Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety*. 2018. Т. 27. № 7–8. С. 43–52. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.07-08.43-52
16. *Хайдаров А.Г., Королева Л.А., Ивахнюк Г.К.* Эксергетическая оценка пожарной опасности перевозок на железнодорожном транспорте // *Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety*. 2018. Т. 27. № 10. С. 26–37. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.10.26-37
17. *Khila Z., Baccar I., Jemel I., Houas A., Hajjajia N.* Energetic, exergetic and environmental life cycle assessment analyses as tools for optimization of hydrogen production by autothermal reforming of bioethanol // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016. Vol. 41. Issue 39. Pp. 17723–17739. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.07.225
18. *Bellos E., Tzivanidis C., Tsifis G.* Energetic, Exergetic, Economic and Environmental (4E) analysis of a solar assisted refrigeration system for various operating scenarios // *Energy Conversion and Management*. 2017. Vol. 148. Pp. 1055–1069. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.06.063
19. *Eini S., Shahhossein H., Delgarm N., Lee M., Bahadori A.* Multi-objective optimization of a cascade refrigeration system: Exergetic, economic, environmental, and inherent safety analysis // *Applied Thermal Engineering*. 2016. Vol. 107. Pp. 804–817. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.07.013
20. *Боровков Ю.Н., Воронцова В.М.* Возможности использования эксергетического метода в экологическом менеджменте // *Научный журнал*. 2018. Т. 27. № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vozmozhnosti-ispolzovaniya-eksergeticheskogo-metoda-v-ekologicheskoy-meneditse> (дата обращения: 04.09.2020).
21. *Ghannadzadeh A.* Exergetic balances and analysis in a process simulator: A way to enhance process energy integration. Toulouse : Institut National Polytechnique, 2012. 215 p.
22. *Бродянский В.М., Фратшер В., Михалек К.* Эксергетический метод и его приложения / под ред. В.М. Бродянского. М. : Энергоатомиздат, 1988. 287 с.
23. *Лейтес И.Л., Сосна М.Х., Семенов В.П.* Теория и практика химической энерготехнологии. М. : Химия, 1988. 280 с.
24. Свидетельство о государственной регистрации программы на ЭВМ № 2019610945 РФ. Программный комплекс для проведения эксергетического анализа и оценки пожаро-взрывоопасности веществ, материалов и изделий (ПК эксергетики) / А.Г. Хайдаров, Л.А. Королева : правообл. А.Г. Хайдаров, Л.А. Королева. № 2018665631; заявл. 28.12.2018; опубл. 18.01.2019.
25. *Gundersen T.* The concept of exergy and energy quality. Norway : Norwegian University of Science and Technology Trondheim, 2009. 25 p.

26. Киселев Я.С., Хорошилов О.А., Демехин Ф.В. Физические модели горения в системе пожарной безопасности / под общ. ред. В.С. Артамонова. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2009. 348 с.
27. Корольченко А.Я., Корольченко Д.А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справочник : в 2 ч. 2-е изд., перераб. и доп. Ч. I. М. : Пожнаука, 2004. 713 с.
28. Корольченко А.Я., Корольченко Д.А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справочник : в 2 ч. 2-е изд., перераб. и доп. Ч. II. М. : Пожнаука, 2004. 774 с.
29. Eboh F.C., Ahlström P., Richards T. Estimating the specific chemical exergy of municipal solid waste // *Energy Science & Engineering*. 2016. Vol. 4. Issue 3. Pp. 217–231. DOI: 10.1002/ese3.121
30. Козлов Г.В., Ивахнюк Г.К. Морфологический состав твердых коммунальных отходов по регионам мира в XX и начале XXI века (обзор) // *Известия СПбГТИ (ТУ)*. 2014. № 24 (50). С. 58–66. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21730915>
31. Zhou H., Meng A., Long Y., Li Q., Zhang Y. Classification and comparison of municipal solid waste based on thermochemical characteristics // *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2014. Vol. 64 (5). Pp. 597–616. DOI: 10.1080/10962247.2013.873094

REFERENCES

1. Huang W., Shuai B., Zuo B., Xu Y., Antwi E. A systematic railway dangerous goods transportation system risk analysis approach: The 24 model. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019; 61:94-103. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.05.021
2. Ovidi F., van der Vlies V., Kuipers S., Landucci G. HazMat transportation safety assessment: Analysis of a “Viareggio-like” incident in the Netherlands. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2020; 3:103985. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103985
3. Huang W., Zhang Y., Zuo B., Yua Y., De Dieu G.J., Xu Y. Using an expanded Safety Failure Event Network to analyze railway dangerous goods transportation system risk-accident. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2020; 65:104122. DOI:10.1016/j.jlp.2020.104122
4. Huang W., Liu Y., Zhang Y., Zhang R., Xu M., De Dieu G.J. et al. Fault tree and fuzzy D-S evidential reasoning combined approach: An application in railway dangerous goods transportation system accident analysis. *Information Sciences*. 2020; 520:117-129. DOI:10.1016/j.ins.2019.12.089
5. Huang W., Zhang R., Xu M., Yu Y., Xu Y., De Dieu G.J. Risk state changes analysis of railway dangerous goods transportation system: Based on the cusp catastrophe model. *Reliability Engineering & System Safety*. 2020; 202:107059. DOI: 10.1016/j.res.2020.107059
6. Bocharov B.V., Zhukov V.I., Struchalin V.G. *Complex safety on railway transport and metro : monograph : in 2 part. Part 2. Traffic safety and safety in emergency situations* / Ponomarev V.M., Zhukov V.I. (ed.). Moscow, Training and methodological center for education in railway transport, 2015; 713. (rus).
7. Vincent C., Corn S., Longuet C., Aprin L., Rambaud G., Ferry L. Experimental and numerical thermo-mechanical analysis of the influence of thermoplastic slabs installation on the assessment of their fire hazard. *Fire Safety Journal*. 2019; 3:102850. DOI: 10.1016/j.firesaf.2019.102850
8. Bariha N., Mishra I.M., Srivastava V.C. Fire and explosion hazard analysis during surface transport of liquefied petroleum gas (LPG): A case study of LPG truck tanker accident in Kannur, Kerala, India. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2016; 40:449-460. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.01.020
9. Monakhov V.T. *Methods of investigation of fire hazard of substances*. 2nd ed., rev. Moscow, Chemistry Publ., 1979; 424. (rus).
10. Steen-Hansen A., Storesund K., Sesseng C. Learning from fire investigations and research — A Norwegian perspective on moving from a reactive to a proactive fire safety management. *Fire Safety Journal*. 2020; 3:103047. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.103047
11. Jiao Z., Escobar-Hernandez H.U., Parker T., Wang Q. Review of recent developments of quantitative structure-property relationship models on fire and explosion-related properties. *Process Safety and Environmental Protection*. 2019; 129:280-290. DOI: 10.1016/j.psep.2019.06.027
12. Korolchenko A.Ya. Problems of determination of combustibility of substances. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2015; 24, (12):6-10. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.12.6-10 (rus).
13. Shebeko Yu.N., Ivanov A.V., Ilin A.B. Calculation of fuel and phlegmatizer concentrations at the extreme point of the ignition region. *Physics of combustion and explosion*. 1981; 4:33-35. (rus).

14. Guoa F., Hase W., Ozaki Y., Konno Y., Inatsuki M., Nishimura K. et al. Experimental study on flammability limits of electrolyte solvents in lithium-ion batteries using a wick combustion method. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2019; 109:109858. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2019.109858
15. Koroleva L.A., Khaydarov A.G., Ivakhnyuk G.K., Koval D.N. Exergistic approach to estimation of energy-ecological efficiency and fire hazard of cargo transportation on railway transport. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2018; 27(7-8):43-52. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.07-08.43-52 (rus).
16. Khaydarov A.G., Koroleva L.A., Ivakhnyuk G.K. Exergetic assessment of fire hazards of cargo transportation on railway transport. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2018; 27(10):26-37. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.10.26-37 (rus).
17. Khila Z., Baccar I., Jemel I., Houas A., Hajjajia N. Energetic, exergetic and environmental life cycle assessment analyses as tools for optimization of hydrogen production by autothermal reforming of bioethanol. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016; 41(39):17723-17739. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.07.225
18. Bellos E., Tzivanidis C., Tsifis G. Energetic, Exergetic, Economic and Environmental (4E) analysis of a solar assisted refrigeration system for various operating scenarios. *Energy Conversion and Management*. 2017; 148:1055-1069. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.06.063
19. Eini S., Shahhossein H., Delgarm N., Lee M., Bahadori A. Multi-objective optimization of a cascade refrigeration system: Exergetic, economic, environmental, and inherent safety analysis. *Applied Thermal Engineering*. 2016; 107:804-817. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.07.013
20. Borovkov Yu.N., Voroncova V.M. Possibilities of using the exergetic method in environmental management. *Scientific journal*. 2018; 27(4). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vozmozhnosti-ispolzovaniya-eksergeticheskogo-metoda-v-ekologicheskoy-menedzhmente> (Accessed: September 4, 2020). (rus).
21. Ghannadzadeh A. *Exergetic Balances and Analysis in a Process Simulator: A Way to Enhance Process Energy Integration*. Toulouse, Institut National Polytechnique, 2012; 215.
22. Brodyanskiy V.M., Fratsher V., Mikhalek K. *Exergetic method and its applications* / Brodyanskiy V.M. (ed.). Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988; 287. (rus).
23. Leytes I.L., Sosna M.Kh., Semenov V.P. *Theory and practice of chemical energy technology*. Moscow, Chemistry Publ., 1988; 280. (rus).
24. Certificate of state registration of the computer program No. 2019610945 RU. *Software suit for the exergetic analysis and estimations of the fire and explosive hazards of the substances, materials, and goods (Software suit exergetics)* / A.G. Khaydarov, L.A. Koroleva : right holder A.G. Khaydarov, L.A. Koroleva. No. 2018665631; appl. December 28, 2018; publ. January 18, 2019. (rus).
25. Gundersen T. *The concept of exergy and energy quality*. Norway, Norwegian University of Science and Technology Trondheim, 2009; 25.
26. Kiselev Ya.S., Khoroshilov O.A., Demekhin F.V. *Physical models of Gorenje in the fire safety system* / Artamonov V.S. (ed.). Saint-Petersburg, Polytechnic University publishing, 2009; 348. (rus).
27. Korolchenko A.Ya., Korolchenko D.A. *Fire and explosion hazard of substances and materials and their means of fighting : reference book*. 2nd ed. Part I. Moscow, Pozhnauka Publ., 2004; 713. (rus).
28. Korolchenko A.Ya., Korolchenko D.A. *Fire and explosion hazard of substances and materials and their means of fighting : reference book*. 2nd ed. Part II. Moscow, Pozhnauka Publ., 2004; 774. (rus).
29. Eboh F.C., Ahlström P., Richards T. Estimating the specific chemical exergy of municipal solid waste. *Energy Science & Engineering*, 2016; 4(3):217-231. DOI: 10.1002/ese3.121
30. Kozlov G.V., Ivakhnyuk G.K. Morphological structure of waste composition on world regions in XX and the beginning of the XXI century (review). *Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University)*. 2014; 24(50):58-56. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21730915> (rus).
31. Zhou H., Meng A., Long Y., Li Q., Zhang Y. Classification and comparison of municipal solid waste based on thermochemical characteristics. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2014; 64(5):597-616. DOI: 10.1080/10962247.2013.873094

Поступила 07.12.2020, после доработки 24.12.2020; принята к публикации 30.12.2020
Received December 7, 2020; Received in revised form December 24, 2020; Accepted December 30, 2020

Информация об авторах

КОРОЛЕВА Людмила Анатольевна, канд. техн. наук, доцент, заместитель начальника кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства, Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; РИНЦ ID: 833923; ORCID: 0000-0001-5661-5774; e-mail: lyudamil@mail.ru

ХАЙДАРОВ Андрей Геннадьевич, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры бизнес-информатики, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; РИНЦ ID: 885219; ORCID: 0000-0003-0693-8027; e-mail: andreyhaydarov@gmail.com

ИВАХНЮК Григорий Константинович, д-р хим. наук, профессор, заведующий кафедрой инженерной защиты окружающей среды, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; РИНЦ ID: 521920; ORCID: 0000-0003-2556-303X; e-mail: fireside@inbox.ru

АКТЕРСКИЙ Юрий Евгеньевич, д-р воен. наук, профессор, профессор кафедры пожарной безопасности зданий и автоматизированных систем пожаротушения, Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; РИНЦ ID: 704111; ORCID: 0000-0001-5768-7462; e-mail: akterskij.y@igps.ru

Information about the authors

Lyudmila A. KOROLEVA, Cand. Sci. (Eng.), Docent, Deputy Head of Fire, Rescue Equipment and Automotive Industry Department, Saint-Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Saint Petersburg, Russian Federation; ID RISC: 833923; ORCID: 0000-0001-5661-5774; e-mail: lyudamil@mail.ru

Andrey G. KHAYDAROV, Cand. Sci. (Eng.), Docent, Associate Professor of Department of Business Informatics, Saint-Petersburg State Institute of Technology, Saint Petersburg, Russian Federation; ID RISC: 885219; ORCID: 0000-0003-0693-8027; e-mail: andreyhaydarov@gmail.com

Grigoriy K. IVAKHNYUK, Dr. Sci. (Chem.), Professor, Head of Department of Engineering Protection of Environment, Saint-Petersburg State Institute of Technology, Saint Petersburg, Russian Federation; ID RISC: 521920; ORCID: 0000-0003-2556-303X; e-mail: fireside@inbox.ru

Yuriy E. AKTERSKIY, Dr. Sci. (Military), Professor, Professor of Department of Fire Safety of Buildings and Automated Fire Extinguishing Systems, Saint-Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Saint Petersburg, Russian Federation; ID RISC: 704111; ORCID: 0000-0001-5768-7462; e-mail: akterskij.y@igps.ru