

А. Г. ХАЙДАРОВ, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры бизнес-информатики, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет) (Россия, 190013, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 26; e-mail: andreyhaydarov@gmail.com)

Л. А. КОРОЛЕВА, канд. техн. наук, доцент, заместитель начальника кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149; e-mail: lyudamil@mail.ru)

Г. К. ИВАХНЮК, д-р хим. наук, профессор, заведующий кафедрой инженерной защиты окружающей среды, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет) (Россия, 190013, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 26; e-mail: fireside@inbox.ru)

УДК 614.841

ЭКСЕРГЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ ПЕРЕВОЗОК НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Обоснована возможность применения эксергетического подхода к оценке пожарной опасности перевозок таких опасных грузов, как твердые коммунальные отходы (ТКО), на железнодорожном транспорте. Проведен анализ изменения морфологического состава отходов с 20-х годов XX века по настоящее время. Выполнен расчет химической эксергии и теплоты сгорания ТКО. Выявлены основные тенденции их изменения и представлены зависимости между эксергией и теплотой сгорания ТКО различного морфологического состава. Определены преимущества эксергетического подхода к оценке пожарной опасности при обращении ТКО на железнодорожном транспорте.

Ключевые слова: твердые коммунальные отходы; пожарная опасность; морфологический состав; железнодорожный транспорт; эксергия; высшая теплота сгорания.

DOI: 10.18322/PVB.2018.27.10.26-37

Введение

Обращение с отходами является одной из актуальных проблем современности, без решения которой невозможно обеспечить безопасность людей. Особое внимание уделяется твердым коммунальным отходам (ТКО), количество которых неуклонно возрастает, что связано с увеличением численности и благосостояния населения [1]. Удаление ТКО с урбанизированных территорий как элемент жизнеобеспечения является важной задачей, решение которой создает условия для устойчивого развития.

Бытовые отходы не всегда требовали специального обращения и утилизации. Было время, когда они легко перегнивали и выступали естественным элементом жизненного цикла природной среды. Скачкообразное качественное изменение структуры отходов произошло в конце XIX – начале XX веков, что связано с развитием промышленности, в первую очередь химических производств. Тогда и возникла необходимость утилизации ТКО.

Большое количество нелегальных свалок и приближение официальных полигонов к населенным пунктам приводят к ухудшению экологической обстановки и риску возникновения чрезвычайных ситуаций. Особенно остро проблема вывоза и утилизации ТКО стоит в больших городах [2].

По данным Министерства экологии и природопользования Московской области приблизительно из 60 млн. т ТКО, образующихся в течение года в России, 11,7 млн. т (около 20 %) приходится на столичный регион. В Санкт-Петербурге ежегодно образуется приблизительно 3 млн. т ТКО. Увеличение количества отходов определяет необходимость поиска эффективных путей утилизации и снижения их опасности для человека и окружающей среды.

Действующие мусорные полигоны вокруг столицы и других городов перегружены. На них нередко фиксируются пожары [3]. Так, например, в ноябре 2011 г. вспыхнул пожар на полигоне ТКО на Волхонском шоссе в Ленинградской обл., в июне 2013 г. — на городской свалке в Челябинске, 28 мая 2018 г. — на территории закрытого полигона ТКО “Съяново-1” Серпуховского р-на, 28 июня 2018 г. — на мусорном полигоне “Непейно” в Дмитровском р-не Московской обл.

Для решения проблем, связанных с обращением отходов в крупных городах, прорабатывается проект по вывозу мусора из Москвы и Санкт-Петербурга по железной дороге. Использование железнодорожного транспорта для этих целей имеет ряд преимуществ: точный график перевозок, возможность перевозки больших объемов, возможность применения

© Хайдаров А. Г., Королева Л. А., Ивахнюк Г. К., 2018

универсальных контейнеров, относительно низкая себестоимость.

Наиболее частыми происшествиями, связанными с перевозками опасных грузов железнодорожным транспортом, являются пожары [4].

Цель настоящей работы — обоснование возможности и преимуществ использования эксергетической оценки пожарной опасности перевозок ТКО на железнодорожном транспорте.

Для достижения данной цели были решены следующие задачи:

- проведен анализ и выявлены основные тенденции изменения морфологического состава ТКО с 20-х годов XX века по настоящее время;
- определена область применения эксергетического подхода;
- найдены зависимости между эксергией и высшей теплотой сгорания ТКО.

Теория и расчеты

Классическое определение эксергии как “максимальной работы, которую может совершить система в обратном процессе с окружающей средой в качестве источника даровых тепла и веществ, если в конце этого процесса все участвующие в нем виды материи приходят в состояние термодинамического равновесия со всеми компонентами окружающей среды”, сформулировано Я. Шаргутом и Р. Петелой в работе [5].

Для эффективного проектирования процессов преобразования энергии актуально использование химической эксергии как одного из основных свойств, учитываемых при анализе производительности и оптимизации всего процесса. Это может быть сделано путем количественного определения и оценки изменения эксергии [6]. Расчет данного показателя для топлива является важным этапом при проведении эксергетического анализа [7] в установках для преобразования отходов и энергии.

Наряду с оценкой энергетической эффективности, понятие эксергии применяется для изучения уровня влияния техники и технологий на окружающую среду и определение возможности его минимизации. Любое использование ресурсов и выброс отработанных продуктов оказывают значительное воздействие на природу, которое можно соотнести с количеством содержащейся в них эксергии. В современных исследованиях понятие эксергии связывают с правилом трех “Э”: эффективность, экономичность, экологическая целесообразность [8].

В ряде публикаций рассматриваются возможности эксергетического метода для оценки энерго-экологической эффективности транспортных систем различного масштаба [8–11].

Эксергия может быть применена для оценки пожарной опасности, что позволяет комплексно рас-

сматривать вопросы энергоэкологической эффективности и пожарной опасности грузовых перевозок на железнодорожном транспорте.

Железнодорожный транспорт является одним из основных видов транспорта в Российской Федерации, который характеризуется высокой энергетической эффективностью и экологической чистотой с точки зрения удельных показателей потребления энергии и выбросов загрязняющих веществ на единицу перевозочной работы [8]. В то же время его воздействие на окружающую среду велико. Железнодорожный транспорт потребляет до 7 % добываемого топлива и 6 % всей производимой электроэнергии. Его доля в грузообороте транспортной системы страны составляет 43,2 %, а в пассажирообороте — 25,4 % [4].

Пожары на железнодорожном транспорте возникают из-за неосторожного обращения с огнем, неисправностей локомотивов и подвижного состава, нарушений правил перевозки опасных грузов и по другим причинам и могут иметь катастрофические последствия [12]. Примером является железнодорожная катастрофа в Арзамасе в 1988 г. При транспортировке гексогена произошли пожар и взрыв, в результате чего было разрушено около 150 домов. Жертвами трагедии стали 91 чел., пострадали более 1500. Еще одним примером может служить сход с рельсов поезда с 73 нефтяными цистернами в г. Лак-Мегантик (Канада) в 2013 г. Последствиями возникшего пожара и последующего взрыва явились гибель 47 чел. и уничтожение 40 зданий [4].

При возникновении и тушении пожара ТКО на железнодорожном транспорте может быть нанесен огромный ущерб людям и окружающей среде. При горении отходов выделяются высокотоксичные вещества, такие как оксид углерода, диоксид азота, диоксины, циановодород; существует вероятность взрыва, например, вследствие образования биогаза и возможность возникновения скрытых очагов горения. Пожар может быстро распространиться на большие площади, в частности из-за задержки введения огнетушащих веществ при тушении подвижного состава. Причинами такой задержки могут являться затрудненность подъезда пожарных подразделений к месту пожара, необходимость обесточивания электропитательной сети, выяснение физико-химических свойств грузов. Планирование мероприятий по обращению и тушению пожаров ТКО на железнодорожном транспорте должно основываться на адекватных данных об их составе и свойствах.

Сведения о морфологическом составе ТКО являются наиболее общими, и на их основании возможны оценка и прогноз других показателей [13–15]. Исследования морфологического состава отходов могут быть использованы для расчета эксергии, теп-

Таблица 1. Морфологический состав ТКО г. Москвы / **Table 1.** The morphological composition of Moscow MSW

Фракция Fraction	Содержание фракции, % масс. (по сухому весу), по годам Fraction content, % by mass on a dry weight basis, by years							
	1933	1953	1963	1970	1986	1996	2010	2015
Пищевые отходы / Food waste	20,00	22,20	31,30	36,80	33,10	30,60	18,00	24,70
Бумага и картон / Paper and cardboard	16,50	16,70	16,40	36,40	34,00	37,70	19,70	24,30
Металлы / Metals	1,50	1,30	1,60	3,40	4,80	3,30	1,80	2,00
Стекло / Glass	1,60	1,60	1,40	3,70	4,60	3,70	16,80	11,40
Полимерные материалы / Polymer materials				0,80	1,60		14,20	16,20
Текстиль / Textile	3,30	4,30	1,00	3,40	4,60	5,40	1,60	3,60
Кожа, резина / Leather, rubber			0,60	1,60	2,20	0,50	0,80	0,70
Кости / Bones	2,50	2,30	0,50	1,30	1,10			
Дерево / Wood	7,10	7,00	1,20	2,00	2,40	1,90	0,90	1,70
Камни / Stones	5,00	5,10	6,00	0,90	2,90	0,80	1,00	0,40
Уголь, шлаки / Coal, slag	2,00							
Прочие материалы / Other materials	0,60			3,40	0,80	5,40	2,70	5,20
Отсев крупный (15 мм) / Screening large (15 mm)	23,50	39,00	40,00	6,30	7,90	1,40	10,40	4,70
Отсев мелкий (3 мм) / Screening small (3 mm)	17,00					9,70		
Гигиенические средства / Disinfectant								2,60
Композиционная упаковка / Composite pack							12,10	2,50
Итого / Total	100,6	99,50	100,00	100,00	100,0	100,4	100,0	100,0

лоты сгорания, оценки эффективности процессов утилизации и пожарной опасности.

Морфологический состав ТКО Москвы и Санкт-Петербурга (Ленинграда) по данным [14, 16, 17] представлен в табл. 1 и 2.

Первые достоверные сведения о составе ТКО в России и за рубежом относятся к началу 20-х годов

XX века. Более половины массы городского мусора составляли отсев, уголь, зола, шлак. Общей характерной чертой отходов являлось низкое содержание бумаги и пищевых отходов. Разница в составе отходов по различным городам свидетельствует о более высоком уровне жизни и о лучшем продовольственном снабжении жителей столицы.

Таблица 2. Морфологический состав ТКО г. Санкт-Петербурга (Ленинграда)

Table 2. The morphological composition of the MSW of St. Petersburg (Leningrad)

Фракция Fraction	Содержание фракции, % масс. (по сухому весу), по годам Fraction content, % by mass on a dry weight basis, by years								
	1933	1953	1963	1970	1986	1996	2006	2010	2015
Пищевые отходы / Food waste	14,00	18,20	31,70	28,10	23,30	37,00	27,00	25,60	27,40
Бумага и картон / Paper and cardboard	9,00	13,20	24,30	30,00	22,50	19,90	21,00	20,10	21,50
Металлы / Metals	0,80	4,90	5,20	4,70	3,00	4,40	4,00	3,70	4,60
Стекло / Glass	2,60	5,10	8,80	7,40	6,80	8,50	10,00	7,90	8,90
Полимерные материалы / Polymer materials			1,00	0,80		6,10	12,00	17,60	15,20
Текстиль / Textile	4,30	4,40	3,50	4,40	7,70	2,80	3,50	3,00	2,30
Кожа, резина / Leather, rubber	0,50	0,80	1,30	1,60	4,20	4,80	1,80	2,00	2,00
Кости / Bones	2,20	4,10	3,70	2,10	2,30	0,80	0,40		
Дерево, садово-парковые отходы / Wood, park and garden waste	8,20	4,40	2,00	3,90	5,20	1,70	5,00		2,50
Инертные материалы / Inert materials									12,80
Уголь / Coal	1,70	0,30							
Камни / Stones	11,00	6,90	1,80	2,20	3,60	2,90	2,30		
Прочие материалы / Other materials		1,60	1,30	3,00	5,30	1,40	3,00	7,40	2,80
Отсев крупный (15 мм) / Screening large (15 mm)					12,40				
Отсев мелкий (3 мм) / Screening small (3 mm)	38,50	36,50	15,40	11,80	3,70	10,10	10,00	12,70	
Итого / Total	92,80	100,4	100,0	100,0	100,0	100,4	100,0	100,0	100,0

В 30-годы из состава московских ТКО исчезает фракция “уголь и шлак”, доля которой по регионам СССР составляет 17 %, а в США достигает 43 % [14]. Это объясняется разницей в подходах к отоплению, централизация которого способствует снижению объема данной фракции.

Данные по отходам за 40-е годы прошлого столетия отсутствуют, поскольку исследования не проводились по обстоятельствам военного времени. Можно лишь констатировать, что для бытовых отходов этого периода было характерно минимальное содержание фракций пищевых отбросов и костей, высокое содержание золы (децентрализация отопления), уменьшение количества бумаги, рост отсева.

Первые послевоенные систематические сведения о составе ТКО относятся к началу 50-х годов. Исследования показали, что его изменение имеет тенденции, аналогичные тенденциям 30-х годов, как в СССР, так и за рубежом. Исследуя состав отходов 50-х годов, можно сделать вывод о преодолении последствий Второй мировой войны, однако, как и в 30-е годы, разница уровня жизни в столице и в провинции остается весьма существенной. Данные не отличаются точностью, суммарное содержание фракций в сумме не дает 100 %.

В 70-е годы в СССР и за рубежом основной тенденцией является увеличение доли полимерных отходов. В составе ТКО в городах СССР сокращается доля отсева и полностью исчезает фракция “уголь и шлак” вследствие окончательной централизации отопления и газификации регионов. Доля пищевых отходов остается на прежнем уровне.

Результаты проведенных в 70-е годы исследований оказались настолько информативны и точны, что в 80-е годы исследования практически не проводились. В составе отходов появляется электронный лом, однако обращение этой группы отходов сразу выделилось в отдельную отрасль, что обусловлено, во-первых, наличием драгоценных металлов в составе электронных деталей, а во-вторых, опасностью электронного лома для окружающей среды. Критерием социально-экономической ситуации в стране теперь является доля полимеров, упаковки и бумаги, а не содержание пищевых отходов.

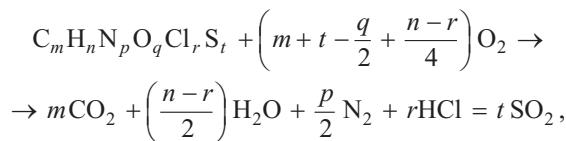
Первые данные 90-х годов по России относятся ко второй половине десятилетия. Из них четко видно падение уровня потребления в России: доля упаковочных материалов уменьшилась несмотря на доступность товаров.

В настоящее время наблюдается ряд тенденций, которые следует учитывать при долгосрочном прогнозировании состава ТКО. Происходит исчезновение металлов, что связано со снижением металлоемкости продукции и извлечением данной фракции на стадии контейнерной площадки. Развитие сете-

вых супермаркетов ведет к тому, что значительная часть продуктов питания выбрасывается в упаковке. В дальнейшем ожидается рост доли пищевых отходов с увеличением доходов населения и развитием сетевых супермаркетов, увеличение количества полимеров, упаковки и текстиля.

Используя данные по морфологическому составу, мы провели расчет эксергии ТКО — сложной гетерогенной смеси органических и неорганических веществ. Органическими элементами являются главным образом C, H, O, N, S и Cl, неорганическими — Si, Ca, K, P, Al, Mg, Fe, S, Na, Zn, Cu, Mn и Cr. Для твердого топлива влиянием неорганических веществ на значение эксергии можно пренебречь в силу их относительно небольшого содержания [7, 18].

В расчетах исходили из предположения, что 1 кг ТКО, выраженного как $C_mH_nN_pO_qC_rS_t$, подвергается полному сгоранию в стандартном состоянии до получения диоксида углерода, воды, азота, хлористого водорода и диоксида серы по реакции:



где m, n, p, q, r, t — количество атомов соответственно углерода, водорода, азота, кислорода, хлора и серы.

Все вещества находятся при температуре окружающей среды $T_0 = 298,15$ К и давлении $P_0 = 101,325$ кПа.

Для расчета химической эксергии была использована методика, предложенная в работе [19]. Химическая эксергия e (кДж/кг) различных фракций ТКО была рассчитана по формулам:

- для пластика e_P :

$$e_P = 376,870 C + 787,351 H - 58,654 O + 46,398 N - 1533,261 S + 100,981 Cl; \quad (1)$$

- для текстиля и резины e_{TR} :

$$e_{TR} = 376,580 C + 790,869 H - 58,475 O + 44,639 N - 1538,180 S + 98,566 Cl; \quad (2)$$

- для дерева и бумаги e_{WP} :

$$e_{WP} = 374,642 C + 806,343 H - 57,074 O + 48,693 N - 1533,261 S + 101,425 Cl; \quad (3)$$

- для пищевых отходов e_F :

$$e_F = 377,535 C + 785,711 H - 58,446 O + 45,682 N - 1536,242 S + 103,486 Cl; \quad (4)$$

где C, H, O, N, S, Cl — содержание атомов углерода, водорода, кислорода, азота, серы и хлора в каждой фракции ТКО, %, определенное по [19].

Энергетическое использование ТКО в настоящее время в экономически развитых странах рассматривается как один из наиболее эффективных в экономическом отношении путей их утилизации [16, 20]. ТКО образуются там, где тепловая и электрическая энергии наиболее востребованы, т. е. в крупных городах, и имеют гарантированное предсказуемое возобновление [21].

На сегодняшний день в России функционирует около 40 мусоросжигательных заводов [22], на которых утилизируется приблизительно 2,4 % ТКО. Такая переработка сопровождается загрязнением атмосферного воздуха, например, оксидами азота, диоксинами, нафтилинами, ароматическими углеводородами, тяжелыми металлами, негативно влияющими на здоровье населения и состояние окружающей среды. Происходит образование золы и шлака — отходов повышенного класса опасности, возникает проблема их утилизации. Высокая стоимость и негативное отношение населения к строительству мусоросжигательных заводов также ограничивают использование рассматриваемого способа утилизации отходов.

В настоящее время энергетический потенциал горючих веществ оценивается величиной теплоты сгорания, которая может быть определена экспериментально и расчетными методами [19, 23–25]. С одной стороны, твердые бытовые отходы — это топливо, сопоставимое по теплоте сгорания с торфом и некоторыми марками бурых углей, а с другой — им присущи пожароопасные свойства, что должно быть учтено при их утилизации и перевозке железнодорожным транспортом.

Отдельные исследования посвящены выявлению связи между теплотой сгорания и эксергией, например, для угля [26], пластмассовых отходов [27]. Удельная теплота сгорания включена в перечень показателей, необходимых для оценки пожарной опасности веществ и материалов [28]. Ее значения используют при расчете пожарной нагрузки и категорировании помещений по взрывопожарной и пожарной опасности. Вследствие происходящих изменений морфологического состава ТКО и различий в составе отходов по городам экспериментальное определение теплоты сгорания представляет определенные трудности, поэтому целесообразно использовать расчетные методы ее определения.

Высшая теплота сгорания Q_b (МДж/кг) была рассчитана по формуле, предложенной в [19]:

$$Q_b = 0,364C + 0,863H - 0,075O + 0,028N - 1,633S + 0,062Cl, \quad (5)$$

где $35,8\% \leq C \leq 86,1\%$; $4,1\% \leq H \leq 13,9\%$;

$0\% \leq O \leq 59,9\%$; $0\% \leq N \leq 20,3\%$;

$0\% \leq S \leq 2,7\%$; $0\% \leq Cl \leq 56,1\%$.

Тогда $13,0 \text{ МДж/кг} \leq Q_b \leq 43,2 \text{ МДж/кг}$.

Результаты и их обсуждение

Изменения морфологического состава отходов, произошедшие за рассматриваемый период, привели к изменениям технологически важных свойств ТКО.

По формулам (1)–(4) нами была рассчитана эксергия веществ и материалов, входящих в состав ТКО. Пример исходных данных по составу фракций бумажных отходов и полимеров и результаты расчета эксергии приведены в табл. 3.

На основе данных по содержанию различных фракций в составе ТКО по городам России в различные периоды времени, приведенных в работах [14, 16, 17], были рассчитаны значения химической эксергии. Результаты представлены на рис. 1–3.

Эксергия отходов на протяжении рассмотренного нами периода растет. Наибольшими значениями обладают полимерные материалы, количество которых неуклонно увеличивается. Большой вклад в величину эксергии вносят пищевые отходы, бумага и картон, что определяется их количеством. Фракцию металлов, обладающих низким значением рассматриваемого показателя, при расчетах можно не учитывать.

По формуле (5) определена высшая теплота сгорания веществ и материалов, входящих в состав ТКО. Получена прямая пропорциональная зависимость между эксергией и высшей теплотой сгорания компонентов ТКО, коэффициент корреляции $R^2 = 0,972$ (рис. 4):

$$Q_b = 1,1559e - 4,0631.$$

Наибольшие значения теплоты сгорания в диапазоне от 20,32 МДж/кг для поливинилхлорида до 43,35 МДж/кг для полиэтилена получены для различных видов пластмассовых отходов. Далее по убыванию показателя: отходы резины (34,83 МДж/кг), текстиль (19,34–38,08 МДж/кг), древесные отходы (17,35–21,29 МДж/кг), бумага (16,89–19,53 МДж/кг) и пищевые отходы (16,18–27,92 МДж/кг).

С учетом процентного содержания фракций вычислена высшая теплота сгорания ТКО различного морфологического состава. В табл. 4 приведены данные расчетов эксергии и высшей теплоты сгорания по городам России в различные периоды времени. Построена зависимость между эксергией ТКО и высшей теплотой сгорания, коэффициент корреляции $R^2 = 0,977$ (рис. 5). Высшая теплота сгорания увеличивается прямо пропорционально росту эксергии:

$$Q_b = 0,8892e + 0,4257.$$

За рассматриваемый период минимальные значения $e = 4,47 \text{ МДж/кг}$, $Q_b = 4,25 \text{ МДж/кг}$ получены для г. Днепропетровска (1933 г.). Максимальные показатели зафиксированы в г. Москве: $e = 19,14 \text{ МДж/кг}$ (2015 г.), $Q_b = 17,44 \text{ МДж/кг}$ (2010 г.). Это более чем в 5 раз выше минимального значения теплоты сгорания, при котором вещества и материалы могут сгореть.

Таблица 3. Исходные данные по составу фракций и результаты расчета эксергии бумажных отходов и пластмасс
Table 3. Initial values and results of calculating exergy of paper waste and plastics

Фракция Fraction	Состав фракции Composition of fraction	Содержание, % / Content, %						Эксергия, кДж/кг Exergy, kJ/kg
		C	H	O	N	S	Cl	
Бумажные отходы Paper waste	Бумажные бланки / Blank printing paper	45,12	5,31	48,91	0,38	0,28		17983,2
	Оберточная бумага и салфетки / Wrapping paper and napkins	45,18	6,13	48,32	0,25	0,11		18954,9
	Газеты / Newspapers	48,01	5,71	45,86	0,33	0,09		19851,4
	Журналы / Magazines	41,04	8,99	49,15	0,42	0,4		19226,3
	Писчая бумага / Writing paper	43,66	5,84	50,16	0,16	0,18		17934,9
	Картон / Cardboard	46,09	5,36	48,02	0,32	0,21		18542,2
	Картонная коробка / Cardboard box	48,97	6,14	44,52	0,21	0,16		20521,1
	Печатная бумага / Printing paper	47,51	5,98	46,25	0,14	0,03	0,09	19951,4
	Упаковочная бумага / Packaging paper	46,92	5,92	46,74	0,22	0,09	0,1	19567,0
Пластмассы Plastic waste	Полистирол / PS	86,06	6,27	1,93	5,73			37523,6
	Полиэтилен высокого давления / Low density polyethylene (LDPE)	85,98	11,2	2,61	0,21			41079,0
	Полиэтилен низкого давления / High density polyethylene (HDPE)	85,35	12,7	1,9	0,05	0,14		41842,2
	Поливинилхлорид / PVC	38,34	4,47		0,23	0,61	56,35	22734,7
	Полиэтилентетрафталат / PET	63,01	4,27	32,69	0,04			25193,6
	Полиэтилен / PE	85,45	14,32		0,16	0,07		43379,3
	Полипропилен / PP	85,41	12,51	1,85	0,23			41941,2
	Пластиковая упаковка / Plastic box	75,75	9,78	12	0,35	0,03	2,08	35725,3
	Другие пластмассы / Other plastic	84,9	9,63	0,97	3,35	0,03	1,11	39743,8

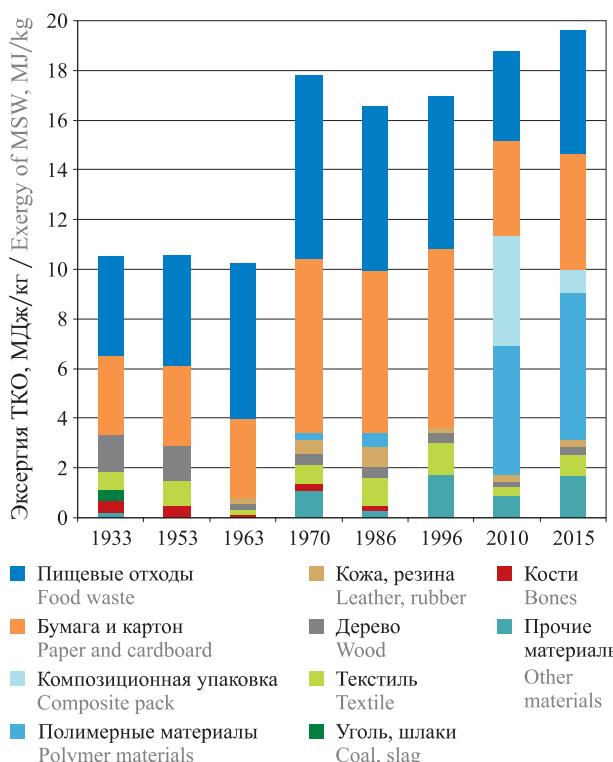


Рис. 1. Эксергия ТКО для г. Москвы
Fig. 1. Exergy of MSW for Moscow

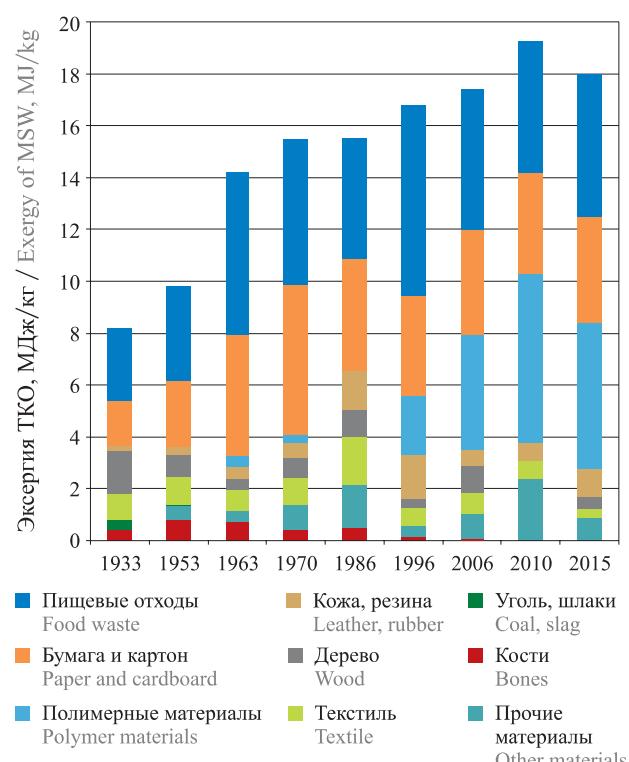


Рис. 2. Эксергия ТКО для г. Санкт-Петербурга (Ленинграда)
Fig. 2. Exergy of MSW for Saint Petersburg (Leningrad)

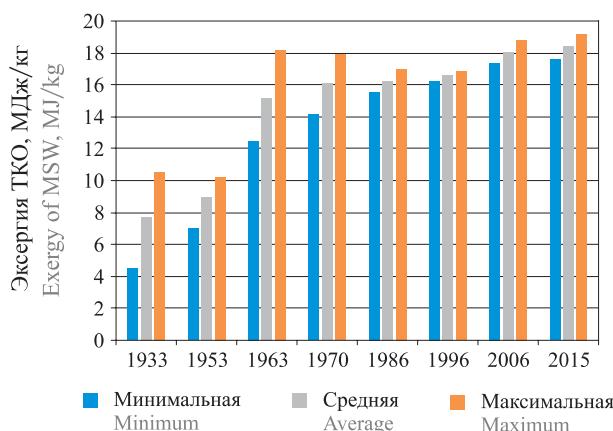


Рис. 3. Изменение минимальной, средней и максимальной эксергии ТКО по России

Fig. 3. Changes in the minimum, average and maximum exergy of MSW in Russia

рать без дополнительного топлива. По данным [12] эта величина составляет примерно 3,35 МДж/кг.

Отходы г. Москвы и г. Санкт-Петербурга имеют высокую пожарную опасность, что необходимо учитывать при их перевозке и дальнейшей утилизации.

В ряде случаев необходимы данные по низкой теплоте сгорания, которая может быть рассчитана уменьшением высшей теплоты сгорания Q_b на теплоту, затраченную на испарение влаги, содержащейся в топливе, и влаги, образующейся от сгорания водорода.

Полученные данные показывают, что ТКО в Москве и Санкт-Петербурге имеют высокие значения эксергии и прогнозируется ее дальнейший рост. Сжигание отходов с получением энергии в крупных городах ограничивается мощностью имеющихся заводов, высокой стоимостью их строительства, возникающими при сжигании экологическими проблемами и мнением общественности. Решением вопроса накопления отходов может стать вывоз мусора из городов железнодорожным транспортом для утилизации их на удаленных полигонах, мусоросжигательных и мусороперерабатывающих заводах.

При транспортировании ТКО различного морфологического состава железнодорожным транспортом необходимо предусмотреть дифференцированные требования к погрузоразгрузочным работам, маркировке, обеспечению экологической и пожарной безопасности.

Учет показателей пожарной опасности через эксергию при назначении класса опасности ТКО и классификации опасных грузов способствует повышению безопасности перевозок на железнодорожном транспорте.

Преимущества эксергетической оценки заключаются в возможности анализа термодинамической эффективности предлагаемых решений, выявления связи термодинамических характеристик с технико-

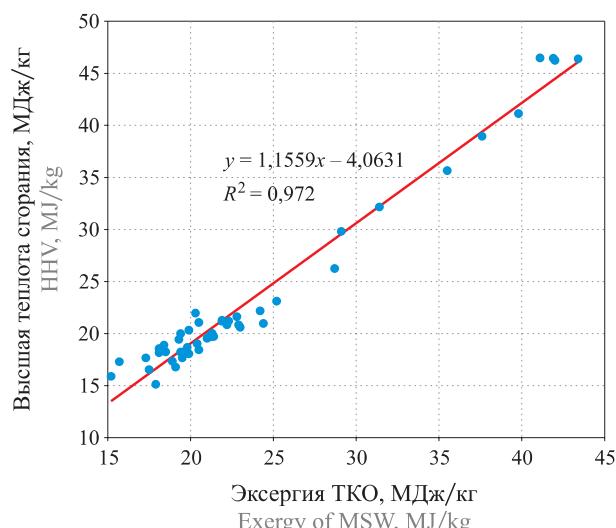


Рис. 4. Зависимость высшей теплоты сгорания компонентов (фракций) ТКО Q_b от эксергии e

Fig. 4. The dependence between values of HHV of the components of MSW Q_b and exergy e

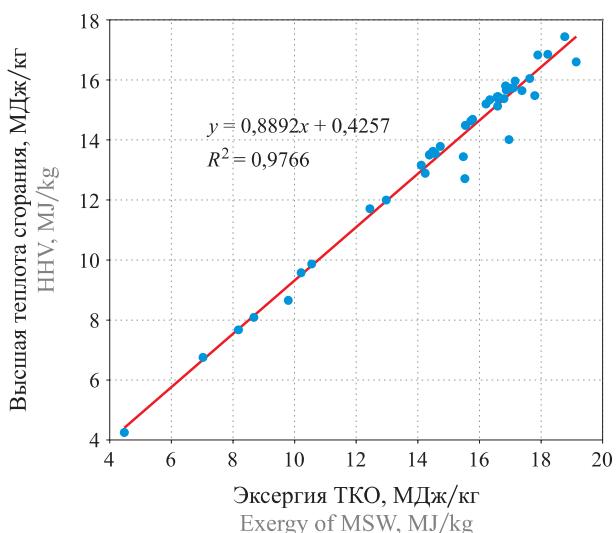


Рис. 5. Зависимость высшей теплоты сгорания Q_b от эксергии e для ТКО различного морфологического состава

Fig. 5. The dependence between HHV and exergy of MSW for different morphological composition

экономическими, экологическими показателями и проведения оценки пожаровзрывоопасности ТКО, обращающихся на железнодорожном транспорте.

Заключение

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Количество ТКО неуклонно возрастает, изменяется их морфологический состав, что связано с ростом численности и благосостояния населения. Увеличивается доля полимеров, пищевых отходов, бумаги, картона и текстиля в общем количестве ТКО.

2. Изменения морфологического состава отходов за рассматриваемый период привели к изменениям

Таблица 4. Высшая теплота сгорания и химическая эксергия ТКО различного морфологического состава по городам России в разные годы**Table 4.** HHV and chemical exergy of MSW of different morphological composition in the cities of Russia in different years

№ п/п No.	Город City	Год Year	e , МДж/кг e MJ/kg	Q_b , МДж/кг HHV, MJ/kg
1	Днепропетровск Dnepropetrovsk	1933	4,47	4,25
2	Москва Moscow		10,56	9,87
3	Ленинград Leningrad		8,18	7,68
4	Киев Kiev	1953	8,68	8,09
5	Москва Moscow		10,21	9,58
6	Ростов-на-Дону Rostov-on-Don		7,03	6,75
7	Санкт-Петербург Saint Petersburg		9,80	8,66
8	Владивосток Vladivostok	1963	14,38	13,50
9	Волгоград Volgograd		15,55	14,49
10	Воронеж Voronezh		14,49	13,62
11	Горький Gorkiy		15,72	14,63
12	Москва Moscow		17,80	15,48
13	Московская обл. Moscow Region		16,87	15,66
14	Ростов-на-Дону Rostov-on-Don		12,44	11,71
15	Рязань Ryazan		18,22	16,85
16	Свердловск Sverdlovsk		14,57	13,54
17	Санкт-Петербург Saint Petersburg		14,24	12,89
18	Уфа Ufa		12,98	12,00
19	Астрахань Astrakhan	1970	17,16	15,96
20	Владивосток Vladivostok		14,38	13,50
21	Волгоград Volgograd		15,55	14,49
22	Горький Gorkiy		15,78	14,69
23	Кисловодск Kislovodsk		17,89	16,83
24	Куйбышев Kuybyshev		16,98	15,72

Окончание табл. 4 / End table 4

№ п/п No.	Город City	Год Year	e , МДж/кг e MJ/kg	Q_b , МДж/кг HHV, MJ/kg
25	Магадан Magadan	1970	14,11	13,16
26	Москва Moscow		16,59	15,13
27	Пятигорск Pyatigorsk		16,58	15,43
28	Ростов-на-Дону Rostov-on-Don		16,34	15,34
29	Саратов Saratov		16,61	15,44
30	Свердловск Sverdlovsk		16,58	15,40
31	Санкт-Петербург Saint Petersburg		15,48	13,44
32	Тольятти Tolyatti		14,73	13,78
33	Уфа Ufa		17,10	15,73
34	Москва Moscow	1986	16,96	14,01
35	Санкт-Петербург Saint Petersburg		15,53	12,71
36	Ижевск Izhevsk	1996	16,85	15,80
37	Калуга Kaluga		16,21	15,20
38	Санкт-Петербург Saint Petersburg		16,79	15,37
39	Москва Moscow	2006	18,77	17,44
40	Санкт-Петербург Saint Petersburg		17,38	15,64
41	Москва Moscow	2015	19,14	16,60
42	Санкт-Петербург Saint Petersburg		17,63	16,04

технологически важных свойств ТКО. Общие тенденции современности — увеличение эксергии и теплоты сгорания.

3. С увеличением эксергии и теплоты сгорания ТКО возрастает их пожарная опасность.

4. Решением проблемы накопления отходов может стать вывоз мусора из городов железнодорожным транспортом для утилизации вдали от них.

5. Эксергетический подход позволяет комплексно рассматривать вопросы энергоэкологической эффективности и пожарной опасности процессов обращения отходов на железнодорожном транспорте.

6. Учет показателей пожарной опасности через экс-сергию добавит процедуру определения класса опасности ТКО объективности в плане назначения более высокого класса в целях обеспечения безопасности.

7. Универсальность и возможность преодоления методологических проблем при необходимости учета различных показателей в единой системе определяют преимущества эксгергетического подхода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вахитов Ю. Ф., Шамсутдинова Л. Р., Зверева Т. И., Акбалина З. Ф., Белан Л. Н. Изучение изменения морфологического состава твердых бытовых отходов в мегаполисе г. Уфе // Вестник Российской университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. — 2012. — № 4. — С. 63–69.
2. Di Foggia G., Beccarello M. Improving efficiency in the MSW collection and disposal service combining price cap and yardstick regulation: The Italian case // Waste Management. — 2018. — Vol. 79. — P. 223–231. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.07.040.
3. Алешина Т. А. Причины возгораний на свалках ТБО // Вестник МГСУ. — 2014. — № 1. — С. 119–124. DOI: 10.22227/1997-0935.2014.1.119-124.
4. Либерман Б. А., Хмелев А. С. Экологические проблемы транспортировки опасных грузов по железным дорогам России // Современные проблемы транспортного комплекса России. — 2016. — Т. 6, № 1. — С. 51–54. DOI: 10.18503/2222-9396-2016-6-1-51-54.
5. Шаргут Я., Пемела Р. Эксергия / Пер. спольск. — М. : Энергия, 1968. — 280 с.
6. Szargut J., Morris D. R., Steward F. R. Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes. — New York : Hemisphere Publishing Corporation, 1988. — 332 р.
7. Song G., Shen L., Xiao J. Estimating specific chemical exergy of biomass from basic analysis data // Industrial & Engineering Chemistry Research. — 2011. — Vol. 50, Issue 16. — P. 9758–9766. DOI: 10.1021/ie200534n.
8. Попов В. Г., Боровков Ю. Н., Сухов Ф. И. Оценка энерго-экологической эффективности // Мир транспорта. — 2012. — Т. 10, № 3. — С. 96–101.
9. Motasemi F., Afzal M. T., Salema A. A., Moghavvemi M., Shekarchian M., Zarifi F., Mohsin R. Energy and exergy utilization efficiencies and emission performance of Canadian transportation sector, 1990–2035 // Energy. — 2014. — Vol. 64. — P. 355–366. DOI: 10.1016/j.energy.2013.09.064.
10. Zarifi F., Mahlia T. M. I., Motasemi F., Shekarchian M., Moghavvemi M. Current and future energy and exergy efficiencies in the Iran's transportation sector // Energy Conversion and Management. — 2013. — Vol. 74. — P. 24–34. DOI: 10.1016/j.enconman.2013.04.041.
11. Seckin C., Sciubba E., Bayulkem A. R. Extended exergy analysis of Turkish transportation sector // Journal of Cleaner Production. — 2013. — Vol. 47. — P. 422–436. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.07.008.
12. Анализ состояния пожарной безопасности на объектах и подвижном составе ОАО “РЖД” в 2017 году. — М. : ОАО “РЖД”, 2017. — 18 с.
13. Makarichi L., Techato K.-A., Jutidamrongphan W. Material flow analysis as a support tool for multi-criteria analysis in solid waste management decision-making // Resources, Conservation and Recycling. — 2018. — Vol. 139. — P. 351–365. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.07.024.
14. 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.
15. Moody C. M., Townsend T. G. A comparison of landfill leachates based on waste composition // Waste Management. — 2017. — Vol. 63. — P. 267–274. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.09.020.
16. Арзамасова З. А., Александровская З. И., Гуляев Н. Ф., Кирпичников А. А., Крхамбаров Я. Н., Кузьменкова А. М., Шапиро М. А. Санитарная очистка городов (сбор, удаление, обезвреживание и использование твердых отбросов) / Под ред. Н. Ф. Гуляева. — М. : Стройиздат, 1966. — 220 с.
17. Владимиров Я. А., Зысин Л. В. Методические вопросы энергетического использования твердых коммунальных отходов и продуктов их газификации // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. — 2018. — Т. 24, № 1. — С. 5–16. DOI: 10.18721/JEST.240101.
18. Song G., Xiao J., Zhao H., Shen L. A unified correlation for estimating specific chemical exergy of solid and liquid fuels // Energy. — 2012. — Vol. 40, Issue 1. — P. 164–173. DOI: 10.1016/j.energy.2012.02.016.
19. Eboh F. C., Ahlström P., Richards T. Estimating the specific chemical exergy of municipal solid waste // Energy Science & Engineering — 2016. — Vol. 4, Issue 3. — P. 217–231. DOI: 10.1002/ese3.121.

20. Wang Y., Zhang X., Liao W., Wu J., Yang X., Shui W., Deng S., Zhang Y., Lin L., Xiao Y., Yu X., Peng H. Investigating impact of waste reuse on the sustainability of municipal solid waste (MSW) incineration industry using energy approach: A case study from Sichuan province, China // Waste Management. — 2018. — Vol. 77. — P. 252–267. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.04.003.
21. Sun L., Fujii M., Tasaki T., Dong H., Ohnishi S. Improving waste to energy rate by promoting an integrated municipal solid-waste management system // Resources, Conservation and Recycling. — 2018. — Vol. 136. — P. 289–296. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.05.005.
22. Алексашина В. В. Экология города. Мусоросжигательные заводы // Academia. Архитектура и строительство. — 2014. — № 4. — С. 77–86. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologiya-goroda-musoroszhigatelnye-zavody> (дата обращения: 30.08.2018).
23. Han J., Yao X., Zhan Y., Oh S.-Y., Kim L.-H., Kim H.-J. A method for estimating higher heating value of biomass-plastic fuel // Journal of the Energy Institute. — 2017. — Vol. 90, Issue 2. — P. 331–335. DOI: 10.1016/j.joei.2016.01.001.
24. Boumanchar I., Chhiti Y., M'hamdi Alaoui F. E., El Ouinani A., Sahibed-Dine A., Bentiss F., Jama C., Bensitel M. Effect of materials mixture on the higher heating value: Case of biomass, biochar and municipal solid waste // Waste Management. — 2017. — Vol. 61. — P. 78–86. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.11.012.
25. Shi H., Mahinpey N., Aqsha A., Silbermann R. Characterization, thermochemical conversion studies, and heating value modeling of municipal solid waste // Waste Management. — 2016. — Vol. 48. — P. 34–47. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.09.036.
26. Zhang Y., Wang Q., Li B., Li H., Zhao W. Is there a general relationship between the exergy and HHV for rice residues? // Renewable Energy. — 2018. — Vol. 117. — P. 37–45. DOI: 10.1016/j.renene.2017.10.022.
27. Huang Y. W., Chen M. Q., Li Q. H., Xing W. A critical evaluation on chemical exergy and its correlation with high heating value for single and multi-component typical plastic wastes // Energy. — 2018. — Vol. 156. — P. 548–554. DOI: 10.1016/j.energy.2018.05.116.
28. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федер. закон РФ от 22.07.2008 № 123-ФЗ (в ред. от 29.07.2017). URL: www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_78699/ (дата обращения: 21.08.2018).

Материал поступил в редакцию 12 сентября 2018 г.

Для цитирования: 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.

English

EXERGETIC ASSESSMENT OF FIRE HAZARDS OF CARGO TRANSPORTATION ON RAILWAY TRANSPORT

A. G. KHAYDAROV, Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor of Department of Business Informatics, Saint Petersburg State Technology Institute (Technical University) (Moskovskiy Avenue, 26, Saint Petersburg, 190013, Russian Federation; e-mail: andreyhaydarov@gmail.com)

L. A. KOROLEVA, Candidate of Technical Sciences, Docent, Deputy Head of Fire, Rescue Equipment and Automotive Industry Department, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail: lyudamil@mail.ru)

G. K. IVAKHNYUK, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Head of Department of Engineering Protection of Environment, Saint Petersburg State Technology Institute (Technical University) (Moskovskiy Avenue, 26, Saint Petersburg, 190013, Russian Federation; e-mail: fireside@inbox.ru)

ABSTRACT

Introduction. The management of municipal solid waste (MSW) is one of the important problems of our time. Security is only possible when solving this problem.

The amount of MSW is steadily increasing. The project of garbage transportation from Moscow and St. Petersburg by railway is begins to have results to solve problems related to waste management.

The purpose of this work is to substantiate the possibility and advantages of using the exergy fire risk assessment of transportation of MSW in railway transport.

Theory and calculations. The concept of chemical exergy is used to effectively design energy conversion processes, study the level of environmental impact of equipment and technologies, and determine the possibility of minimizing it.

The exergy method can be applied to the assessment of energy-ecological efficiency and the fire hazard of the transport of dangerous waste by train.

Analysis of changes in the morphological composition of the waste was implemented from the 20^s of XX century to the present. Formulas for calculating chemical exergy and HHV of MSW were presented.

Results and discussion. The values of chemical exergy and HHV of MSW are determined. An increase in the values of these indicators was acknowledged, which is determined by changes in the morphological composition of the waste.

The dependence between exergy and HHV for the components of MSW was obtained, the correlation coefficient is $R^2 = 0.975$. The dependence between the exergy of TCR of different morphological composition and the HHV, $R^2 = 0.977$, was built. As a result, an analysis of changes in these characteristics was proven by years and the determinated by cities in Russia.

It was proposed to introduce the concept of "exergy" in the procedure for determining the hazard class of MSW. The advantages of the exergy assessment of the fire danger of traffic on the railway transport are revealed.

Conclusion. The exergy approach allows to comprehensively address the issues of energy-ecological efficiency and fire hazard of waste management processes in railway transport. Accounting for indicators of fire hazard through exergy when assigning the hazard class MSW contributes to improving the safety of traffic on the railway transport.

Keywords: municipal solid waste; fire hazard; morphological composition; railway transport; exergy; higher heat value.

REFERENCES

1. Vakhitov Yu. F., Shamsutdinova L. R., Zvereva T. I., Akbalina Z. F., Belan L. N. The study of the morphological changes in the composition of solid waste in the city Ufa. *Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Ekologiya i bezopasnost zhiznedeyatelnosti / RUDN Journal of Ecology and Life Safety*, 2012, no. 4, pp. 63–69 (in Russian).
2. Di Foggia G., Beccarello M. Improving efficiency in the MSW collection and disposal service combining price cap and yardstick regulation: The Italian case. *Waste Management*, 2018, vol. 79, pp. 223–231. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.07.040.
3. Aleshina T. A. The aspects of fire safety at landfills. *Vestnik MGSU/Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*, 2014, no. 1, pp. 119–124 (in Russian). DOI: 10.22227/1997-0935.2014.1.119-124.
4. Liberman B. A., Khmelev A. S. Ecological problems of dangerous goods' shipping by the Russian railways. *Sovremennyye problemy transportnogo kompleksa Rossii / Modern Problems of Russian Transport Complex*, 2016, vol. 6, no. 1, pp. 51–54 (in Russian). DOI: 10.18503/2222-9396-2016-6-1-51-54.
5. Szargut J., Petela R. *Eksergiya [Exergy]*. Moscow, Energiya Publ., 1968. 280 p. (in Russian).
6. Szargut J., Morris D. R., Steward F. R. Exergy analysis of thermal, chemical and metallurgical processes. New York, Hemisphere Publishing Corporation, 1988. 332 p.
7. Song G., Shen L., Xiao J. Estimating specific chemical exergy of biomass from basic analysis data. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2011, vol. 50, issue 16, pp. 9758–9766. DOI: 10.1021/ie200534n.
8. Popov V. G., Borovkov Yu. N., Sukhov F. I. Assessment of energy and environmental efficiency. *Mir transporta / World of Transport and Transportation*, 2012, vol. 10, no. 3, pp. 96–101 (in Russian).
9. Motasemi F., Afzal M. T., Salema A. A., Moghavvemi M., Shekarchian M., Zarifi F., Mohsin R. Energy and exergy utilization efficiencies and emission performance of Canadian transportation sector, 1990–2035. *Energy*, 2014, vol. 64, pp. 355–366. DOI: 10.1016/j.energy.2013.09.064.
10. Zarifi F., Mahlia T. M. I., Motasemi F., Shekarchian M., Moghavvemi M. Current and future energy and exergy efficiencies in the Iran's transportation sector. *Energy Conversion and Management*, 2013, vol. 74, pp. 24–34. DOI: 10.1016/j.enconman.2013.04.041.

11. Seckin C., Sciubba E., Bayulken A. R. Extended exergy analysis of Turkish transportation sector. *Journal of Cleaner Production*, 2013, vol. 47, pp. 422–436. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.07.008.
12. Analiz sostoyaniya pozharnoy bezopasnosti na obyektaakh i podvizhnom sostave OAO “RZhD” v 2017 godu [Analysis of the state of fire safety at the facilities and rolling stock of the Open Joint Stock Company “Russian railways” in 2017]. Moscow, OJSC Russian railways Publ., 2017. 18 p. (in Russian).
13. Makarichi L., Techato K.-A., Jutidamrongphan W. Material flow analysis as a support tool for multi-criteria analysis in solid waste management decision-making. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, vol. 139, pp. 351–365. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.07.024.
14. Kozlov G. V., Ivakhnyuk G. K. Morphological structure of waste composition on world regions in XX and the beginning of the XXI century (review). *Izvestiya SPbGTI (TU) / Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University)*, 2014, no. 24(50), pp. 58–56 (in Russian).
15. Moody C. M., Townsend T. G. A comparison of landfill leachates based on waste composition. *Waste Management*, 2017, vol. 63, pp. 267–274. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.09.020.
16. Arzamasova Z. A., Aleksandrovskaya Z. I., Gulyaev N. F., Kirpichnikov A. A., Krkhambarov Ya. N., Kuzmenkova A. M., Shapiro M. A. *Sanitarnaya ochistka gorodov (sbor, udalenije, obezvrezhivaniye i ispolzovaniye tverdykh otbosov)* [Urban sanitation (collection, disposal, decontamination and use of solid waste)]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1966. 220 p. (in Russian).
17. Vladimirov Ya. A., Zyssin L. V. Methodological aspects of energy utilization of municipal solid waste and its gasification products. *Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbPU. Estestvennyye i inzhenernyye nauki / St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Science and Technology*, 2018, vol. 24, no. 1, pp. 5–16. DOI: 10.18721/JEST.240101.
18. Song G., Xiao J., Zhao H., Shen L. A unified correlation for estimating specific chemical exergy of solid and liquid fuels. *Energy*, 2012, vol. 40, issue 1, pp. 164–173. DOI: 10.1016/j.energy.2012.02.016.
19. 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.
20. Wang Y., Zhang X., Liao W., Wu J., Yang X., Shui W., Deng S., Zhang Y., Lin L., Xiao Y., Yu X., Peng H. Investigating impact of waste reuse on the sustainability of municipal solid waste (MSW) incineration industry using energy approach: A case study from Sichuan province, China. *Waste Management*, 2018, vol. 77, pp. 252–267. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.04.003.
21. Sun L., Fujii M., Tasaki T., Dong H., Ohnishi S. Improving waste to energy rate by promoting an integrated municipal solid-waste management system. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, vol. 136, pp. 289–296. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.05.005.
22. Aleksashina V. V. The ecology of the city. Waste incineration plants. *Academiya. Arkhitektura i stroitelstvo / Academia. Architecture and Construction*, 2014, no. 4, pp. 77–86 (in Russian). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologiya-goroda-musoroszhigatelnye-zavody> (Accessed 30 August 2018).
23. Han J., Yao X., Zhan Y., Oh S.-Y., Kim L.-H., Kim H.-J. A method for estimating higher heating value of biomass-plastic fuel. *Journal of the Energy Institute*, 2017, vol. 90, issue 2, pp. 331–335. DOI: 10.1016/j.joei.2016.01.001.
24. Boumchar I., Chhiti Y., M’hamdi Alaoui F. E., El Ouinani A., Sahibed-Dine A., Bentiss F., Jama C., Bensitel M. Effect of materials mixture on the higher heating value: Case of biomass, biochar and municipal solid waste. *Waste Management*, 2017, vol. 61, pp. 78–86. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.11.012.
25. Shi H., Mahinpey N., Aqsha A., Silbermann R. Characterization, thermochemical conversion studies, and heating value modeling of municipal solid waste. *Waste Management*, 2016, vol. 48, pp. 34–47. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.09.036.
26. Zhang Y., Wang Q., Li B., Li H., Zhao W. Is there a general relationship between the exergy and HHV for rice residues? *Renewable Energy*, 2018, vol. 117, pp. 37–45. DOI: 10.1016/j.renene.2017.10.022.
27. Huang Y. W., Chen M. Q., Li Q. H., Xing W. A critical evaluation on chemical exergy and its correlation with high heating value for single and multi-component typical plastic wastes. *Energy*, 2018, vol. 156, pp. 548–554. DOI: 10.1016/j.energy.2018.05.116.
28. Technical regulations for fire safety requirements. Federal Law on 22.07.2008 No. 123 (ed. 29.07.2017) (in Russian). Available at: www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_78699/ (Accessed 21 August 2018).

For citation: A. G. Khaydarov, L. A. Koroleva, G. K. Ivakhnyuk. Exergetic assessment of fire hazards of cargo transportation on railway transport. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2018, vol. 27, no. 10, pp. 26–37 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2018.27.10.26-37.