

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)

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)

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)

Д. Н. КОВАЛЬ, канд. техн. наук, заместитель генерального директора БелНИИТ "Транстехника" (Беларусь, 220005, г. Минск, ул. Платонова, 22; e-mail: zgd@niit.by)

УДК 614.841

ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ЭНЕРГОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ ГРУЗОВЫХ ПЕРЕВОЗОК НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Проанализировано применение эксергетического подхода для оценки энергоэкологической эффективности грузовых перевозок на железнодорожном транспорте. Химическая эксергия вещества рассмотрена как одно из условий возникновения пожара. Представлены зависимости между химической эксергией и показателями пожаровзрывоопасности веществ. Обоснована возможность использования эксергетического подхода для оценки пожарной опасности веществ топливно-энергетического назначения, обращающихся на железнодорожном транспорте. Определены преимущества такого подхода.

Ключевые слова: эксергия; железнодорожный транспорт; топливо; энергоэкологическая эффективность; пожарная опасность; теплота сгорания; температура вспышки; концентрационные пределы распространения пламени; температурные пределы распространения пламени.

DOI: 10.18322/PVB.2018.27.07-08.43-52

Введение

Одной из основных тенденций устойчивого развития национальной экономики является повышение энергетической эффективности процессов и производств при одновременном обеспечении пожарной и промышленной безопасности, рационального использования природных ресурсов, снижения негативного техногенного воздействия. Рост количества и качества потребляемой энергии обусловлен внедрением новых технологий, увеличением масштабов производства, что, в свою очередь, определяет поиск путей эффективного использования ресурсов и снижения уровня различных видов опасности.

Перспективным методом повышения энергетической эффективности и прогностической достоверности является эксергетический анализ [1].

Цель настоящей работы — обоснование возможности и преимуществ использования эксергетиче-

ского подхода к комплексной оценке энергоэкологической эффективности и пожарной опасности грузовых перевозок на железнодорожном транспорте. Для достижения данной цели были решены следующие задачи:

- определение областей применения эксергетического метода анализа;
- установление связи между эксергией и показателями пожаровзрывоопасности для веществ топливно-энергетического назначения, обращающихся на железнодорожном транспорте;
- выявление преимуществ эксергетического подхода.

Теоретические основы

Наиболее точное определение эксергии было сформулировано в книге [2]: “Эксергия равна работе обратимого процесса, протекающего в конкретных условиях между системой и окружающей средой

вплоть до заданных конкретных условий равновесия с этой средой, параметры которой не зависят от работы изучаемой системы и максимально близки к соответствующим параметрам окружающей природы”.

С введением эксергии в термодинамику возникло понятие “окружающая среда”, описываемое через ее температуру, давление и состав. При наличии двух систем, находящихся в разных состояниях, появляется возможность выполнения работы при переходе к состоянию равновесия.

Эксергия системы E (Дж) может быть разделена на ряд компонентов:

$$E = E_k + E_p + E_f + E_x, \quad (1)$$

где E_k , E_p , E_f , E_x — кинетическая, потенциальная, физическая и химическая составляющие эксергии соответственно.

Для большинства реальных технических систем кинетическая и потенциальная составляющие в формуле (1) малы и поэтому не имеют практического значения, за исключением таких объектов, как, например, гидроэлектростанции, использующие потенциальную эксергию воды. Следовательно, выражение (1) для типичной термодинамической системы можно записать в виде:

$$E = S(T - T_0) + V(p - p_0) + \sum_{i=1}^N n_i(\mu_i - \mu_0), \quad (2)$$

где S — энтропия, Дж/К;

T , T_0 — температура соответственно системы и окружающей среды, К;

V — объем системы, м³;

p , p_0 — давление соответственно в системе и окружающей среде, Па;

N — общее количество веществ — компонентов системы;

n_i — число молей i -го вещества, моль;

μ_i , μ_0 — химические потенциалы i -го вещества — соответственно компонента системы и окружающей среды (среды отсчета), Дж/моль.

В отличие от энергии эксергия не подчиняется закону сохранения, диссимилируясь или затрачиваясь вследствие необратимости любых реальных процессов. Потери эксергии прямо пропорциональны увеличению энтропии. Эксергия отражает качество и масштабы преобразований энергии внутри системы.

Проведение эксергетического анализа ориентировано на получение максимальной полезной работы, которую может совершить система. Его объектом могут быть технологические процессы, технико-экономические системы, отрасли промышленности, а также прогнозирование термодинамических процессов для различных систем.

Эксергия выступает мерой отклонения параметров состояния термодинамической системы от условий окружающей среды, что видно из формулы (2). Она отражает как ресурсный потенциал данной термодинамической системы, возможность ее использования, так и изменения, которые могут произойти в окружающей среде, опасность системы. В литературе рассматривают три вида возможных взаимодействий с окружающей средой:

- термическое (температурный потенциал) — источник вторичного тепла или теплового загрязнения;
- деформационное (потенциал — разница давлений) — например, работа расширения газов в двигателях внутреннего сгорания (контролируемое использование) и взрыв (неконтролируемое);
- химическое (химический потенциал) — использование сырьевых и топливных ресурсов, источник химического загрязнения.

В современных исследованиях понятие эксергии связывают с “правилом трех “Э”: эффективность, экономичность, экологическая целесообразность [3]. Эксергетический анализ позволяет получить характеристику внутреннего качества энергетического или производственного объекта, прогноз объема энергии, определить степень его безотходности как по материальному, так и по термодинамическому балансу, эффективность по веществу и энергии [4].

Железнодорожный транспорт признан в мире одним из энергетически эффективных и экологически чистых видов транспорта — по удельным показателям потребления энергии и выбросов загрязняющих веществ на единицу перевозочной работы [3]. В то же время транспортные системы, в том числе железнодорожный транспорт, можно рассматривать как крупные энергетические комплексы, которые используют большое количество топливно-энергетических ресурсов и оказывают негативное воздействие на окружающую среду и человека. Железнодорожный транспорт потребляет до 6 % производимого в нашей стране дизельного топлива, около 90 % от этого количества расходуется на тягу поездов [5]. Кроме того, железнодорожным транспортом осуществляются перевозки большого количества опасных грузов, в том числе топливно-энергетического назначения.

Согласно статистическим данным чрезвычайные ситуации при перевозке нефти и нефтепродуктов на железнодорожном транспорте связаны с механическим повреждением специальных цистерн и выходом веществ в окружающую среду с последующим воспламенением и (или) загрязнением территорий [6].

Пожарная опасность грузового подвижного состава определяется наличием большого количества опасных грузов, быстрым распространением пожа-

ров на большие площади, взрывами, затрудненностью подъезда пожарных подразделений, возможностью задержки введения огнетушащих веществ до выяснения физико-химических свойств грузов и обесточивания электроконтактной сети и другими факторами. Розливы нефти и нефтепродуктов при осуществлении перевозок создают наиболее опасные ситуации, которые могут привести к тяжелым последствиям.

В ночь на 31 января 2012 г. в Амурской обл. на Забайкальской железной дороге произошел сильнейший пожар. Из-за обрыва контактных проводов сошли с рельсов и опрокинулись 17 цистерн с нефтью, 13 из которых загорелись. Поездной бригаде удалось отцепить горящие цистерны и отогнать основной состав на безопасное расстояние. Всего транспортировалось 68 цистерн с нефтью. Пострадавших и погибших не было.

6 июля 2013 г. в г. Ляк-Межантик (Канада), расположенном в 250 км от Монреаля, из-за неисправности ручного тормоза потерпел крушение поезд, состоящий из 70 цистерн с сырой нефтью. Состав скатился с холма, цистерны оторвались от локомотива и, набрав скорость, сошли с рельсов в центральной части города с населением около 6000 чел. В результате возгорания произошла серия из шести мощных взрывов, разрушивших центральную часть города. Из опасного района пришлось эвакуировать более 1,5 тыс. чел. Многие лишились своего имущества, 47 чел. погибли.

9 мая 2013 г. на станции Белая Калитва Ростовской обл. сошел с рельсов локомотив, а вслед за ним — 51 цистерна с нефтепродуктами, в том числе с пропаном. Последовал взрыв, после чего начался пожар: загорелось масло, находившееся в ряде емкостей. Из одной поврежденной цистерны произошла утечка метилхлорида. Было эвакуировано 2,7 тыс. чел., госпитализировано — 30.

Анализу эффективности использования энерго-ресурсов на транспорте, оценке негативного воздействия транспортных систем на окружающую среду посвящено большое количество исследований. Однако они практически не затрагивают вопросов пожарной безопасности. Эксергетический метод получил применение для исследования транспортных систем в различных странах, например в Турции, Англии, Канаде, Китае, Италии, Иране [7–13].

Результаты и их обсуждение

Процессы использования и перевозки топливно-энергетических ресурсов на железнодорожном транспорте сопряжены с пожарным риском. Нами рассмотрена возможность применения эксергетического подхода для оценки пожарной опасности процессов, происходящих на железнодорожном



Рис. 1. Место эксергии в “пожарном треугольнике”

Fig. 1. Position of exergy in the “Fire triangle”

транспорте, путем установления связи термодинамических характеристик и показателей пожаровзрывоопасности. Объектами исследования выбраны углеводороды, являющиеся основными компонентами жидкого и газообразного топлива.

Как известно, для возникновения и развития процессов горения необходимы горючее вещество, окислитель и определенные теплофизические условия (далее — ТФУ) [14]. Модель “пожарный треугольник” как простейшее представление об условиях возникновения пожара можно дополнить еще одной составляющей — эксергетической (рис. 1).

В настоящее время энергетический потенциал горючих веществ оценивается величиной теплоты сгорания, которая может быть определена экспериментально и расчетными методами. Отдельные исследования посвящены выявлению связи между теплотой сгорания и эксергией, например, для угля [15], пластмассовых отходов [16]. Данные по теплоте сгорания используют при расчете пожарной нагрузки и категорировании помещений по взрывопожарной и пожарной опасности.

На основе представленных в табл. 1 данных нами была установлена зависимость между удельной химической эксергией, приходящейся на 1 моль вещества, e_x и низшей теплотой сгорания Q_n углеводородов, определенной по справочнику [17].

На рис. 2 представлена зависимость между удельной химической эксергией e_x углеводородов, являющихся компонентами газообразного и жидкого топлива, и Q_n . Значения Q_n меняются от 802,0 до 11263,0 кДж/моль, при этом параметр e_x варьирует от 831,7 до 11937,4 кДж/моль:

$$Q_n = 0,937e_x + 66,7 \quad (831,7 \leq e_x \leq 11937,4).$$

Максимальная относительная погрешность при этом составляет 6 %. Коэффициент корреляции $R^2 = 0,999$.

Таблица 1. Значения e_x и Q_n для углеводородов

Table 1. Values of exergy and LHV (lower heating value) for hydrocarbons

№ п/п No.	Название вещества Name	Брутто-формула Formula	e_x		Q_n , кДж/ моль Q_f , kJ/mol
			Значение, кДж/моль Value, kJ/mol	Источник Source	
1	Метан Methane	CH ₄	831,7	18	802,0
2	Ацетилен Acetylene	C ₂ H ₂	1265,8	18	1301,0
3	Этилен Ethylene	C ₂ H ₄	1361,1	18	1318,0
4	Этан Ethane	C ₂ H ₆	1495,8	18	1576,0
5	Метилацетилен Methylacetylene	C ₃ H ₄	1899,5	18	1939,0
6	Пропен Propene	C ₃ H ₄	2003,9	18	1919,0
7	Циклопропан Cyclopropane	C ₃ H ₆	2043,2	18	2091,0
8	Пропан Propane	C ₃ H ₈	2154,0	18	2044,0
9	1,3-Бутадиен 1,3-Butadiene	C ₄ H ₆	2500,0	20	2411,0
10	1-Бутин 1-Butyne	C ₄ H ₆	2552,3	18	2599,0
11	Циклобутан Cyclobutane	C ₄ H ₈	2516,2	18	2544,0
12	2-Метил-1-пропен 2-Methyl-1-propene	C ₄ H ₈	2646,0	19	2577,0
13	Цисбутен-2 Cis-2-butene	C ₄ H ₈	2652,0	19	2528,0
14	Бутен-1 1-Butylene	C ₄ H ₈	2659,7	18	2542,6
15	Трансбутен-2 Trans-2-butene	C ₄ H ₈	2650,0	19	2525,0
16	Изобутан Isobutane	C ₄ H ₁₀	2804,0	19	2649,0
17	н-Бутан n-Butane	C ₄ H ₁₀	2805,8	18	2657,0
18	3-Метил-1-бутен 3-Methyl-1-butene	C ₅ H ₁₀	3307,0	19	3143,0
19	Циклопентан Cyclopentane	C ₅ H ₁₀	3268,0	19	3071,0
20	2-Метил-2-бутен 2-Methyl-2-butene	C ₅ H ₁₀	3291,0	19	3175,0
21	Пентен-1 1-Pentene	C ₅ H ₁₀	3310,0	19	3154,0
22	н-Пентан n-Pentane	C ₅ H ₁₂	3461,8	18	3272,0
23	2,2-Диметилпропан 2,2-Dimethylpropane	C ₅ H ₁₂	3453,0	19	3253,0
24	2-Метилбутан 2-Methylbutane	C ₅ H ₁₂	3453,0	19	3264,0

Продолжение табл. 1 / Continued Table 1

№ п/п No.	Название вещества Name	Брутто-формула Formula	e_x		Q_n , кДж/ моль Q_f , kJ/mol
			Значение, кДж/моль Value, kJ/mol	Источник Source	
25	Бензол Benzol	C ₆ H ₆	3294,0	20	3169,4
26	Гексен-1 1-Hexylene	C ₆ H ₁₂	3967,9	18	3767,7
27	Метилциклопентан Methylcyclopentane	C ₆ H ₁₂	3910,8	18	3705,0
28	Циклогексан Cyclohexane	C ₆ H ₁₂	3909,2	18	3689,0
29	3-Метилпентан 3-Methylpentane	C ₆ H ₁₄	4110,0	19	3882,0
30	2,3-Диметилбутан 2,3-Dimethylbutane	C ₆ H ₁₄	4108,0	19	3868,0
31	н-Гексан n-Hexane	C ₆ H ₁₄	4114,5	18	3887,0
32	2,2-Диметилбутан 2,2-Dimethylbutane	C ₆ H ₁₄	4100,2	19	3868,0
33	Толуол Toluene	C ₇ H ₈	3931,0	18	3771,9
34	Метилциклогексан Methylcyclohexane	C ₇ H ₁₄	4556,9	18	4293,0
35	2,3-Диметилпентан 2,3-Dimethylpentane	C ₇ H ₁₆	4755,0	19	4490,0
36	2,4-Диметилпентан 2,4-Dimethylpentane	C ₇ H ₁₆	4758,0	19	4487,0
37	2,2,3-Триметилбутан 2,2,3-Trimethylbutane	C ₇ H ₁₆	4759,0	19	4484,0
38	н-Гептан n-Heptane	C ₇ H ₁₆	4761,7	18	4501,0
39	2-Метилгексан 2-Methylhexane	C ₇ H ₁₆	4759,0	19	4494,0
40	п-Ксилол p-Xylene	C ₈ H ₁₀	4573,0	19	4375,0
41	Этилбензол Ethylbenzene	C ₈ H ₁₀	4587,9	18	4386,9
42	о-Ксилол o-Xylene	C ₈ H ₁₀	4573,1	18	4376,0
43	Этилциклогексан Ethylcyclohexane	C ₈ H ₁₆	5205,9	19	4911,0
44	2,2,4-Триметилпентан 2,2,4-Trimethylpentane	C ₈ H ₁₈	5413,0	18	5100,0
45	2,4-Диметилгексан 2,4-Dimethylhexane	C ₈ H ₁₈	5411,0	19	5105,0
46	2,2,3-Триметилпентан 2,2,3-Trimethylpentane	C ₈ H ₁₈	5416,0	19	5104,0
47	н-Октан n-Octane	C ₈ H ₁₈	5413,1	18	5116,0
48	2,3-Диметилгексан 2,3-Dimethylhexane	C ₈ H ₁₈	5416,0	19	5111,0
49	2-Метил-3-этилпентан 2-Methyl-3-ethylpentane	C ₈ H ₁₈	5420,0	19	5113,0

Окончание табл. 1 / End Table 1

№ п/п No.	Название вещества Name	Брутто-формула Formula	e_x		Q_n , кДж/ моль Q_n , kJ/mol
			Значение, кДж/моль Value, kJ/mol	Источник Source	
50	Кумол Cumene	C_9H_{12}	5233,0	20	5268,1
51	1,3,5-Триметилбензол 1,3,5-Trimethylbenzene	C_9H_{12}	5213,0	18	4993,0
52	н-Пропилбензол n-Propylbenzene	C_9H_{12}	5249,1	18	4996,9
53	1-Метил-2-этилбензол 1-Methyl-2-ethylbenzene	C_9H_{12}	5226,0	19	4993,0
54	1,2,3-Триметилбензол 1,2,3-Trimethylbenzene	C_9H_{12}	5216,0	19	4993,0
55	1-Метил-4-этилбензол 1-Methyl-4-ethylbenzene	C_9H_{12}	5222,0	18	4993,0
56	1,2,4-Триметилбензол 1,2,4-Trimethylbenzene	C_9H_{12}	5211,0	19	4993,0
57	1-Метил-3-этилбензол 1-Methyl-3-ethylbenzene	C_9H_{12}	5222,0	19	4993,0
58	н-Пропилциклогексан n-Propylcyclohexane	C_9H_{18}	5857,7	18	5525,0
59	н-Нонан n-Nonane	C_9H_{20}	6064,9	18	5731,0
60	Нафталин Naphthalene	$C_{10}H_8$	5255,0	18	5050,0
61	н-Бутилбензол n-Butylbenzene	$C_{10}H_{14}$	5892,0	18	5608,9
62	н-Бутилциклогексан n-Butylcyclohexane	$C_{10}H_{20}$	6511,5	18	6134,0
63	н-Декан n-Decane	$C_{10}H_{22}$	6716,8	18	6346,0
64	Пентаметилбензол Pentamethylbenzene	$C_{11}H_{16}$	6516,0	18	6224,6
65	н-Ундекан n-Undecane	$C_{11}H_{24}$	7376,9	18	6960,0
66	н-Додекан n-Dodecane	$C_{12}H_{26}$	8029,4	18	7575,0
67	н-Тридекан n-Tridecane	$C_{13}H_{28}$	8682,0	18	8190,0
68	1,1-Дифенилэтан 1,1-Diphenylethane	$C_{14}H_{14}$	7665,9	18	7330,0
69	н-Тетрадекан n-Tetradecane	$C_{14}H_{30}$	9334,5	18	8804,0
70	н-Пентадекан n-Pentadecane	$C_{15}H_{32}$	9984,8	18	9419,0
71	н-Гексадекан (цетан) n-Hexadecane	$C_{16}H_{34}$	10639,7	18	10034,0
72	н-Октадекан n-Octadecane	$C_{18}H_{38}$	11937,4	18	11263,0
73	Трифенилметан Triphenylmethane	$C_{19}H_{16}$	10109,2	18	9660,0

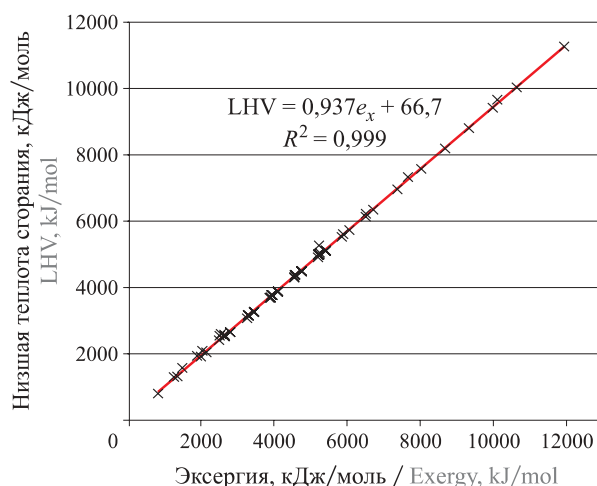


Рис. 2. Зависимость значений Q_n и e_x для углеводородов
Fig. 2. Correlation between LHV (lower heating value) and exergy for hydrocarbons

По международным стандартам ISO 3679 и ISO 13736 температура вспышки $T_{всп}$ не является константой для физико-химических свойств вещества или материала: ее значения, полученные экспериментальным путем, зависят от аппаратного оформления, методики определения и могут иметь значительный разброс [21]. Кроме того, не для всех веществ найдены экспериментальные значения температуры вспышки. Основным назначением рассматриваемого показателя пожаровзрывоопасности во многих странах является его применение в качестве критерия при делении воспламеняющихся жидкостей на легковоспламеняющиеся (ЛВЖ) и горючие (ГЖ). Значение температуры вспышки используется при определении категорий помещений по взрывопожарной и пожарной опасности. При оценке пожарной опасности в соответствии с ГОСТ 12.1.044–89 допускается использовать как экспериментальные, так и расчетные значения температуры вспышки. Методы рас-

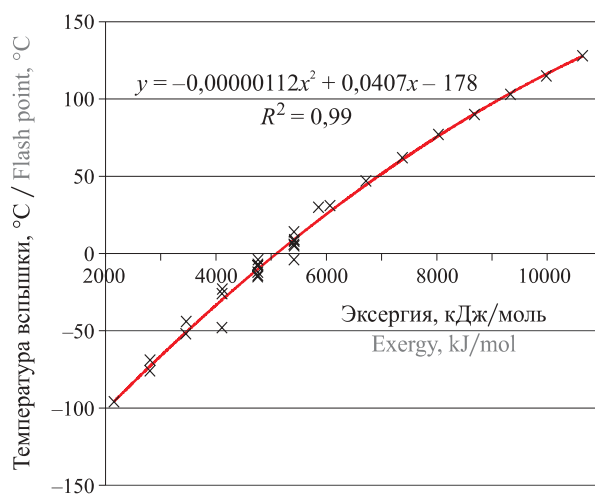


Рис. 3. Зависимость $T_{всп}$ от величины e_x для алканов
Fig. 3. Correlation between flash point and exergy for alkanes

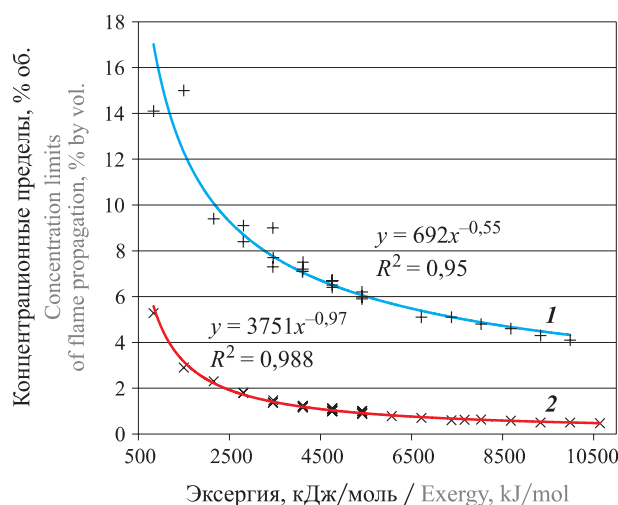


Рис. 4. Зависимость ВКПР (1) и НКПР (2) от величины e_x для алканов

Fig. 4. Correlation between upper (1) and lower (2) concentration limits of flame propagation and exergy for alkanes

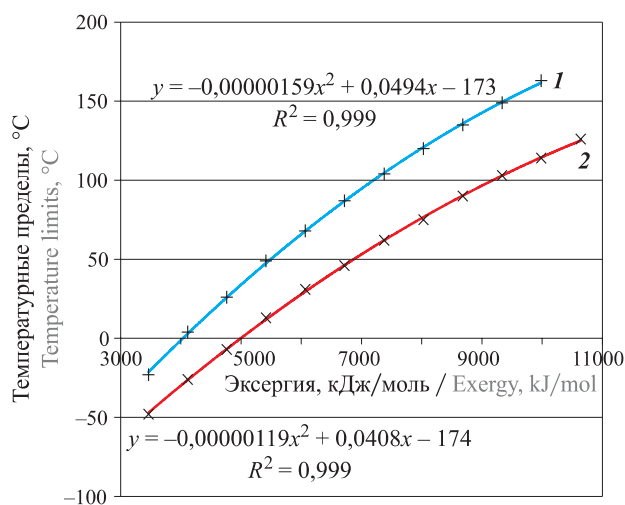


Рис. 5. Зависимость ВТПР (1) и НТПР (2) от величины e_x для алканов

Fig. 5. Correlation between upper (1) and lower (2) temperature limits of flame propagation and exergy for alkanes

Таблица 2. Формулы для расчета показателей пожаровзрывоопасности алканов

Table 2. Formulas for calculating fire and explosion ratio for alkanes

№ п/п No.	Показатель Property	Формула для расчета Formula	R^2
1	Температура вспышки / Flash point	$T_{всп} (FP) = 112 \cdot 10^{-8} e_x^2 + 0,0407 e_x - 178$	0,990
2	НКПР / Lower concentration limit of flame propagation	$НКПР (LFL) = 3751,1 e_x^{-0,968}$	0,950
3	ВКПР / Upper concentration limit of flame propagation	$ВКПР (UFL) = 692,45 e_x^{0,551}$	0,988
4	НТПР / Lower temperature limit of flame propagation	$НТПР (LTFL) = 119 \cdot 10^{-8} e_x^2 + 0,0408 e_x - 174$	0,999
5	ВТПР / Upper temperature limit of flame propagation	$ВТПР (UTFL) = 159 \cdot 10^{-8} e_x^2 + 0,0494 e_x - 173$	0,999

чета и прогнозирования данного показателя являются предметом современных исследований.

Нами проанализирована связь между температурой вспышки для углеводородов различных классов и их химической эксергией. В частности, для алканов данная зависимость приведена на рис. 3.

Важным показателем пожаровзрывоопасности являются концентрационные пределы распространения пламени, определяемые экспериментально и расчетным путем. Их существование является фундаментальным свойством горючих смесей. Рассматриваемый показатель в соответствии с ГОСТ 12.1.044–89 применяют при определении размеров взрывоопасных зон, расчете и обосновании взрывоопасных концентраций веществ внутри технологического оборудования, при определении категории помещений по взрывопожарной и пожарной опасности. Зависимость нижнего (НКПР) и верхнего (ВКПР) концентрационных пределов распространения пламени от удельной химической эксергии для алканов представлена на рис. 4.

Еще одним важным показателем пожаровзрывоопасности веществ являются температурные пределы распространения пламени. Их учитывают при

расчете пожаровзрывобезопасных температурных режимов работы технологического оборудования; при оценке аварий, связанных с проливом горючих и легковоспламеняющихся жидкостей; при расчете ВКПР и НКПР (ГОСТ 12.1.044–89). Зависимость верхнего (ВТПР) и нижнего (НТПР) температурных пределов распространения пламени от удельной химической эксергии для алканов приведена на рис. 5.

В табл. 2 представлены формулы, полученные для расчета показателей пожаровзрывоопасности веществ — компонентов жидких и газообразных топлив, применяемых и преевозимых на железнодорожном транспорте.

Вследствие расширения спектра обращающихся веществ и материалов экспериментальное определение показателей пожаровзрывоопасности часто затруднительно, поэтому используют расчетные методы их определения. Найден зависимости между химической эксергией и показателями пожаровзрывоопасности веществ. Кроме того, выявлены преимущества использования эксергетического метода анализа, включающие аспекты обеспечения пожарной безопасности (рис. 6).



Рис. 6. Преимущества использования эксергетического метода анализа / Fig. 6. Using the exergy analysis for fire safety

Заклучение

Предлагаемый эксергетический подход позволяет комплексно рассматривать вопросы энергоэкологической эффективности и пожарной опасности грузовых перевозок железнодорожным транспортом. Кроме того, он дает возможность выявить связи термодинамических характеристик с технико-экономическими, экологическими показателями и провести оценку пожаровзрывоопасности обращающихся на железнодорожном транспорте веществ и материалов.

Использование эксергетического подхода определяется его универсальностью и возможностью преодоления методологических проблем при необходимости учета различных показателей в единой системе.

Полученные зависимости позволяют ранжировать обращающиеся на железнодорожном транспорте вещества топливно-энергетического назначения по показателям их энергетической эффективности и пожарной опасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. ИТС 48–2017. Повышение энергетической эффективности при осуществлении хозяйственной и (или) иной деятельности. URL: <http://docs.cntd.ru/document/456096365> (дата обращения: 06.06.2018).
2. Шаргут Я., Петела Р. Эксергия / Пер. с польск. — М.: Энергия, 1968. — 280 с.
3. Попов В. Г., Боровков Ю. Н., Сухов Ф. И. Оценка энерго-экологической эффективности // Мир транспорта. — 2012. — Т. 10, № 3. — С. 96–101.
4. Бродянский В. М. Эксергетический метод термодинамического анализа. — М.: Энергия, 1973. — 296 с.
5. Энергетическая стратегия холдинга “Российские железные дороги” на период до 2015 года и на перспективу до 2030 года: распоряжение ОАО “РЖД” от 15.12.2011 № 2718р. — М., 2011. — 96 с. URL: http://rzd-expo.ru/doc/Energ_Strateg_new.pdf (дата обращения: 06.06.2018).
6. Елизарьев А. Н., Юсупов Т. Р., Елизарьева Е. Н. Прогнозирование разливов нефтепродуктов при железнодорожных авариях // Бюллетень результатов научных исследований. — 2016. — № 3-4(20-21). — С. 28–35. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prognozirovanie-razlivov-nefteproduktov-pri-zheleznodorozhnyh-avariyah> (дата обращения: 20.06.2018).
7. Seckin C., Sciubba E., Bayulken 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.
8. Byers E. A., Gasparatos A., Serrenho A. C. A framework for the exergy analysis of future transport pathways: Application for the United Kingdom transport system 2010–2050 // Energy. — 2015. — Vol. 88. — P. 849–862. DOI: 10.1016/j.energy.2015.07.021.
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. Zhang M., Li G., Mu H. L., Ning Y. D. Energy and exergy efficiencies in the Chinese transportation sector, 1980–2009 // Energy. — 2011. — Vol. 36, Issue 2. — P. 770–776. DOI: 10.1016/j.energy.2010.12.044.

11. *Federici M., Ulgiati S., Basosi R.* A thermodynamic, environmental and material flow analysis of the Italian highway and railway transport systems // *Energy*. — 2008. — Vol. 33, Issue 5. — P. 760–775. DOI: 10.1016/j.energy.2008.01.010.
12. *Lior N., Sarmiento-Darkin W., Al-Sharqawi H. S.* The exergy fields in transport processes: Their calculation and use // *Energy*. — 2006. — Vol. 3, Issue 5. — P. 553–578. DOI: 10.1016/j.energy.2005.05.009.
13. *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.
14. *Киселёв Я. С., Хорошилов О. А.* Стандартный и научный подходы к определению условий возникновения горения // *Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety*. — 2004. — Т. 13, № 6. — С. 45–52.
15. *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.
16. *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.
17. *Корольченко А. Я., Корольченко Д. А.* Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справочник : в 2 ч. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Пожнаука, 2004. — Ч. I. — 713 с.; Ч. II. — 774 с.
18. *Szargut J., Morris D. R., Steward F. R.* Exergy analysis of thermal, chemical and metallurgical processes. — New York : Hemisphere Publishing Corporation, 1988. — 332 p.
19. *Perry R. H., Chilton C. H.* Chemical Engineer's Handbook. — 5th ed. — New York : McGraw-Hill, 1973. — 1550 p.
20. *Ayres R. U., Ayres L. W., Martínás K.* Exergy, waste accounting, and life-cycle analysis // *Energy*. — 1998. — Vol. 23, Issue 5. — P. 355–363. DOI: 10.1016/S0360-5442(97)00076-5.
21. *Алексеев С. Г., Смирнов В. В., Барбин Н. М.* Температура вспышки. Часть I. История вопроса, дефиниции, методы экспериментального определения // *Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety*. — 2012. — Т. 21, № 5. — С. 35–41.

Материал поступил в редакцию 5 августа 2018 г.

Для цитирования: 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.

English

EXERGISTIC APPROACH TO ESTIMATION OF ENERGY-ECOLOGICAL EFFICIENCY AND FIRE HAZARD OF CARGO TRANSPORTATION ON RAILWAY TRANSPORT

KOROLEVA L. A., 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)

KHAYDAROV A. G., 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)

IVAKHNYUK G. K., 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)

KOVAL D. N., Candidate of Technical Sciences, Deputy Director-General, Belarusian Research Institute of Transport Transtekhnika (Platonova St., 22, Minsk, 220005, Republic of Belarus; e-mail: zgd@niit.by)

ABSTRACT

Introduction. One of the main trends in the sustainable development of the national economy is an increase in the energy efficiency of processes and industries, fire and industrial safety, rational use of natural resources, and reduction of negative man-made impact. A method for improving energy efficiency and predictive reliability is exergy analysis. However, it is not enough specified for fire safety.

Theoretical basis. Exergy is a thermodynamic concept, used for many years within engineering analysis of chemical and mechanical processes and systems. In modern science the concept of exergy is associated with efficiency, economy, and environmental feasibility. However, exergy analysis is practically does not affect issues related to fire safety.

Result and discussion. Consider the possibility of using an exergy approach to assess the fire danger of rail transport. At first we establish relationships between thermodynamic characteristics and fire and explosion hazard ratio. The objects of research are hydrocarbons, which are the main components of liquid and gaseous fuels.

Exergy is considered as one of the conditions for the occurrence of a fire.

We have determined the dependencies between the specific chemical exergy and the fire and explosion hazard ratio of substances for railway transport. Specific chemical exergy was found from literature sources.

Lower heat of combustion, flash point, temperature limits of flame propagation, concentration limits of flame propagation parameters were considered. Formulas for calculation are proposed. The correlation of determination R^2 was calculated (from 0.950 to 0.999).

Using the exergy method of analysis has some preference for fire safety.

Conclusions. The offered approach allows to consider in a complex way the questions of energy-ecological efficiency and fire danger of cargo transportations of a railway transportation. It also makes it possible to identify the links between thermodynamic characteristics and technical, economic and environmental indicators and to assess the fire and explosion hazard of substances and materials for railway transport. The obtained dependences allow to rank substances of fuel and energy purpose in terms of their energy efficiency and fire hazard.

Keywords: exergy; railway transport; fuel; energy-ecological efficiency; fire danger; LHV; flash point; concentration limits of flame propagation; temperature limits of flame propagation.

REFERENCES

1. *Information and technical reference for best available technology. ITS 48–2017. Energy efficiency improvement during economic and/or other activities* (in Russian). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/456096365> (Accessed 6 June 2018).
2. Szargut J., Petela R. *Eksergiya* [Exergy]. Moscow, Energiya Publ., 1968. 280 p. (in Russian).
3. 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).
4. Brodyanskiy V. M. *Eksergeticheskiy metod termodinamicheskogo analiza* [Exergy method of thermodynamic analysis]. Moscow, Energiya Publ., 1973. 296 p. (in Russian).
5. *Energy strategy of the Russian Railways Holding for the period up to 2015 and for the future up to 2030*. Directive of the Russian Railways Holding on 15.12.2011 No. 2718r. Moscow. 2011. 96 p. (in Russian). Available at: http://rzd-expo.ru/doc/Energ_Strateg_new.pdf (Accessed 6 June 2018).
6. Elizariyev A. N., Yusupov T. R., Elizariyeva E. N. Oil spills forecasting in rail accidents. *Bulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy / Results of Scientific Research Work*, 2016, no. 3-4(20-21), pp. 28–35 (in Russian). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/prognozirovanie-razlivov-nefteproduktov-pri-zheleznodorozhnyh-avariyah> (Accessed 20 June 2018).
7. 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.
8. Byers E. A., Gasparatos A., Serrenho A. C. A framework for the exergy analysis of future transport pathways: Application for the United Kingdom transport system 2010–2050. *Energy*, 2015, vol. 88, pp. 849–862. DOI: 10.1016/j.energy.2015.07.021.

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. Zhang M., Li G., Mu H. L., Ning Y. D. Energy and exergy efficiencies in the Chinese transportation sector, 1980–2009. *Energy*, 2011, vol. 3, issue 2, pp. 770–776. DOI: 10.1016/j.energy.2010.12.044.
11. Federici M., Ulgiati S., Basosi R. A thermodynamic, environmental and material flow analysis of the Italian highway and railway transport systems. *Energy*, 2008, vol. 3, issue 5, pp. 760–775. DOI: 10.1016/j.energy.2008.01.010.
12. Lior N., Sarmiento-Darkin W., Al-Sharqawi H. S. The exergy fields in transport processes: Their calculation and use. *Energy*, 2006, vol. 3, issue 5, pp. 553–578. DOI: 10.1016/j.energy.2005.05.009.
13. 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.
14. Kiselev Ya. S., Khoroshilov O. A. Standard and scientific approaches to the determination of combustion appearance conditions. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2004, vol. 13, no. 6, pp. 45–52 (in Russian).
15. 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.
16. 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.
17. Korolchenko A. Ya., Korolchenko D. A. *Pozharovzryvoopasnost veshchestv i materialov i sredstva ikh tusheniya: spravochnik. 2-e izd.* [Fire and explosion hazard of substances and materials and their means of fighting. Reference book. 2nd ed.]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2004, part I, 713 p.; part II, 774 p. (in Russian).
18. Szargut J., Morris D. R., Steward F. R. *Exergy analysis of thermal, chemical and metallurgical processes*. New York, Hemisphere Publishing Corporation, 1988. 332 p.
19. Perry R. H., Chilton C. H. *Chemical engineer's handbook*. 5th ed. New York, McGraw-Hill, 1973. 1550 p.
20. Ayres R. U., Ayres L. W., Martinás K. Exergy, waste accounting, and life-cycle analysis. *Energy*, 1998, vol. 23, issue 5, pp. 355–363. DOI: 10.1016/S0360-5442(97)00076-5.
21. Alexeev S. G., Smirnov V. V., Barbin N. M. Flash point. Part I. Question history, definitions, and test methods of determination. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 5, pp. 35–41 (in Russian).

For citation: 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. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2018, vol. 27, no. 7-8, pp. 43–52 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2018.27.07-08.43-52.