

Научная статья
УДК 656.225.073.436.08:614.84
doi:10.52170/1815-9265_2026_79_60

Теоретическое исследование свойств опасных грузов подкласса 2.1 – углеводородных газов для предупреждения рисков развития техногенных чрезвычайных ситуаций на железнодорожном транспорте

Владимир Ильич Медведев^{1✉}, Дмитрий Валерьевич Ануфриев²,
Михаил Дмитриевич Сурков³

^{1, 2} Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

³ ООО «ПК Дельта», Новосибирск, Россия

¹ MedvedevVI2017@yandex.ru✉

² anufriewdima@yandex.ru

³ rulka@gmail.com

Аннотация. Углеводородные газообразные соединения играют важную роль в современной экономике. Мировой годовой объем добычи природных углеводородов составляет внушительную величину – $4,10^{12}$ м³. Они находят применение в качестве энергоносителей, сырья для производства органических и неорганических веществ, материалов, изделий и в других сферах. Для транспортировки (перевозки) углеводородных газов (в различных физических состояниях, например сжатым, сжиженным или растворенным) используются все виды транспорта. В работе акцент сделан на перевозке по железным дорогам, погрузка сжиженных углеводородных газов в 2025 г. составила 13,4 млн т. Основной объем приходится на трубопроводный транспорт, однако существенную роль играют также морские, речные, автомобильные и в меньшей степени авиационные перевозки.

Низкомолекулярные углеводородные соединения, в том числе 24 номенклатурные позиции индивидуального состава, Комитетом экспертов ЭКОСОС ООН по перевозке опасных грузов, в соответствии с согласованной на глобальном уровне системой классификации и маркировки химических веществ, отнесены к опасным грузам класса 2 (газы), подкласса 2.1 (воспламеняющиеся газы). Наряду с полезными потребительскими свойствами, горючестью и высоким теплосодержанием углеводородные газы обладают способностью к взрыву, взрывчатому превращению в трудно контролируемых условиях. Проявление в транспортном процессе данного свойства представляет существенную опасность, что отражено в запрете роспуска вагонов-цистерн с такими грузами с сортировочных горок. Запрет роспуска существенно снижает технико-экономические показатели работы сортировочных станций.

Данная работа является продолжением исследований, проводимых в университете в 2005–2010 гг. по договорам с ОАО «Российские железные дороги». В настоящее время проблема не потеряла свою актуальность и привлекает внимание специалистов отрасли. Данное исследование посвящено изучению характеристик груза, выявлению в первую очередь закономерностей взрыва и горения углеводородных газов, попыткам дифференцировать соединения и условия «по степени опасности». В серии работ мы планируем изучить влияние на протекание и результат реакций структурных, термодинамических, кинетических, феноменологических, экологических и экономических факторов; осуществить поиск наименее опасных газов и наименее опасных условий для подготовки программы экспериментов (сначала численных, а затем натурных) по роспуску вагонов-цистерн с сортировочных горок. Следует отметить, что на роспуск с сортировочных горок порожних вагонов-цистерн из-под углеводородных газов также действует запрет.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, запрет роспуска вагонов, взрывопожарные свойства, опасные грузы подкласса 2.1, риск, углеводородные газы, углеводородо-воздушные смеси

Для цитирования: Медведев В. И., Ануфриев Д. В., Сурков М. Д. Теоретическое исследование свойств опасных грузов подкласса 2.1 – углеводородных газов для предупреждения рисков развития техногенных чрезвычайных ситуаций на железнодорожном транспорте // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 2 (79). С. 60–69. DOI 10.52170/1815-9265_2026_79_60.

A theoretical study of the subclass 2.1 hazardous goods properties – hydrocarbon gases to prevent the risks of developing man-made emergencies in rail transport

Vladimir I. Medvedev¹, Dmitry V. Anufriev², Mickael D. Surkov³

^{1, 2} Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

³ LLC PK Delta, Novosibirsk, Russia

¹ MedvedevVI2017@yandex.ru

² anufriewdima@yandex.ru

³ rulka@gmail.com

Abstract. Hydrocarbon gaseous compounds play important role in the modern economy of the early 21st century. The global annual production of natural hydrocarbons amounts to an impressive $4 \cdot 10^{12}$ m³. They are used as energy carriers, raw materials for the production of organic and inorganic substances, materials, products, and in other areas. All types of transport are used for the transportation of hydrocarbon gases (in various physical states, such as compressed, liquefied, or dissolved). This work focuses on rail transport; loading of liquefied hydrocarbon gases in 2025 is estimated at 13.4 million tons. The main volume is carried by pipeline transport, but marine, river, road, and, to a lesser extent, air transport also play a significant role.

Low-molecular hydrocarbon compounds, including 24 nomenclature positions of individual compositions, have been classified by the UN ECOSOS Committee of Experts on the Transport of Dangerous Goods and in accordance with the Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals as dangerous goods of Class 2 (gases) and subclass 2.1 (flammable gases). Alongside their useful consumer properties, combustibility, and high calorific value, hydrocarbon gases have the potential for explosion and explosive transformation under difficult-to-control conditions. The manifestation of this property during transport poses a significant hazard, which is reflected in the prohibition of shunting tank cars with such cargoes from hump yards. The prohibition of shunting significantly reduces the technical and economic performance of classification yards.

This work is a continuation of research conducted at the university from 2005 to 2010 under contracts with Russian Railways. At present, the problem has not lost its relevance and continues to attract the attention of industry specialists. This work is devoted to studying the characteristics of cargo, primarily identifying the patterns of explosion and combustion of hydrocarbon gases, and attempting to differentiate conditions 'by degree of danger'. In a series of studies, we plan to examine the influence of factors such as structural, thermodynamic, kinetic, phenomenological, environmental, and economic on the course and outcome of reactions; to search for the least dangerous gases and the least hazardous conditions for preparing an experimental program, first numerical, then full-scale, for the unloading of tank cars from hump yards. It should be noted that there is also a prohibition on unloading empty tank cars that previously carried hydrocarbon gases from hump yards.

Keywords: railway transport, risk, ban on the dismantling of railcars, explosion and fire properties, dangerous goods of division 2.1, hydrocarbon gases, hydrocarbon-air mixtures

For citation: Medvedev V. I., Anufriev D. V., Surkov M. D. A theoretical study of the subclass 2.1 hazardous goods properties – hydrocarbon gases to prevent the risks of developing man-made emergencies in rail transport. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(79):60–69. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_79_60.

Введение

Углеводородные газообразные соединения (УГС) – это углеводороды в газообразном состоянии при нормальных условиях: давлении $P = 101,3$ кПа и температуре $T = 293$ К. Для транспортировки (перевозки) УГС в различных физических состояниях – растворенном, сжатом или сжиженном – используются все виды транспорта, в работе акцент сделан на перевозке по железной дороге. Погрузка сжиженного углеводородного газа (СУГ) в 2025 г. составила 13,4 млн т [1], или 250–270 тыс. вагонов-цистерн (ВЦ). Основной объем доставки приходится на трубопроводный транспорт, однако существенную роль играют также морские, речные, автомобильные, авиа-

ционные и в определенном смысле космические перевозки.

При образовании углеводородо-воздушных смесей (УВС) они воспламеняются, если объемное содержание воздуха не более 13 %-об. в смеси, или диапазон воспламеняемости не менее 12 % независимо от нижнего предела воспламеняемости. Основные методы изложены в стандарте ИСО 10156:2017 [2]. Объектом настоящего исследования являются ИУГС – индивидуальные (стехиометрические) низкомолекулярные УГС с химической формулой C_xH_y , где индексы X, Y – числа атомов углерода и водорода в молекуле соответственно, целые натуральные числа, могут принимать значения: $X = 1, 2, 3, 4, 5$; $Y = 2, 4, 6, 8$,

10, 12. Минимальные значения $X = 0$ соответствуют водороду, $Y = 0$ – углероду (саже); значения $X > 5$ и $Y > 12$ – конденсированным при нормальных условиях УГС. Эти УГС, а также их смеси и фракции, имеющие не менее важное практическое значение, будут рассмотрены на следующих этапах работы.

В природе углеводороды встречаются в различных видах и состояниях, в том числе в виде газов нефтяных и газовых месторождений. Также к ним относят попутные нефтяные газы – смеси различных углеводородов, растворенных в нефти и выделяющихся в процессе ее добычи и перегонки. Актуальность темы исследования обусловлена тем, что УГС, играющим чрезвычайно важную роль в современной мировой экономике, в транспортном процессе, а также в промышленном и бытовом потреблении, свойственна опасность и высокий риск аварийных ситуаций. Объем добычи природных углеводородов контролируется международными организациями и составляет величину порядка $4 \cdot 10^{12}$ м³/год. Основными сферами применения являются:

- 1) традиционный относительно «экологически чистый» энергоноситель;
- 2) сырье для производства критически важных материалов, изделий и веществ, в том числе органических полимеров, азотных удобрений и компонентов смесевых взрывчатых веществ, технического углерода.

Низкомолекулярные УГС, газообразные и конденсированные, природные и синтетические, Комитетом экспертов ЭКОСОС ООН по перевозке опасных грузов [3], в соответствии с согласованной на глобальном уровне системой классификации и маркировки химических веществ, отнесены к опасным грузам класса 2 (газы), подкласса 2.1 (воспламеняющиеся газы). Наряду с полезными потребительскими свойствами, горючестью и высоким теплосодержанием углеводородные газы обладают способностью к взрыву, взрывчато-превращению в трудно контролируемых условиях. Проявление в транспортном процессе данного свойства представляет существенную опасность, что отражено в запрете розпуска ВЦ с такими грузами с сортировочных горок [4–6]. Запрет розпуска существенно снижает технико-экономические показатели работы сортировочных станций и усложняет эксплуатационную работу железных дорог.

Данная работа является продолжением исследований, проводимых в университете рабочей группой специалистов факультета УПП [7] в 2005–2010 гг. по договорам с ОАО «Российские железные дороги». В последующие годы предпринимались инициативные попытки анализа новых подходов [8, 9]. В настоящее время проблема не потеряла свою актуальность и привлекает внимание специалистов отрасли.

Материалы и методы исследования

Материалы и методы исследования основаны на методическом подходе, принятом, например, в работах [7, 10, 11] и оправдавшем себя в теоретическом и практическом планах, поскольку в них изложены принципы и алгоритмы, на которых базируются действующие нормы [5]. В свою очередь, метод основывается на системном анализе теории и практики управления безопасностью перевозок опасных грузов, прежде всего в части работы сортировочных станций по переработке отцепов и вагонов с запрещенными к розпуску грузами. Этот элемент системного анализа назван нами акцидентальной многофакторной компаративистикой, сущность которой заключается в следующем:

- 1) в изучении фактов, которые априори случайны: внешние условия не повторяются, их невозможно повторить в наиболее важных сущностных частях даже в условиях эксперимента;
- 2) в изучении типологии и повторяемости фактов.

В анализе мы исходим из формулы события:

$\{ОПС(T - t_0)[(ОГ = УГС) TC(T - t_0)] PC(T - t_0)\} ЧФ$,
где *ОПС* – окружающая природная среда; *ОГ* – опасный груз (*УГС*); *ТС* – транспортное средство; *ПС* – подвижной состав; $(T - t_0)$ – период времени от случившегося факта t_0 до момента рассмотрения T ; *ЧФ* – человеческий фактор.

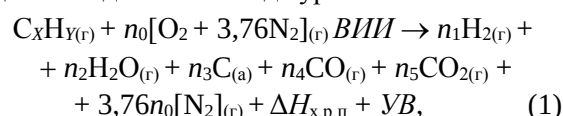
Управление безопасностью в данном случае – мониторинг штатного состояния основных факторов транспортного процесса.

Объект исследования выбран с учетом сложности, многофакторности и многокомпонентности задачи, которая в настоящей постановке не решена за последние десятилетия, несмотря на усилия и определенный технический прогресс, значительное число опубликованных

научно-технических работ. В рамках намеченной дорожной карты работы, которая, как мы полагаем, должна завершиться разработкой плана экспериментальных испытаний с включением плана оборудования станции, в качестве объекта исследования выбраны ИУГС, которым присвоен персонафицированный номер ООН (UN-number) [3]. Наличие номера означает широкую распространенность и практическую значимость этих веществ. Характеристика элементного состава и номера ООН совокупности таких грузов представлена в табл. 1. Показатель изомерии Z является характеристикой гомологических рядов углеводородов разного строения $C_xH_{2(x+Z)}$. К структурным особенностям гомологов относят: длину углеродной цепи, в которой атомы соединены σ -связями, изомерию цепи, замыкание цепи в цикл, наличие, число и положение кратных π -связей – двойных и тройных. Наличие кратных π -связей в молекуле свидетельствует о возможности спонтанной полимеризации, в связи с чем такие грузы перевозятся в защищенном, стабилизированном состоянии с указанием в надлежащем транспортном наименовании. На этот фактор имеет смысл обратить внимание: если производитель и отправитель имеет возможность стабилизировать УГС от полимеризации, то возникает вопрос возможности «стабилизации от возгорания и взрыва». Общее число теоретически возможных ИУГС при X от 1 до 5 составляет 28, из них 24 имеют практиче-

ское значение. Данные табл. 1 используются для исследования структурных зависимостей при изучении реакций УВС.

Модель взрыв – горение углеводородных соединений (МВГУГС) основывается на ключевых понятиях теории горения и взрыва газов [12]. Пределы и условия перехода горения УГС во взрыв и взрыва в горение трудно формализуемы, но могут быть установлены важные закономерности. Реакции взрыва и горения УВС – окислительно-восстановительные процессы, которые можно представить в общем объединенном виде уравнения



где (а), (г) – индексы агрегатного состояния вещества: аэрозольобразное (конденсированное) и газообразное; n_0 – стехиометрический коэффициент кислорода в химической реакции; $[O_2 + 3,76N_2]_{(r)}$ – обозначение воздушной среды в естественном соотношении основных компонентов (кислорода и азота); *VIII* – внешний источник инициирования; $n_1, n_2, \dots, n_5$ – стехиометрические коэффициенты (мольные доли) продуктов реакции; $\Delta H_{x.p.l}$ – энтальпия процессов химической реакции, соответствует энтальпии взрыва $\Delta H_{x.p.v}$ или горения $\Delta H_{x.p.g}$ соответственно; UB – ударная волна, образующаяся только в реакции взрыва, в реакции горения формальное условие: $UB = 0$.

Таблица 1

Таблица номеров ООН углеводородных газов, состав которых представлен в форме зависимости от числа атомов углерода в молекуле X и показателя изомерии Z

X	Z				
	+1	0	0-цикл	–1	–2
1	1971 1972	– ¹⁾	– ¹⁾	– ¹⁾	– ¹⁾
2	1035 1961	1038 1962	– ¹⁾	1001 3374 ⁴⁾	– ¹⁾
3	1978	1077	1027	1954 ⁴⁾ (пропин)	2200
4	1011 1966 ²⁾	1012 1055 ²⁾	2601	1010 2452	3161
5	1265 ³⁾ 2044	1108 ³⁾ 2459 ³⁾ 2460 ³⁾	1146 ³⁾	2371 ³⁾ 2561 ³⁾ 3295 ⁴⁾ (пентадиен-1,3)	1218 ³⁾

¹⁾ Соединение не существует по структурным причинам.

²⁾ Изомерия углеродной цепи.

³⁾ Отнесен к классу 3 (отличие, т. е. граница, между ИУГС классов 2 и 3 довольно условное в пределах решаемой задачи).

⁴⁾ Вещества, указанные в правилах, но отнесенные к номерам ООН обобщенных рубрик (обобщенные наименования, не указанные конкретно).

Взрыв УГС отличается от горения скоростью, он «быстрее». В рамках теоретических концепций Н. Н. Семенова – Я. Б. Зельдовича за счет высокой скорости разложения нарушается тепловой баланс теплоприход – теплоотдача, и тогда метастабильность молекул приводит к образованию взрывных газов, а они, в свою очередь, формируют ударную волну.

МВГУГС позволяет рассчитывать условия протекания процессов и моделировать их последствия на основе известных справочных данных, например [13]. Результаты моделирования условий перехода горения УГС во взрыв и взрыва в горение на основе [14], имеющих важное научное и практическое значение, будут представлены на следующем этапе исследований.

Результаты исследования

Применимость модели была продемонстрирована нами при обосновании разработки «Методики прогноза экологических последствий техногенных чрезвычайных ситуаций (пожаров и взрывов) с опасными грузами» [15]. МВГУГС строится на алгоритме – интерпретации уравнения (1), который учитывает первичные физико-химические процессы; в первом варианте не приняты в расчет вторичные процессы – окисление водорода и СО, ионизация и диссоциация азота и т. п., поскольку их вклад, вероятно, незначителен. Процесс реакции УВС инициируется ВИИ, причем в ряде случаев реакция протекает без кислорода [13, 16]: $n_0 = 0$. Определяем, что основными продуктами являются газообразные: водород – H_2 , вода – H_2O , углерод (сажа) – C (для упрощения представляется в аэрозольной форме $C_{(a)}$), углерода оксид (II) – СО и углерода оксид (IV) – CO_2 . Качественный и количественный состав продуктов зависит от состава углеводорода X, Y и состава УВС, характеризующегося коэффициентом n_0 . В рамках модели горение рассматривается как крайний вариант – «вырожденный» взрыв, при котором не образуется ударная волна ($VB = 0$) и энтальпия взрыва является энтальпией горения: $\Delta H_{x.p.l} = \Delta H_{x.p.g.}$. Из процессов горения также примем крайний случай «идеального» горения, при котором углеводород полностью, стехиометрически окисляется, не образуя каких-либо побочных продуктов. Коэффициенты, по сути мольные доли продуктов, n_1, n_2, n_3, n_4, n_5

взаимосвязаны и зависят от стехиометрии углеводорода X, Y и концентрационного фактора n_0 .

Последовательность изменения качественного и количественного состава продуктов в зависимости от доли ИУГС в УВС, или, иначе, от коэффициента n_0 , представлена на рис. 1. Согласно модели можно выделить четыре так называемые узловые точки (УТ), в которых преломляется «плавность» процесса. Первой узловой точкой УТ-1 отвечает $n_0 = 0$ (минимальное значение), при котором образуются два продукта в количестве XC и $0,5YH_2$. При малых значениях n_0 , между точками УТ-1 и УТ-2 продуктами реакции выступают вода $H_2O_{(r)}$, водород $H_{2(r)}$ и углерод $C_{(r)}$. По мере возрастания n_0 увеличивается доля воды и снижается доля H_2 до следующей узловой точки $n_0 = 0,5Y$. Между точками УТ-2 и УТ-3 ($n_0 = 0,5Y + X$) увеличение n_0 приводит к образованию СО за счет окисления сажи. Дальнейшее увеличение n_0 снижает долю СО и увеличивает долю CO_2 до предельного состояния – полного стехиометрического окисления углеводорода при горении, что отвечает УТ-4 при $n_0 = 0,5Y + 2X$ – условию «идеального» горения и максимальному значению кислорода при окислении.

Зависимости, приведенные на рис. 1, можно применить для оценки параметров горения и взрыва.

Следует учитывать, что в процессе (1) должен соблюдаться материальный, электронный и энергетический баланс (табл. 2). Элементы трансформируются в определенное количество форм: углерод (восстановитель) – в четыре, водород (восстановитель) – в три, кислород (окислитель) – в две, азот в одну неизменную форму. Окислительно-восстановительные (redox-) процессы протекают за счет поляризации и разрыва σ - и π -ковалентных связей $C-H$ и переноса электронов с восстановлением атомарного кислорода, как показано в табл. 2. Процессы образования атомарного углерода $C_{(a)}^-$ и молекулярного водорода H_2 происходят без переноса заряда и в электронном балансе не учитываются. Итоговое соотношение выражается уравнением

$$n_0 - n_5 - 0,5n_4 - 0,5n_1 = 0. \quad (2)$$

В табл. 3 представлены формулы расчета энергетического баланса по упрощенной формуле зависимости энтальпии химической

C_xH_Y	-1	-1	-1	-1
O_2	-0	-0.5Y	-0.5Y+X	-0.5Y+2X
CO_2	-0	-0	-0	-X
CO	-0	-	-	-
C	-X	-0	-0	-0
H_2O	-0	-0.5Y	-0.5Y	-0.5Y
H_2	-0.5Y	-0	-0	-0
n_0 , узловые точки	УТ-1 (мин.): $n_0 = 0$	УТ-2: $n_0 = 0.5Y$	УТ-3: $n_0 = 0.5Y + X$	УТ-4 (макс.): $n_0 = 0.5Y + 2X$

Рис. 1. Последовательность изменения концентрации исходных веществ качественного и количественного состава продуктов в зависимости от коэффициента n_0 в узловых точках в соответствии с МВГУС

Таблица 2

Соотношения материального элементного баланса процесса (1), электронного состояния элементов в соединениях, redox-процессов при горении и взрыве

Элемент	Число атомов	Результирующее число	Электронное состояние элементов	Redox-процессы
Углерод (C)	X	$X - (n_3 + n_4 + n_5) = 0$	$C_x^-H_Y$, C^0 , $C^{+2}O$, $C^{+4}O_2$	$n_5 C_x^- - 4n_5 e^- \rightarrow n_5 C^{+4}$ $n_4 C_x^- - 2n_4 e^- \rightarrow n_4 C^{+2}$ $C_x^- - 0e^- \rightarrow C^0$
Водород (H)	Y	$Y - (2n_1 + 2n_2) = 0$	C_xH_Y , $H_2^{+1}O$, H_2^0	$n_1 2H_Y - 2n_1 e^- \rightarrow n_1 H_2^{+1}$ $2H_Y - 0e^- \rightarrow H_2^0$
Кислород (O)	$2n_0$	$n_0 - (0,5n_1 + 0,5n_4 + n_5) = 0$	O_2^0 , H_2O^{-2} , CO^{-2} , CO_2^{-2}	$n_0 O_2^0 + 4n_0 e^- \rightarrow 2n_0 O^{-2}$
Азот (N)	$7,52n_0$	$7,52n_0 = \text{const}$	N_2^0	N_2^0

Таблица 3

Выражения для расчета энергетического баланса процесса (1) в первом приближении

Условие	Выражение для расчета энтальпии
Формула с учетом всех компонентов	$\Delta H_{x.p.n} = [n_1 \Delta H_{H_2(r)} + n_2 \Delta H_{H_2O(r)} + n_3 \Delta H_{C(a)} + n_4 \Delta H_{CO(r)} + n_5 \Delta H_{CO_2(r)}] - [\Delta H_{C_xH_Y(r)} + n_0 \Delta H_{O_2(r)}]$
Элементы с нулевой энтальпией	$\Delta H_{H_2(r)} = \Delta H_{C(a)} = \Delta H_{O_2(r)} = 0$
Результирующее значение	$\Delta H_{x.p.n} = n_2 \Delta H_{H_2O(r)} + n_4 \Delta H_{CO(r)} + n_5 \Delta H_{CO_2(r)} - 1 \Delta H_{C_xH_Y(r)}$

реакции $\Delta H_{x,p}$ от энтальпий образования $\Delta H_{298,f}^0$ всех компонентов: простых и сложных веществ, являющихся реагентами и продуктами реакции. Представляется, что на первом этапе для целей поиска закономерностей применения упрощенных формул может быть достаточно.

В нашем исследовании проверяется гипотеза о том, что пожаро- и взрывоопасность УГС, в том числе особенность формирования ударной волны, зависят от характера зависимости энтальпии процесса $\Delta H_{x,p}$ от энтальпии образования углеводорода, или, иными словами, энергии связей С–Н и С–С в молекуле. На рис. 2 представлены кривые корреляции энтальпии образования $\Delta H_{298,f}^0$ углеводородов C_xH_y [13] от числа атомов углерода X в гомологических рядах: 1 – алканы (предельные углеводороды); 2 – алкены (непредельные углеводороды, этилен-алканы); 3 – циклоалканы (циклические предельные углеводороды); 4 – алкины (ацетилен-алканы). Несмотря на то что представителей других рядов (алкадиенов, изоалканов, изоалкенов) единичные количества, целесообразно обращать внимание на их соответствие выявленным взаимодействиям между энтальпией и структурой.

Для всех соответствующих кривым 1–4 гомологических рядов характер изменения энтальпии аналогичен:

1) плавное, близкое к линейной зависимости снижение величины при возрастании числа углеродных атомов X ;

2) возрастание энтальпии при фиксированной величине X в случае уменьшения показателя изомерии Z (см. табл. 1) в последовательности: алканы $C_xH_{2(x+1)}$ – алкены C_xH_{2x} – циклоалканы C_xH_{2x} – алкины $C_xH_{2(x-1)}$. При этом наиболее близкие между собой значения энтальпий отвечают формуле C_xH_{2x} – алкены и циклоалканы. Характер кривых на рис. 2 свидетельствует о том, максимальная величина выделяемой энтальпии $\Delta H_{x,p}$ отвечает гомологическому ряду алканов (кривая 1) и увеличивается с ростом X . Изменение энтальпии образования $\Delta H_{298,f}^0$ в ряду от метана до бутана составляет: увеличение в 1,68 раза в кДж/моль и снижение в 2,15 удельной величины в кДж/г соответственно. Из чего следует, что термодинамический параметр сам по себе не открывает энергетику и опасность УГС в этом ряду при горении и взрыве. Такие же закономерности характерны и для кривых 2–4.

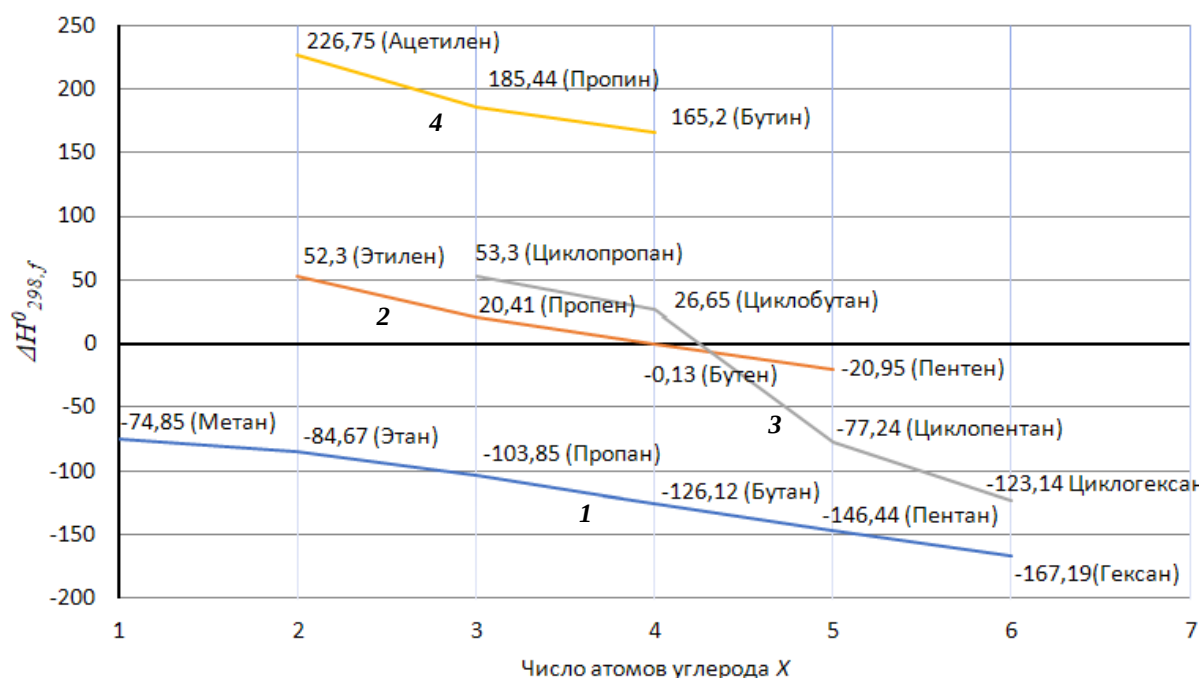


Рис. 2. Корреляция энтальпии образования $\Delta H_{298,f}^0$ углеводородов C_xH_y от числа атомов углерода X в гомологических рядах: 1 – алканы; 2 – алкены; 3 – циклоалканы; 4 – алкины

Характеристикой ударной волны, формируемой взрывными газами, является импульс действия S , зависящий от функции повышения давления во фронте во времени $P(t)$: $S = P(t)\Delta t$. Очевидно, что в газовых системах давление зависит прежде всего от повышения температуры ΔT , но, поскольку это «трудноуловимый» параметр, в модели перспективна оценка по классическим соотношениям, конечно весьма приближительная. Однако такое допущение применяется при «прочих постоянных условиях». Примем, что работа ударной волны $A_{УВ}$ пропорциональна S , зависит от ряда параметров (без учета временного фактора) по соотношению

$$A_{УВ} = F_1(S) = F_2(\Delta P) = F_3(\Delta N, \Delta H_{х.р.в}, C_p, M_m) = K \Delta N \Delta H_{х.р.в}^w C_p^{-1} M_m^{-1}, \quad (3)$$

где F_1, F_2, F_3 – функции зависимости $A_{УВ}$ от параметров УВС при взрыве: от импульса действия, повышения давления ΔP и характеристик взрывных газов соответственно; ΔN – изменение числа молей во взрывном процессе; $\Delta H_{х.р.в}$ – энтальпия взрывного процесса, кДж/моль; w – степень зависимости тепловой и механической энергии взрыва (принимается для простоты $w = 1$); C_p – изобарная теплоемкость газа, Дж/(моль·К); M_m – молекулярная масса газа, г/моль; K – коэффициент, служащий сведению теоретических и экспериментальных значений, моль³·К/(Дж·г).

Предложенное уравнение (3) будет использоваться нами для решения на дальнейших этапах работы следующих задач:

1) установление условий и закономерностей образования УВ;

2) определение относительной опасности УГС;

3) изучение размерного эффекта, т. е. пороговых значений объема и массы УГС, взрыв которого разрушает ВЦ, контейнеры-цистерны и другие объекты транспортной инфраструктуры.

Как уже было отмечено, ввиду очевидной сложности задачи она требует комплексного подхода, теоретических исследований и практической проработки. В практической части внимание следует уделить модели станции и роспуска вагонов с сортировочной горки; системам мониторинга технического состояния

подвижного состава, оборудованного поглощающими аппаратами автосцепок, датчиками соударения, температуры и давления груза; дезактивации и флегматизации УГС; активным и пассивным системам защиты, в том числе отражающим взрывную волну экранам и шумозащитным экранам [17]; квалификации и мотивированности персонала. Ранее проведенная нами оценка [8] ожидаемого экономического эффекта от внедрения одного организационно-технического предложения на внеклассной сортировочной станции составит порядка 2,7 млн р. (в ценах 2016 г.). Предстоит также определить величину снижения рисков развития техногенных чрезвычайных ситуаций на железнодорожном транспорте.

Выводы

1. Рассмотрены основания возврата к проблеме транспортирования и перевозки углеводородных газов – опасных грузов подкласса 2.1 в связи действующим запретом роспуска вагонов с ними и из-под них с сортировочных горок, заметно снижающим перерабатывающую способность и другие технико-экономические показатели работы железнодорожных станций.

2. В рамках намечаемой программы исследований по методу акцидентальной многофакторной компаративистики в качестве первого этапа рассмотрены структурные особенности всех 24 индивидуальных УГС, которым присвоены дискретные номера ООН. Предложены подходы к формированию модели взрыв – горение УГС, нуждающейся в валидации и верификации, теоретическое и практическое значение которой будет раскрываться в последующих работах. Исходя из законодательно закрепленных концепций разумной достаточности и приемлемого риска (менее 10^{-6}) в качестве результата детального исследования свойств перевозимых газов (разделение их на 3–4 группы по степени опасности), совершенствования конструкции вагонов и технологии роспуска можно ожидать поэтапную (3–4 этапа) отмену запрета роспуска на автоматизированных сортировочных горках. Экономия расходов на переработку составов существенно превысит затраты на пилотный проект.

Список источников

1. Железнодорожный транспорт. Погрузка СУГ в ЦС СУГ и ТК СУГ. Сжиженные углеводородные газы. Ежемесячный обзор. Транспорт. 2025. № 1 (1), ноябрь. URL: <https://spimex.com/upload/iblock/a00/9lo3bonp89gy9t6e2nvllins37bnm99q.pdf> (дата обращения: 27.01.2026).
2. ISO 10156:2017. Баллоны газовые. Газы и газовые смеси. Определение потенциальной способности к возгоранию и окислению для выбора выпускного отверстия вентиля баллона // Российский институт стандартизации : РСТ : [сайт]. URL: <https://nd.gostinfo.ru/document/6334948.aspx> (дата обращения: 27.01.2026).
3. Recommendations on the transport of dangerous goods. Model Regulations. Vol. I. Twenty-fourth revised edition. Geneva : United Nations, 2025. 480 p.
4. Правила перевозки опасных грузов : Приложение 2 к Соглашению о международном железнодорожном грузовом сообщении // Министерство транспорта Российской Федерации : [официальный сайт]. URL: <https://www.mintrans.ru/documents/8/4293> (дата обращения: 27.01.2026).
5. Минимальные нормы прикрытия вагонов с опасными грузами при постановке их в поезда и маневрах. Условия роспуска их с сортировочных горок / Совет по железнодорожному транспорту государств – участников Содружества. Москва : Транспорт, 2001. 262 с.
6. Правила безопасности при перевозке опасных грузов железнодорожным транспортом : утверждены Постановлением Госгортехнадзора РФ от 16.08.1994 № 50 : ред. от 20.06.2002. URL: <https://legalacts.ru/doc/pravila-bezopasnosti-pri-perevozke-opasnykh-gruzov-zheleznodorozhnykh/> (дата обращения: 27.01.2026).
7. Обоснование возможности изменения нормативов роспуска с сортировочных горок вагонов, загруженных опасными грузами / С. В. Карасев, А. А. Климов, В. И. Медведев [и др.] // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2005. № 12. С. 168.
8. Медведев В. И., Тесленко И. О., Казакова А. В. Пересмотр условий роспуска вагонов, загруженных опасными грузами с сортировочных горок // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2016. № 4 (39). С. 5–11.
9. Медведев В. И., Ощепков З. П., Карягин М. Е. К вопросу обеспечения безопасности перевозок сжиженных углеводородных газов в железнодорожных вагонах-цистернах // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения, 2018. № 4 (47). С. 49–57.
10. Тесленко И. О. Совершенствование условий перевозки опасных грузов на железнодорожном транспорте : специальность 05.22.08 «Управление процессами перевозок» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Тесленко Игорь Олегович ; Сибирский государственный университет путей сообщения. Новосибирск, 2002. 20 с.
11. Похилко С. П., Вихровская Л. И. Организация маневровой работы на технических станциях с вагонами, которые запрещено распускать с горки // Сборник научных трудов ДОНИЖТ. 2016. № 43. С. 59–64.
12. Иост В. Взрывы и горение в газах / перевод с немецкого А. Н. Воинова [и др.] ; под редакцией проф. А. В. Фроста. Москва : Издательство иностранной литературы, 1952. 688 с.
13. Корольченко А. Я., Корольченко Д. А. Пожаровзрывобезопасность веществ и материалов и средства их тушения : справочник : в 2 ч. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Пожнаука, 2004. URL: <https://ptm01.ru/firecategory/spravochnik/spravochnik.php> (дата обращения: 01.02.2026).
14. Азатян В. В. Законы химической кинетики в процессах горения, взрыва и детонации газов : монография / НИЦ «Курчатовский институт», Научно-исследовательский институт системных исследований РАН. Черноголовка : ФИЦ ПХФ и МХ РАН, 2025. 328 с.
15. Обоснование новой методики прогноза экологических последствий техногенных чрезвычайных ситуаций (пожаров и взрывов) с опасными грузами на железнодорожном транспорте / В. И. Медведев, С. А. Бессоноенко, М. Е. Корягин, М. Д. Сурков // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 3 (70). С. 40–48.
16. Таубкин И. С. Классификация веществ по их способности к взрывчатому превращению // ВИНТИ. Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. 1997. Вып. 11. С. 29–36.
17. Затухание шума на территории жилой застройки вблизи станции И при различных атмосферных состояниях / В. Л. Павлова, Е. А. Калиниченко, И. В. Пирумова, И. А. Селюнин // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 3 (70). С. 40–48.

References

1. Railway transport. Loading of LPG in the LPG Central Storage and LPG Transport Complex. Liquefied hydrocarbon gases. Monthly Review. *Transport*. Issue No. 1 (1) November 2025. (In Russ.). URL: <https://spimex.com/upload/iblock/a00/9lo3bonp89gy9t6e2nvllins37bnm99q.pdf>.

2. ISO 10156:2017 Gas cylinders. Gases and gas mixtures. Determination of fire potential and oxidizing ability for the selection of cylinder valve outlets. Russian Institute of Standardization: RST: [website]. (In Russ.). URL: <https://nd.gostinfo.ru/document/6334948.aspx>.
3. Recommendations on the transport of dangerous goods. Model Regulations. Volume I. Twenty-fourth revised edition. United Nations: Geneva, 2025. 480 p. ST/SG/AC.10/1/Rev.24 (Vol. I).
4. Rules for the transport of dangerous goods. Appendix 2 to the Agreement on International Railway Freight Traffic. Ministry of Transport of the Russian Federation: [official website]. (In Russ.). URL: <https://www.mintrans.ru/documents/8/4293>.
5. Minimum standards for covering wagons with dangerous goods when placing them in trains and during shunting. Conditions for their release from hump yards. *Council for Railway Transport of the CIS Member States*. Moscow: Transport; 2001. 262 p. (In Russ.). URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_00.
6. Safety rules for the transport of dangerous goods by rail. Approved by the Resolution of the State Committee for Industrial and Technical Supervision of the Russian Federation dated 16.08.1994 No. 50: as amended on 20.06.2002). (In Russ.). URL: <https://legalacts.ru/doc/pravila-bezopasnosti-pri-perevozke-opasnykh-gruzov-zheleznodorozhnym/>.
7. Karasev S. V., Klimov A. A., Medvedev V. I. [et al.]. Justification of the possibility of changing the norms for the rolling-out of wagons loaded with hazardous goods from hump yards. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2005. No. 12. P. 168. (In Russ.).
8. Medvedev V. I., Teslenko I. O., Kazakova A. V. Revision of the conditions for rolling out wagons loaded with hazardous goods from hump yards. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2016;(39):5–11. (In Russ.).
9. Medvedev V. I., Oshchepkov Z. P., Karyagin M. E. On the issue of ensuring the safety of transporting liquefied hydrocarbon gases in railway tank cars. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2018;(47):49–57. (In Russ.).
10. Teslenko I. O. Improvement of conditions for the transportation of hazardous cargo by rail: author's abstract of the dissertation ... for the degree of Candidate of Engineering: 05.22.08. Siberian Transport University. Novosibirsk; 2002. 20 p. (In Russ.).
11. Pokhilko S. P., Vikhrovskaya L. I., Organization of shunting operations at technical stations with cars that are prohibited from being sent down the hump. *Proceedings of DONIZhT*. 2016;(43):59–64. (In Russ.).
12. Iost V. Explosions and combustion in gases. Translated from German by A. N. Voinov [et al.]; Edited by Professor A. V. Frost. Moscow: Foreign Literature Publishing House; 1952. 688 p. (In Russ.).
13. Korolchenko A. Ya., Korolchenko D. A. Fire and explosion safety of substances and materials and means of their extinguishing. Handbook: in 2 parts. 2nd edition, revised and expanded. Moscow: Pozhnauka, 2004. (2 parts in one file). (In Russ.). URL: <https://ptm01.ru/firecategory/spravochnik/spravochnik.php>.
14. Azatyan V. V. Laws of chemical kinetics in the processes of combustion, explosion, and detonation of gases: Monograph. Research Center 'Kurchatov Institute', Research Institute of System Research of the Russian Academy of Sciences. Chernogolovka: FIC PFC and MH RAS, 2025. 328 p. (In Russ.).
15. Medvedev V. I., Bessonenko S. A., Koryagin M. E., Surkov M. D. Justification of a new methodology for forecasting the environmental consequences of man-made emergencies (fires and explosions) with dangerous goods on railway transport. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(70):40–48. (In Russ.).
16. Taubkin I. S. Classification of substances by their ability to explode. *VINITI. Problems of Safety in Emergency Situations*. 1997;11:29–36. (In Russ.).
17. Pavlova V. L., Kalinichenko E. A., Pirumova I. V., Selyunin I. A. Noise attenuation in residential areas near the I station under different atmospheric conditions. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(70):40–48. (In Russ.).

Информация об авторах

В. И. Медведев – доктор технических наук, профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Д. В. Ануфриев – аспирант Сибирского государственного университета путей сообщения.

М. Д. Сурков – инженер-конструктор ООО «ПК Дельта».

Information about the authors

V. I. Medvedev – Doctor of Engineering, Professor of the Life Safety Department, Siberian Transport University.

D. V. Anufriev – Postgraduate, Siberian Transport University.

M. D. Surkov – Design Engineer at PK Delta LLC.

Статья поступила в редакцию 31.03.2026; одобрена после рецензирования 30.04.2026; принята к публикации 05.05.2026.

The article was submitted 31.03.2026; approved after reviewing 30.04.2026; accepted for publication 05.05.2026.