

Научная статья

УДК 614.8.

doi: 10.34987/vestnik.sibpsa.2024.81.50.018

## Прогнозирование пожароопасных свойств сжиженного природного газа с использованием симплекс-решетчатых планов Шеффе

*Максим Андреевич Гудков<sup>1</sup>*

*Артем Александрович Гапеев<sup>1</sup>*

*Иван Александрович Тетерин<sup>1</sup>*

*Юлия Николаевна Коваль<sup>2</sup>*

*Евгений Сергеевич Герасименко<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, Москва, Россия

<sup>2</sup>Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Железногорск, Россия

<sup>3</sup>Воронежский институт МВД России, Воронеж, Россия

**Автор ответственный за переписку:** Максим Андреевич Гудков, [gidokmaksim@yandex.ru](mailto:gidokmaksim@yandex.ru)

**Аннотация.** Настоящая работа посвящена проблеме обеспечения пожарной безопасности на объектах хранения, транспортировки и потребления сжиженного природного газа (СПГ). Так как основной характеристикой природного газа в качестве топлива является его энергетическая ценность, то оценка пожаровзрывоопасных свойств должна выполняться с учетом энергетического показателя. В качестве пожароопасных свойств рассмотрены избыточное давление взрыва и концентрационные пределы распространения пламени, а в качестве энергетического – число Воббе. Данные характеристики зависят от состава СПГ, который может меняться в пределах основных горючих компонентов: метан, этан, пропан, бутан. В этой связи, практический интерес представляет собой получение зависимостей, которые позволяют находить наиболее оптимальные свойства в зависимости от состава.

Для решения поставленной задачи использовался метод оптимизации эксперимента симплекс-решетчатый план Шеффе третьего порядка с центральной точкой. Для его использования был упрощен состав, что обоснованно процентным содержанием основных горючих компонентов и их вкладом в исследуемые показатели.

В результате получена система уравнений, позволяющая прогнозировать энергетические и пожароопасные свойства СПГ в зависимости от состава. Показан пример расчета.

**Ключевые слова:** сжиженный природный газ, пожароопасные свойства, давление взрыва, число Воббе

**Для цитирования:** Гудков М.А., Гапеев А.А., Тетерин А.А., Коваль Ю.Н., Герасименко Е.С. Прогнозирование пожароопасных свойств сжиженного природного газа с использованием симплекс-решетчатых планов Шеффе // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2024. № 3 (34). С. 180-189. <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2024.81.50.018>.

Original article

## Prediction of fire hazard properties of liquefied natural gas using Scheffe simplex lattice plans

*Maxim A. Gudkov*<sup>1</sup>

*Artem A. Gapeev*<sup>1</sup>

*Ivan A. Teterin*<sup>1</sup>

*Yulia N. Koval*<sup>2</sup>

*Evgeniy S. Gerasimenko*<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Academy of the State Fire Service of EMERCOM of Russia, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Siberian Fire and Rescue Academy of EMERCOM of Russia, Zheleznogorsk, Russia

<sup>3</sup>Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Voronezh, Russia

**Corresponding author:** Maxim A. Gudkov, [gudokmaksim@yandex.ru](mailto:gudokmaksim@yandex.ru)

**Abstract.** This work is devoted to the problem of ensuring fire safety at facilities for storing, transporting and consuming liquefied natural gas (LNG). Since the main characteristic of natural gas as a fuel is its energy value, the assessment of fire and explosion hazard properties must be carried out taking into account the energy indicator. Excessive explosion pressure and concentration limits of flame propagation are considered as fire hazardous properties, and the Wobbe number is considered as energy properties. These characteristics depend on the composition of LNG, which can vary within the main combustible components: methane, ethane, propane, butane. In this regard, it is of practical interest to obtain dependencies that allow one to find the most optimal properties depending on the composition.

To solve the problem, the experiment optimization method was a simplex-lattice Scheffé design of the third order with a central point. For its use, the composition was simplified, which is justified by the percentage content of the main combustible components and their contribution to the studied indicators.

As a result, a system of equations was obtained that allows one to predict the properties of LNG depending on the composition. An example calculation is shown.

**Keywords:** liquefied natural gas, fire hazard properties, explosion pressure, Wobbe number

**For citation:** Gudkov M.A., Gapeev A.A., Teterin A.A., Koval Yu.N., Gerasimenko E.S. Prediction of fire hazardous properties of liquefied natural gas using simplex lattice Scheffe plans // Siberian Fire and Rescue Bulletin. 2024. № 3 (34). С. 180-189. (In Russ.) <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2024.81.50.018>.

### Введение

Совершенствование пожарной безопасности объектов сжиженного природного газа (СПГ) ставит все больше задач научному сообществу. Взрыв СПГ обладает своими уникальными характеристиками из-за особенностей формирования газовоздушного облака и условий его хранения [1,2]. Статистика аварийных выбросов СПГ в Российской Федерации отсутствует, однако об опасности можно судить по авариям, которые произошли за рубежом. Сценарий развития подобных происшествий можно рассмотреть на примере аварии в Китае (Рис.1). Взрывоопасность природного газа отмечена иностранными исследователями [3-5].



Рис.1. Авария с выбросом сжиженного природного газа [5]

Недавние исследования показали необходимость учета компонентного состава СПГ при оценке его пожаровзрывоопасных свойств [7-9], что объективно и не противоречит положению нормативных документов. Так, в ГОСТ Р 57431— 2017 «Газ природный сжиженный. Общие характеристики» (ISO 16903:2015 «Petroleum and natural gas industries - Characteristics of LNG, influencing the design, and material selection») отмечается, что основным компонентом СПГ является метан, однако для вычисления характеристик СПГ не следует использовать параметры чистого метана. В работе [9] экспериментально продемонстрирована линейная зависимость изменения избыточного давления взрыва, при изменении компонентного состава сжиженного природного газа, что позволило разработать дифференцированную методику определения избыточного давления взрыва СПГ. В работе [7] также экспериментально доказана правомерность применения правила Ле Шателье для определения концентрационных пределов распространения пламени (КПР) смеси паров СПГ с воздухом. Однако данные характеристики определяют пожаровзрывоопасные свойства, а основная характеристика, которая демонстрирует энергетическую ценность СПГ, является число Воббе, которое позволяет оценить взаимозаменяемость горючих газов в технологических процессах [10].

Для различных марок СПГ в Российской Федерации закреплены соответствующие предельные значения числа Воббе согласно ГОСТ 34894—2022 «Межгосударственный стандарт. Газ природный сжиженный. «Технические условия». При поставке сжиженного природного газа в иностранные государства энергосодержание СПГ может иметь другие пределы. Великобритания применяет обедненный газ. При этом могут возникнуть проблемы взаимозаменяемости СПГ в случае поставки более «жирного» СПГ. Япония и другие страны Азиатско-Тихоокеанского региона предпочитают «жирный» газ, который в случае поставок «тощего» газа несложно получить путем подмешивания СУГ к СПГ [11].

Таким образом, для практических целей имеет большое значение разработки подхода, который позволяет находить оптимальные соотношения компонентов сжиженного природного

газа как для характеристик пожаровзрывобезопасности, так и для энергетических характеристик СПГ.

Для решения поставленной задачи воспользуемся симплекс - решетчатым планом Шеффе третьего порядка с центральной точкой.

### Методика расчета и постановка задачи

Системы, свойства которых зависят только от соотношения компонентов и не зависят от количества смеси, а также от условий переработки и других факторов, называются системами «состав-свойство» или многокомпонентными смесями. В строительстве, химической технологии, литейном производстве часто приходится решать задачи подбора состава многокомпонентных смесей так, чтобы определенные свойства этих смесей принимали свои наилучшие возможные значения с учетом экономических требований.

Если известны теоретические зависимости свойств смеси и экономические требования, по которым производится выбор оптимального состава смеси, то формулируется задача оптимизации. Если же теоретических зависимостей свойств смеси и экономических критериев от компонентного состава нет, то на основе анализа априорной информации о характере этих зависимостей выбирается наиболее подходящий план экспериментов. Обычно в качестве таких планов выбираются симплекс-решетчатые композиционные и полукпозиционные планы [12]. Поскольку, как правило, на начальном этапе нет исчерпывающей информации о характере интересующих зависимостей, то из практических соображений следует начинать с применения планов для построения наиболее простых моделей. Далее проводятся эксперименты по выбранному плану [13]. Таким образом, факторное пространство представляет собой правильный  $(q - 1)$  – мерный симплекс, для которого выполняется соотношение (1):

$$\sum_{i=1}^q x_i = 1 \quad (1)$$

где:  $x_i \geq 0$  – концентрация компонента;

$q$  – количество компонентов.

Для упрощения задачи рассмотрим систему из наиболее содержательных горючих компонент СПГ: метан, этан, пропан (на практике при необходимости количество компонентов смеси может быть увеличено, однако для вопросов пожарной безопасности другие горючие компоненты могут быть включены в пропан). Кроме того, состав негорючих веществ не является постоянной величиной, из чего следует рассматривать наиболее пожаровзрывоопасный сценарий, который характеризуется наличием только горючих компонент.

Для рассматриваемой системы  $q = 3$  (метан, пропан, этан) и будет представлять собой правильный симплекс – равносторонний треугольник, в котором каждая точка треугольника отвечает одному определенному составу тройной системы. Вершины треугольника соответствуют чистым веществам, стороны – двойным системам. Опустив из каждой вершины треугольника высоту, разделив каждую из них на десять равных по величине отрезков и проведя через полученные деления прямые, параллельные сторонам треугольника, получим треугольную сетку (Рис.2).

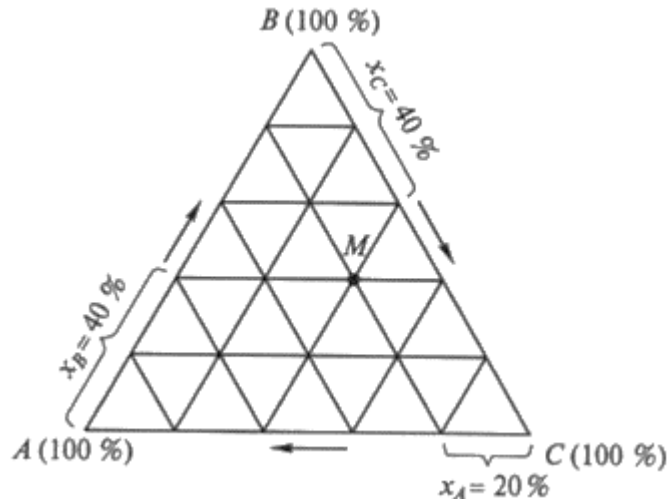


Рис.2. Концентрационный треугольник

Экспериментальные точки представляют  $\{q, n\}$  – решетку на симплексе, где  $n$  – степень полинома,  $q$  – количество компонентов, по каждому из которых имеется  $(n+1)$  - одинаково расположенных уровней  $x_i=0, 1/n, 2/n, \dots, 1$  и берутся все возможные комбинации с такими значениями концентраций компонентов. Для кубической степени полинома ( $n = 3$ ) будут следующие уровни: 0, 1/3, 2/3, 1, тогда матрица планирования примет вид (Табл.1):

Табл.1. – Матрица планирования для диаграмм «состав-свойство»

| N  | X <sub>1</sub> | X <sub>2</sub> | X <sub>3</sub> | УКПР | УВЗР | УВ    |
|----|----------------|----------------|----------------|------|------|-------|
| 1  | 1,0            | 0              | 0              | 5,00 | 676  | 48,18 |
| 2  | 0              | 1              | 0              | 2,50 | 751  | 62,93 |
| 3  | 0              | 0              | 1              | 2,00 | 740  | 74,87 |
| 4  | 1/3            | 2/3            | 0              | 3,00 | 726  | 58,41 |
| 5  | 1/3            | 0              | 2/3            | 2,50 | 719  | 67,14 |
| 6  | 0              | 1/3            | 2/3            | 2,14 | 744  | 71,12 |
| 7  | 2/3            | 1/3            | 0              | 3,75 | 701  | 53,53 |
| 8  | 2/3            | 0              | 1/3            | 3,33 | 697  | 58,41 |
| 9  | 0              | 2/3            | 1/3            | 2,30 | 747  | 67,14 |
| 10 | 1/3            | 1/3            | 1/3            | 2,73 | 722  | 62,92 |

Как было сказано выше, основной энергетической характеристикой СПГ является число Воббе. Пожароопасные характеристики будем привязывать к данному показателю. Построим треугольный симплекс для чисел Воббе метана, этана и пропана. Значения чисел Воббе рассчитали с помощью онлайн калькулятора [14]. Для описания свойств выбираем следующие функции отклика: концентрационные пределы распространения пламени – УКПР; давление взрыва – УВЗР; число Воббе – УВ, которые будем описывать с помощью приведенного полинома, полученного с учетом нормированности сумм независимых переменных [15] (2):

$$y = \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \beta_3 \cdot x_3 + \beta_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + \beta_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + \beta_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + \gamma_{12} \cdot x_1 \cdot x_2(x_1 - x_2) + \gamma_{13} \cdot x_1 \cdot x_3(x_1 - x_3) + \gamma_{23} \cdot x_2 \cdot x_3(x_2 - x_3) + \gamma_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (2)$$

где  $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_{12}, \beta_{13}, \beta_{23}, \gamma_{12}, \gamma_{13}, \gamma_{23}, \gamma_{123}$  – коэффициенты полинома.

Результаты экспериментов обрабатываются методом наименьших квадратов и строятся математические модели.

## Результаты и их обсуждение

Для установления вида степенной зависимости проводим дисперсионный анализ по каждой функции отклика:

**Табл.2. – результаты дисперсионного анализа для функции отклика – КПР**

| Модель         | SS<br>Эффект | сс<br>Эффект | MS<br>Эффект | SS<br>Ошибка | сс<br>Ошибка | MS<br>Ошибка | F        | p        | R-Кв.    | R-Кв.<br>Испр. зн |
|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------|----------|----------|-------------------|
| Лин-ая         | 6,942        | 2            | 3,471        | 0,475        | 7            | 0,067        | 51,101   | 0,000067 | 0,935899 | 0,917585          |
| Квадратич      | 0,457610     | 3            | 0,152537     | 0,017867     | 4            | 0,004467     | 34,15000 | 0,002614 | 0,997591 | 0,994580          |
| Спец. Кубич    | 0,0023       | 1            | 0,0023       | 0,0155       | 3            | 0,0051       | 0,450    | 0,5500   | 0,997    | 0,993             |
| Куб-ая         | 0,015533     | 3            | 0,005178     | 0,0          | 0            | 0,00         |          |          | 1,0      | 1,00              |
| Общее испр.зн. | 7,417650     | 9            | 0,824183     |              |              |              |          |          |          |                   |

**Табл.3. – результаты дисперсионного анализа для функции отклика – давление взрыва**

| Модель        | SS<br>Эффект | сс<br>Эффект | MS<br>Эффект | SS<br>Ошибка | сс<br>Ошибка | MS<br>Ошибка | F        | p        | R-Кв.    | R-Кв.<br>Испр.зн |
|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------|----------|----------|------------------|
| Лин-ая        | 5479,600     | 2            | 2739,800     | 0,500000     | 7            | 0,071429     | 38357,20 | 0,000000 | 0,999990 | 0,999883         |
| Квадратич     | 0,043        | 3            | 0,014        | 0,457143     | 4            | 0,114286     | 0,13     | 0,940490 | 0,999991 | 0,999812         |
| Спец. Кубич   | 0,076        | 1            | 0,076        | 0,380952     | 3            | 0,126984     | 0,60     | 0,495025 | 0,999993 | 0,999791         |
| Куб-ая        | 0,381        | 3            | 0,127        | 0,000000     | 0            | 0,000000     |          |          | 1,000000 | 1,000000         |
| Общее испр.зн | 5480,100     | 9            | 608,900      |              |              |              |          |          |          |                  |

**Табл.4. – результаты дисперсионного анализа для функции отклика – число Воббе**

| Модель         | SS<br>Эффект | сс<br>Эффект | MS<br>Эффект | SS<br>Ошибка | сс<br>Ошибка | MS<br>Ошибка | F        | p        | R-Кв.    | R-Кв.<br>Испр. зн |
|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------|----------|----------|-------------------|
| Лин-ая         | 587,8544     | 2            | 293,9272     | 1,854637     | 7            | 0,264948     | 1109,377 | 0,000000 | 0,996855 | 0,995956          |
| Квадратич      | 1,8415       | 3            | 0,6138       | 0,013181     | 4            | 0,003295     | 186,274  | 0,000094 | 0,999978 | 0,999950          |
| Спец. Кубич    | 0,0003       | 1            | 0,0003       | 0,012883     | 3            | 0,004294     | 0,069    | 0,809399 | 0,999978 | 0,999934          |
| Куб-ая         | 0,0129       | 3            | 0,0043       | 0,000000     | 0            | 0,000000     |          |          | 1,000000 | 1,000000          |
| Общее испр.зн. | 589,7091     | 9            | 65,5232      |              |              |              |          |          |          |                   |

На основании полученных результатов делаем заключение, что по выбранным функциям отклика, зависимость от соотношения компонентов имеет линейный вид:

$$y_{\text{КПР}} = 4,553 \cdot x_1 + 2,419 \cdot x_2 + 1,803 \cdot x_3 \quad (1)$$

$$y_{\text{ВЗР}} = 675,9 \cdot x_1 + 750,9 \cdot x_2 + 740,1 \cdot x_3 \quad (2)$$

$$y_{\text{В}} = 48,913 \cdot x_1 + 63,027 \cdot x_2 + 75,455 \cdot x_3 \quad (3)$$

Ниже представлены тернарные графики по уравнениям (1)-(3):

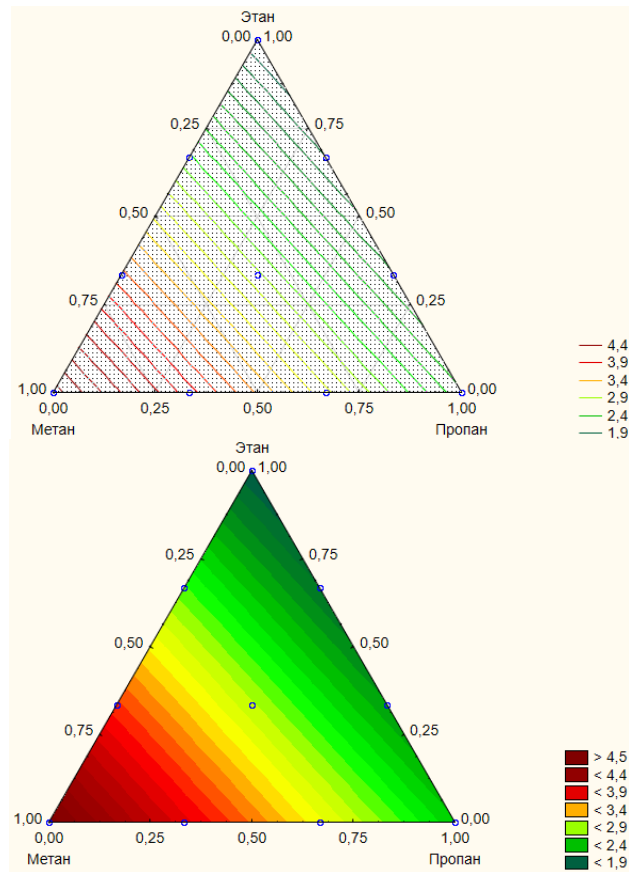
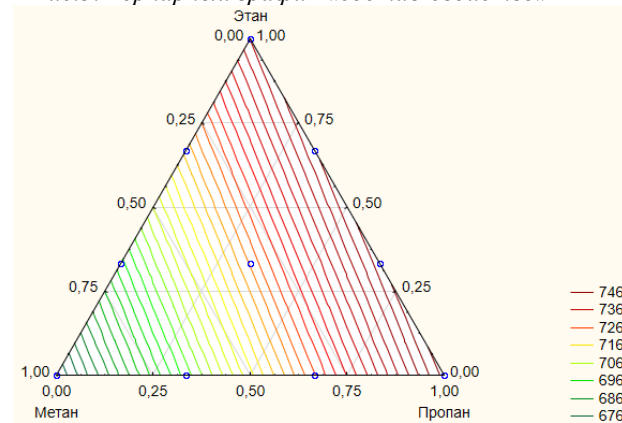


Рис.3. Тернарный график «состав-свойство» КПР



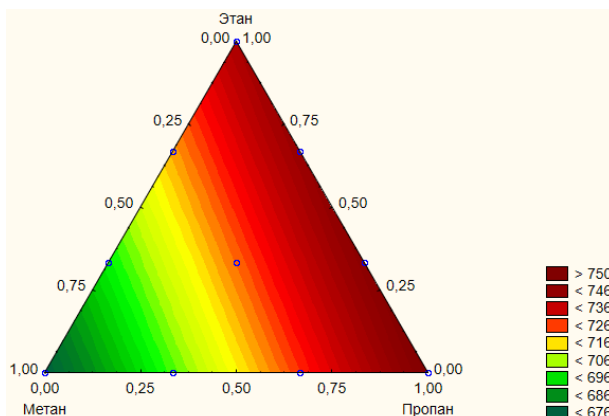


Рис.4. Тернарный график «состав-свойство» давление взрыва

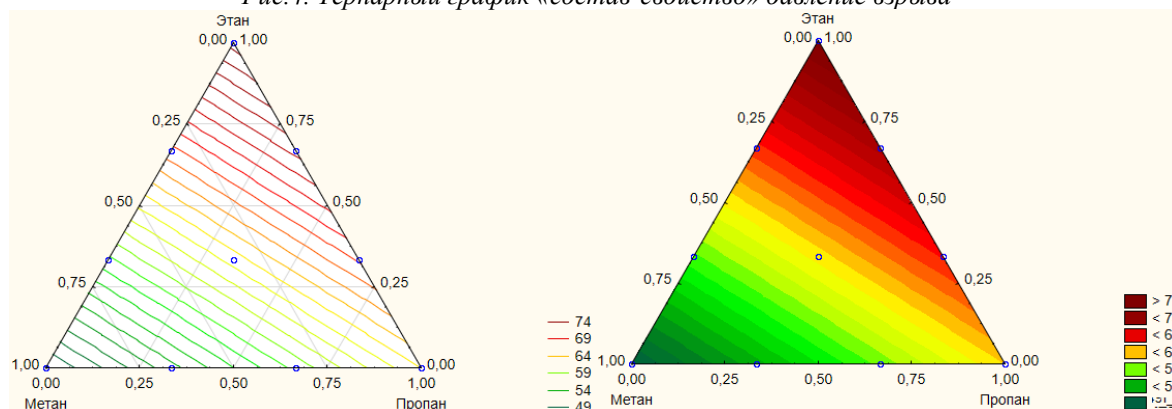


Рис.5. Тернарный график «состав-свойство» число Воббе

Используя выражения (1)-(3) получаем систему уравнений (4):

$$\begin{cases} y_1 = 4,553 \cdot x_1 + 2,419 \cdot x_2 + 1,803 \cdot x_3 \\ y_2 = 675,9 \cdot x_1 + 750,9 \cdot x_2 + 740,1 \cdot x_3 \\ y_3 = 48,913 \cdot x_1 + 63,027 \cdot x_2 + 75,455 \cdot x_3 \end{cases} \quad (4)$$

Полученная система (4) позволяет получать требуемые параметры, по выбранным функциям отклика, в зависимости от состава. Например, необходимо чтоб состав СПГ отвечал следующим требованиям: КПП=4,1;  $P_{взр.}=700$ ; число Воббе = 53. Тогда (4) примет вид:

$$\begin{cases} 4.1 = 4,553 \cdot x_1 + 2,419 \cdot x_2 + 1,803 \cdot x_3 \\ 700 = 675,9 \cdot x_1 + 750,9 \cdot x_2 + 740,1 \cdot x_3 \\ 53 = 48,913 \cdot x_1 + 63,027 \cdot x_2 + 75,455 \cdot x_3 \end{cases} \quad (5)$$

Решив (5), получим  $x_1=0.78$ ,  $x_2=0.19$ ,  $x_3=0.03$ . При этом необходимо отметить, что указанные соотношения представлены в нормированном виде, который отвечает физическому, что не требует производить дополнительные пересчеты. Тогда получаем, что требуемые показатели будут достигнуты при соотношении метан 78 %, этан 19 %, пропан 3 %.

## Вывод

На основании анализа состава сжиженного природного газа различных марок СПГ продемонстрировано изменение его пожаровзрывоопасных свойств в широких диапазонах, что отражает необходимость дифференциации требований пожарной безопасности к объектам, где обращается сжиженный природный газ. Показана необходимость поиска подхода, который бы позволял совмещать требования пожарной безопасности с требованиями к энергетическому показателю СПГ.

Использование системы уравнений «состав-свойство» позволило оценить пожаровзрывоопасные характеристики СПГ для различных составов, что дало возможность



дифференцированно подходить к вопросам обеспечения безопасности при эксплуатации и хранения сжиженного природного газа. Кроме того, применение симплекс-решетчатого плана Шеффе решило задачу поиска оптимального состава СПГ, который отвечает заданным параметрам пожаровзрывоопасных и энергетических свойств: избыточного давления взрыва, концентрационных пределов распространения пламени, число Воббе.

#### Список источников

1. Шебеко А.Ю. Численное моделирование распространения паров сжиженного природного газа при проливе на твердую поверхность // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2019. № 1. С. 36-41. DOI: 10.25257/FE.2019.1.36-41 EDN: AJEVEU.
2. Горбачев С.П., Медведков И.С. Изменение компонентного состава СПГ при его длительной транспортировке и хранении, методы кондиционирования // Газовая промышленность. 2018. № 10 (775). С. 56-66.
3. Ван К., Лю З., Цянь Х., Ли М. и Хуан П. (2016). Сравнительное исследование распространения взрывной волны при взрывах облаков паров природного газа в открытом пространстве на основе полномасштабного эксперимента и PHAST. Энергия и топливо, 30(7), 6143–6152.
4. Ян С., Сан В., Фан Цюй, Ян Я., Ся Цюй, Бао Ци. Исследование практической модели нагрузки при взрыве природного газа в неограниченном пространстве // Журнал по безопасности, науке и устойчивости, т. 3, выпуск 3, 2022, стр. 209-221.
5. Джонс Дж.К., 2015. Феноменология взрыва сжиженного природного газа. J. Loss Prev. Process Ind. 38, 233.
6. В Китае мощным взрывом разорвало цистерну со сжиженным газом // сайт. – URL: <https://rutube.ru/video/5144871479e63179d09e2cea984bd577/> (дата обращения: 05.05.24).
7. Тетерин И.А., Сулименко В.А., Гудков М.А., Гафарова Э.Б. Определение параметров взрыва смеси горючих газов. В сборнике: Гражданская оборона на страже мира и безопасности. Материалы VII Международной научно-практической конференции, посвященной Всемирному дню гражданской обороны в Год 90-летия со дня образования Академии ГПС МЧС России. В 5-ти частях. Москва, 2023. С. 212-215. - URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50439068> (дата обращения: 05.03.24).
8. Тетерин И.А., Копылов П.С., Копылов С.Н. [и др.] Концентрационные пределы распространения пламени сжиженного природного газа // Безопасность труда в промышленности. – 2024. – № 1. – С. 21-27. - URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=60023243> (дата обращения: 05.03.24).
9. Тетерин И.А., Копылов П.С., Сулименко В.А., Копылов С.Н. Определение взрывоопасности сжиженного природного газа // Безопасность труда в промышленности. 2023. № 8. С. 70-76. - URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54398925> (дата обращения: 05.03.24).
10. Мальгинова Н.А., Корчагина Е.Н., Казарцев Я.В. Перспективы разработки стандартных образцов числа Воббе // Эталон. Стандартные образцы. 2023. Т. 19, № 1. С. 5–15. - URL: <https://www.rmjournal.ru/jour/article/view/377/273> (дата обращения: 05.03.24).
11. Гречко А.Г. Определение качества и количества сжиженного природного газа на зарубежных приемных терминалах // Научный журнал Российского газового общества. 2023. № 4(40). С. 74–84. - URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54950933> (дата обращения: 05.03.24).
12. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Огарков Б.Л. Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ. – Киев: Выща школа, 1989. – 326 с.
13. Ахмадиев Ф.Г., Гильфанов Р.М. Математическое моделирование и оптимизация «состав-свойство» многокомпонентных смесей // Известия КГАСУ, 2012, № 2 (20). - URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=patadh> (дата обращения: 05.03.24).
14. Расчет теплотворной способности и числа Воббе природного газа при стандартных условиях // сайт. – URL: <https://gidrotgv.ru/raschet-teplotvornoj-sposobnosti-i-chisla-vobbe-prirodnogo-gaza-pri-standartnyh-usloviyah/> (дата обращения: 05.03.24).
15. Ахназарова С.А. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии [Текст]: [Учеб. пособие для хим.-технол. спец. вузов]. - Москва: Высш. школа, 1978. - 319 с.

## References

1. Shebeko A.Yu. Numerical modeling of liquefied natural gas vapor spread when spilt on a hard surface. *Pozhary i chrezvychaynyye situatsii: predotvrashcheniye, likvidatsiya – Fire and emergencies: prevention, elimination*, 2019, no. 1 pp. 36–41. DOI:10.25257/FE.2019.1.36-41.
2. Gorbachev S.P., Medvedkov I.S. Changes of component composition of liquefied natural gas during its long-term transportation and storage, conditioning methods. *Gazovaia promyshlennost' – Gas industry*. 2018, №. 10(775), pp. 56–66 (in Russ.).
3. Wang K., Liu Z., Qian X., Li M., Huang P. (2016). Comparative Study on Blast Wave Propagation of Natural Gas Vapor Cloud Explosions in Open Space Based on a Full-Scale Experiment and PHAST. *Energy & Fuels*, 30(7), 6143–6152.
4. Yang S., Sun W., Fang Q., Yang Ya., Xia C., Bao Qi. Investigation of a practical load model for a natural gas explosion in an unconfined space // *Journal of Safety Science and Resilience*, Vol. 3, Issue 3, 2022, pp 209-221.
5. Jones J.C., 2015. The explosion phenomenology of liquefied natural gas. *Loss Prev. J. Process Ind.* 38, 233.
6. In China, a liquefied gas tank exploded with a powerful explosion // website. – URL: <https://rutube.ru/video/5144871479e63179d09e2cea984bd577/> (date of access: 05/05/24).
7. Teterin I.A., Sulimenko V.A., Gudkov M.A., Gafarova E.B. Determination of explosion parameters of a mixture of flammable gases. In the collection: Civil defense for the protection of peace and security. Materials of the VII International Scientific and Practical Conference dedicated to World Civil Defense Day in the Year of the 90th anniversary of the formation of the State Fire Service Academy of the Ministry of Emergency Situations of Russia. In 5 parts. Moscow, 2023. pp. 212-215. - URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50439068> (access date: 03/05/24).
8. Teterin I.A., Kopylov P.S., Kopylov S.N. [and others] Concentration limits of flame propagation of liquefied natural gas // *Labor safety in industry*. – 2024. – №. 1. – P. 21-27. - URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=60023243> (access date: 03.05.24).
9. Teterin I.A., Kopylov P.S., Sulimenko V.A., Kopylov S.N. Determination of the explosion hazard of liquefied natural gas // *Labor safety in industry*. 2023. №. 8. P. 70-76. - URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54398925> (access date: 03.05.24).
10. Malginova N.A., Korchagina E.N., Kazartsev Ya.V. Prospects for the development of standard samples of the Wobbe number // *Standards. Standard samples*. 2023. T. 19, №. 1. P. 5–15. - URL: <https://www.rmjournal.ru/jour/article/view/377/273> (date of access: 03.05.24).
11. Grechko A.G. Determination of the quality and quantity of liquefied natural gas at foreign receiving terminals // *Scientific Journal of the Russian Gas Society*. 2023. №. 4(40). pp. 74–84. - URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54950933> (access date: 03.05.24).
12. Voznesensky V.A., Lyashenko T.V., Ogarkov B.L. Numerical methods for solving construction and technological problems on a computer. – Kyiv: Vyshcha School, 1989. – 326 p.
13. Akhmadiev F.G., Gilfanov R.M. Mathematical modeling and optimization of “composition-property” of multicomponent mixtures // *News of KGASU*, 2012, №. 2 (20). - URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=patadh> (access date: 03.05.24).
14. Calculation of the calorific value and Wobbe number of natural gas under standard conditions // website. – URL: <https://gidrotgv.ru/raschet-teplotvornoj-sposobnosti-i-chisla-vobbe-prirodnogo-gaza-pri-standartnyx-usloviyax/> (date of access: 03.05.24).
15. Akhnazarova S.A. Optimization of experiments in chemistry and chemical technology [Text]: [Textbook. manual for chemical technology. specialist. universities]. - Moscow: Higher. school, 1978. - 319 p.

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 27.07.2024, одобрена после рецензирования 20.08.2024, принята к публикации 30.08.2024.

The article was submitted 27.07.2024, approved after reviewing 20.08.2024, accepted for publication 30.08.2024.