

Научная статья  
УДК 614.841.12  
doi:10.34987/vestnik.sibpsa.2025.95.51.011

## Анализ методов расчета площади разлива и высоты факела пламени горючих жидкостей

**Екатерина Владимировна Радова**

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

<https://orcid.org/0000-0003-4687-6692>

*Автор, ответственный за переписку:* Екатерина Владимировна Радова, [radova\\_ev@mail.ru](mailto:radova_ev@mail.ru)

**Аннотация.** Статья посвящена комплексному анализу методик прогнозирования площади разлива и высоты факела пламени при авариях с горючими жидкостями, сопровождающихся полным разрушением резервуаров. Актуальность исследования обусловлена катастрофическими последствиями таких аварий, включая крупномасштабные пожары, экологический ущерб и риск реализации каскадного «эффекта домино», а также появлением новых угроз, таких как атаки беспилотных летательных аппаратов, исключая стадию задержки воспламенения. Цель работы — оценка точности и согласованности существующих нормативных, справочных и расчетных методик определения ключевых параметров пожара пролива. В качестве объекта исследования выбран сценарий полного разрушения типового вертикального стального резервуара РВС-10000 с веществом нонаном в условиях Санкт-Петербурга с учетом повышенной температуры воздуха и ветровой нагрузки.

Проведен сравнительный анализ восьми методик расчета площади пролива и пяти методик расчета высоты факела, регламентированных российскими и международными стандартами. Результаты расчетов демонстрируют высокий разброс значений, что указывает на превышение диапазонов применимости многих моделей для крупномасштабных аварий.

Для верификации результатов выполнено численное моделирование в программном комплексе Fire Dynamics Simulator. Полученные данные с помощью компьютерного моделирования результаты в 3–5 раз ниже результатов большинства методик.

Сделан вывод о расхождении существующей нормативной базы и необходимости ее пересмотра и валидации на основе современных методов компьютерного моделирования и лабораторных экспериментов для разработки достоверных методик оценки рисков и планирования противопожарных мероприятий.

**Ключевые слова:** площадь разлива, высота факела пламени, резервуар, горючие жидкости, пожар, промышленная безопасность, «эффект домино»

**Для цитирования:** Радова Е.В. Анализ методов расчета площади разлива и высоты факела пламени горючих жидкостей / Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2025. № 4 (39). С. 170-181. <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2025.95.51.011>.

Original article.

## Analysis of methods for calculating the spill area and the height of the flame of flammable liquids

**Ekaterina V. Radova**

*Saint-Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Saint Petersburg, Russia*

<https://orcid.org/0000-0003-4687-6692>

**Corresponding author:** Ekaterina V. Radova, e-mail: [radova\\_ev@mail.ru](mailto:radova_ev@mail.ru)

**Abstract.** The article is devoted to a comprehensive analysis of methods for predicting the spill area and flame flare height in accidents involving flammable liquids accompanied by the complete destruction of tanks. The relevance of the study is due to the catastrophic consequences of such accidents, including large-scale fires, environmental damage and the risk of a cascading «domino effect» as well as the emergence of new threats such as attacks by unmanned aerial vehicles that exclude the stage of delayed ignition. The purpose of the work is to assess the accuracy and consistency of existing regulatory, reference and calculation methods for determining key parameters of a strait fire. The scenario of complete destruction of a typical vertical steel tank RVS-10000 with the substance nonane in the conditions of St. Petersburg, taking into account the increased air temperature and wind load, was chosen as the object of research.

A comparative analysis of eight methods for calculating the area of the strait and five methods for calculating the height of the flare, regulated by Russian and international standards, was carried out. The calculation results show a high range of values, which indicates that the ranges of applicability of many models for large-scale accidents are exceeded.

To verify the results, numerical simulation was performed in the Fire Dynamics Simulator software package. The results obtained using computer modeling are 3-5 times lower than the results of most methods.

The conclusion is drawn about the discrepancy between the existing regulatory framework and the need for its revision and validation based on modern methods of computer modeling and laboratory experiments to develop reliable methods for risk assessment and planning fire protection measures.

**Keywords:** the spill area, the flame height, reservoir, flammable liquids, fire, industrial safety, «domino effect»

**For citation:** Radova E.V. Analysis of methods for calculating the spill area and the height of the flame of flammable liquids // Siberian Fire and Rescue Bulletin. 2025. № 4 (39). С. 170-181. (In Russ.) <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2025.95.51.011>.

### Введение

Аварии на объектах хранения углеводородов, сопровождающиеся полным разрушением резервуаров, остаются одной из наиболее значимых проблем промышленной и экологической безопасности. Исходя из проведенного анализа пожаров за последние десять лет, сделан вывод, что в период с 2022 года произошло увеличение случаев пожаров, связанных с атаками беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), которые кардинально меняют структуру рисков, исключая этап задержки воспламенения и увеличения площади горения проливов [1].

Возникающие в результате таких инцидентов разливы нефтепродуктов приводят к катастрофическим последствиям, включая масштабные пожары, загрязнение окружающей среды и угрозу жизни населения. Особую опасность представляют испарения легких фракций углеводородов, образующие с воздухом взрывоопасные смеси, способные детонировать на значительных расстояниях от места аварии. В условиях постоянного роста промышленных мощностей и увеличения объемов хранения углеводородов актуальность разработки точных методов прогнозирования параметров аварий пожаров становится критически важной для обеспечения промышленной и экологической безопасности.

Нарушение герметичности резервуара, содержащего углеводороды, провоцирует аварийное истечение продукта с образованием пролива сложной геометрической формы. Динамика растекания жидкости определяется комплексом факторов: реологическими свойствами продукта, рельефом местности, наличием обвалования и технологических преград. Последующее испарение жидкости с формированием горючей парогазовой смеси приводит к воспламенению, которое в современных условиях может быть практически мгновенным. Процесс переходит в режим турбулентного диффузионного горения с образованием открытого факела пламени, характеризующегося устойчивым конвективным потоком и значительным тепловым излучением. Как отмечают исследователи «турбулизация пламени при пожаре сказывается на процессах теплового и массового переноса, обуславливает пульсационный характер протекания горения» [2]. Это подтверждает влияние турбулентности на ключевые параметры пожара, такие как высота факела, особенно в условиях новых угроз, исключая стадию задержки воспламенения.

Основным показателем, определяющим опасность такого факела, является его высота, которая напрямую влияет на: величину теплового потока в окружающее пространство, зону возможного воспламенения соседних объектов, эффективность тактики пожаротушения [3]. Высота факела является функцией физико-химических свойств горючего и параметров пролива. Основные факторы, влияющие на высоту факела пламени приведены на Рис. 1.

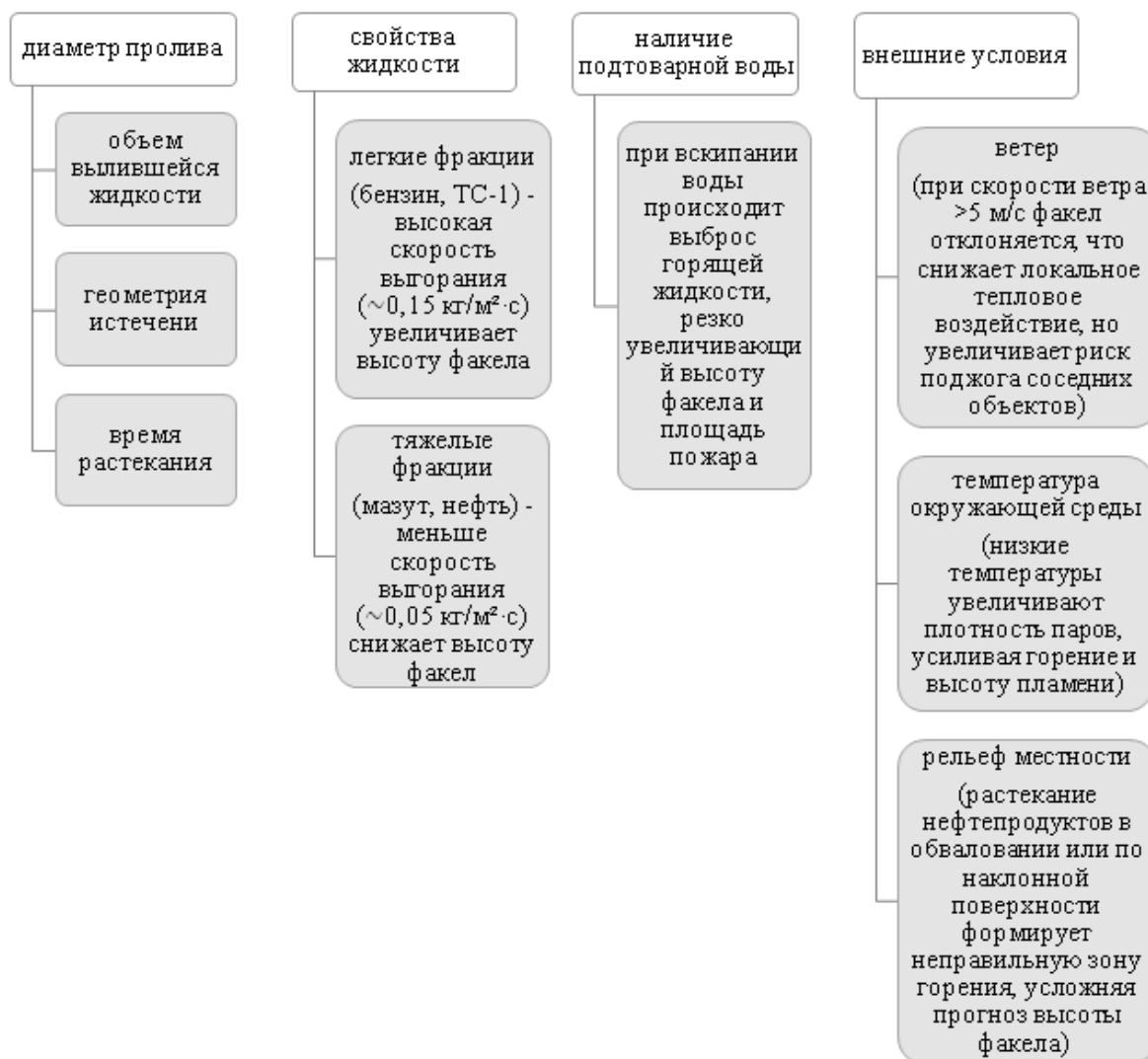


Рис. 1. Схема основных факторов, влияющих на высоту факела пламени

В резервуарных парках с малыми противопожарными разрывами ( $<0,5D$ ) локальный высокотемпературный факел пламени оказывает тепловое воздействие на соседние резервуары (эффект «домино») [4]. Это вызывает, прогрев стенок резервуаров с последующим снижением прочности стали и нарушением герметичности, а также вскипание «холодного слоя» жидкости при достижении температуры вспышки. Вскипание при достижении концентрации паров, способной к воспламенению, приводит к взрыву паровоздушной смеси с разрушением резервуара. Возникающий процесс - эффект «домино» будет цепным, включающим образование ударной волны, последующий разлет осколков и формирование огненных шаров.

Статистический анализ, проведенный исследователями [5] показывает, что за период с 1950 по 2006 год зарегистрировано более 140 случаев квазимгновенных разрушений вертикальных стальных резервуаров на объектах топливно-энергетического комплекса. При таких разрушениях образуется мощный поток жидкости - волна прорыва, которая разрушает нормативные обвалования и защитные стены, выходя за пределы территории объекта и приводя к экологическим и техногенным катастрофам. Анализ реальных случаев разрушений РВС [6] показал, что фактические площади проливов имели геометрические формы, существенно отличающиеся от нормативных расчетных значений, при этом основное влияние на количественное значение площади разлива оказывает уклон производственной площадки или местности, не учитываемый в традиционных методиках. Точное определение площади разлива жидкости является первоначальным и критически важным фактором для прогнозирования последующих опасных факторов чрезвычайной ситуации.

Зависимость высоты факела ( $H$ ) от площади пролива ( $S$ ) носит нелинейный характер из-за комплексного взаимодействия различных физических процессов, в первую очередь турбулентности, так как при площади пролива более  $1 \text{ м}^2$ , режим горения будет всегда турбулентным.

Прогнозирование параметров аварийного горения углеводородных проливов, в частности площади растекания жидкости и высоты факела пламени, является фундаментальной задачей промышленной и пожарной безопасности. Многочисленные исследования и методики демонстрируют существенные расхождения в применяемых подходах и получаемых результатах.

Настоящая статья посвящена комплексному анализу существующих методик расчета площади разлива и высоты факела пламени, возникающих при полном разрушении резервуаров и установок с горючими жидкостями (ГЖ).

## Методы исследования

Существующие методики расчета площади разлива и высоты факела пламени (перечень представлен в Табл.1), включая нормативные подходы и международные стандарты, обладают рядом ограничений, что приводит их к расхождению между собой. Большинство из них разработаны для компактных источников горения и не учитывают специфику крупномасштабных проливов, турбулентность, вызванную ветром, или температурно-зависимые изменения вязкости и испаряемости жидкостей. Эти расхождения приводят к критическим погрешностям в определении пожарной опасности объекта при проектировании и существенно затрудняя планирование адекватных мер реагирования при ликвидации чрезвычайных ситуаций.

Указанные ограничения и значительные расхождения в результатах расчетов напрямую обусловлены принципиальными различиями в математических моделях и эмпирических зависимостях, заложенных в эти методики. Для наглядного выявления причин таких расхождений и критической оценки применимости каждой методики к сценариям крупномасштабных аварий, в Табл.1 систематизирован перечень ключевых источников с представленными в них расчетными формулами для определения площади пролива и высоты факела пламени.

**Табл.1. Перечень методик и формулы расчета площади пролива и высоты факела пламени**

№ п/п	Наименование источника	Расчетная формула	Условия определения
Расчет площади разлива			
1.	Приказ МЧС России № 533 [7]	$F_{пр} = f_p \cdot V$ , $f_p$ - коэффициент разлития (5, 20 и 150 м <sup>-1</sup> )	Эмпирическая формула, где площадь пролива определяется как произведение объема разлившейся жидкости (V) на коэффициент разлития ( $f_p$ ), принимаемый в зависимости от условий
2.	Свод правил СП 12.13130.2009 [8]	$F_{пр} = 150 \cdot V$ ,	Площадь испарения при разливе на горизонтальную поверхность определяется (при отсутствии справочных или иных экспериментальных данных), исходя из расчета, что 1 литр смесей и растворов, содержащих 70% и менее (по массе) растворителей, разливается на площади 0,10 м <sup>2</sup> , а остальных жидкостей — на 0,15 м <sup>2</sup>
3.	Исследование С.А. Швыркова [5, 9]	$F_{пр} = f_p \cdot V$ , $f_p$ - коэффициент разлития (5,5, 7,5 и 12,5 м <sup>-1</sup> )	Усовершенствованная эмпирическая формула из методики 1, с обоснованными экспериментальными значениями коэффициента разлития
4.	NFPA 30 [10], SFPE Handbook [11]	$S = \frac{V}{h_c}$ ,	Площадь пролива (S) определяется как отношение объема жидкости (V) к толщине слоя ( $h_c$ )
5.	Miao Zhang [12]	$S = \frac{V}{H_{min}}$ ,	Площадь (S) определяется через минимальную толщину слоя ( $H_{min}$ ), характерную для конкретных условий поверхности
6.	SFPE Handbook [11]	$A_s = 0,36V$ ,	Предусматривают минимальную глубину разлива, которая позволит получить максимальную площадь разлива. В качестве альтернативы, критерий задан как величина, обратная глубине, для получения площади разлива в расчете на объем топлива (для объема $\geq 25$ галлонов)
7.	НИР (Пчелинцев В.А., 1975 г.), Швырков С.А. [9], Халиков В.Д. [13]	$S = K_n V_{ж} \text{ctg} \alpha \frac{\rho g}{\sigma}$	Физико-математическая модель, учитывающая угол смачиваемости ( $\alpha$ ), плотность жидкости ( $\rho$ ), поверхностное натяжение ( $\sigma$ ) и гравитацию ( $g$ ) через коэффициент $K_n$ характеризующий состояние горизонтальных поверхностей и учитывающий их неровности, шероховатость и впитываемость жидкостей
8.	НИР (Рябов И.В., Таубкин С.И., Монахов В.Т. 1974 г.) [14], Швырков С.А. [9], Халиков В.Д. [13]	$S = f \cdot V_{ж}$ , $f = 0,705 \cdot V_{ж}^{-0,175}$	Эмпирическая степенная зависимость коэффициента разлития (f) от объема жидкости ( $V_{ж}$ )
Расчет высоты факела пламени			
1.	Приказ МЧС России № 533,	а) $L = 55d \left( \frac{m'}{\rho_{ав} \sqrt{gd}} \right)^{0,67}$	Нормативные адаптации корреляций высоты пламени через массовую скорость

№ п/п	Наименование источника	Расчетная формула	Условия определения
	ГОСТ Р 12.3.047-2012 [15]	$u_B^{-0,21}$ б) $L = 42d \left( \frac{\dot{m}'}{\rho_a \sqrt{gd}} \right)^{0,61}$	выгорания, диаметр очага и параметры воздуха; вариант «а» включает поправку на ветер, а вариант «б» — без ветровой поправки
2.	Драйздейл Д.[16], G. Heskestad [17], SFPE Handbook [11]	$H = 0,235Q_5^2 - 1,02D$	Классическая полуэмпирическая формула G. Heskestad для расчета высоты факела над точечным источником или очагом пожара
3.	Свод правил СП 12.13130.2009, Р.Н. Thomas [18], Miao Zhang [12]	$H = 42d \left( \frac{M}{\rho_B \sqrt{gd}} \right)^{0,61}$	Формула Р.Н. Thomas, где высота пламени (H) зависит от диаметра (d) и массовой скорости выгорания (M)
4.	Miao Zhang [12], The BrLtz empirical formula [19]	$\frac{H}{D} = 1,73 + 0,33D^{-1,43}$	Корреляция Wang Zhirong (2014 года) представляет собой более простой подход, поскольку высота пламени зависит только от диаметра бассейна
5.	Р.Н. Thomas с учетом ветра [12]	$\frac{H}{D} = 55 \left( \frac{\dot{m}''}{\rho_a \sqrt{gd}} \right)^{0,67} u^{-0,21}$	Полная версия модели Thomas, включающая скорость ветра (u) как фактор, уменьшающий высоту пламени (ветер прижимает факел)

Чтобы выявить особенности каждой из перечисленных методик, представленных в Табл.1, проведены расчеты площади пролива и высоты факела пламени для гипотетического объекта в наиболее пожароопасный период. Характеристики гипотетического объекта приведены в Табл.2:

**Табл.2. Характеристика гипотетического объекта**

Наименование	Параметр	Значение
резервуар* PBC-10000	объем резервуара ( $V_{рез}$ )	10000 м <sup>3</sup>
	коэффициент разлития при проливе на спланированное грунтовое покрытие ( $f_p$ )	7,5 м <sup>-1</sup>
	толщина слоя ( $h_c$ )	0,002 м
	минимальная толщина слоя жидкости для различных грунтов ( $H_{min}$ )	0,005 м
	высота поддона ( $h_{подд}$ )	1,5 м
вещество нонан (C <sub>9</sub> H <sub>20</sub> )	плотность ( $\rho$ )	706 кг/м <sup>3</sup> (при температуре 37°C)
	теплота сгорания ( $\Delta H_c$ )	44,7 МДж/кг
	кинематическая вязкость ( $\nu$ )	7,6сСт= =7,6·10 <sup>-6</sup> м <sup>2</sup> /с
	удельная скорость выгорания ( $\dot{m}''$ ) (M)	0,0623 кг/м <sup>2</sup> ·с
	тепловая мощность пожара (Q)	6,5657·10 <sup>9</sup> Вт
	время растекания (t)	600 с (10 мин)
параметры окружающей дополнительные параметры	температура ( $T_a$ )	310К=37°C
	коэффициент $K_n$	0,485
	угол смачиваемости ( $\alpha$ )	60°
	поверхностное натяжение ( $\sigma$ )	0,021 Н/м
	ускорение силы тяжести (g)	9,81 м/с <sup>2</sup>
	скорость ветра (w)	2,8 м/с
	плотность воздуха ( $\rho_{возд}$ )	1,138 кг/м <sup>3</sup> (при температуре 37°C)

Примечание\* - Резервуар РВС-10000 является стандартным типоразмером для нефтебаз и НПЗ в Российской Федерации (РФ) и СНГ, рассчитанный на хранение 10000 м<sup>3</sup> жидкостей, представляет собой типичный пример объектов повышенной опасности. Его параметры (диаметр 34,2 м, высота стенки 17,88 м) характерны для 60% эксплуатационных резервуаров в РФ. Разрушение может привести к образованию пролива объемом до 10000 м<sup>3</sup>, а последующее возгорание — к формированию высокотемпературного факела, способного распространить тепловое воздействие на значительные расстояния. Отношение высоты к диаметру ( $H/D \approx 0,48$ ) соответствует критериям подобия Фруда и Рейнольдса, что позволяет экстраполировать результаты на резервуары других размеров. Для РВС-10000 стандартная высота обвалования — 1,5 м, что упрощает расчёты перелива.

### Описание сценария

Резервуар расположен на территории Санкт-Петербурга. Особую сложность создают внешние факторы, такие как повышенная температура воздуха (37°C) и ветровая нагрузка (2,8 м/с) (СП 131.13330.2020) [20], которые влияют на динамику растекания жидкости и режим горения. Нонан (C<sub>9</sub>H<sub>20</sub>), выбран в качестве объекта исследования, относится к среднестиллятным углеводородам. Физико-химические свойства нонана взяты из справочных материалов [21, 22].

### Результаты исследования и их обсуждение

На основе анализа современных исследований и нормативных документов, выделены ключевые методики и подходы к определению площади пролива и высоты факела пламени при горении нефти и нефтепродуктов (Табл.1). Результаты их применения для сценария аварии РВС-10000 с веществом нонан приведены в Табл.3. Для верификации результатов аналитических расчетов и оценки адекватности рассмотренных методик дополнительно проведено численное моделирование развития пожара пролива и определения высоты факела с использованием программного комплекса Fire Dynamics Simulator (FDS), согласно полученным результатам  $S$  из Табл.3. Исходные данные для моделирования в FDS, соответствуют физико-химическим свойствам нонана, приведенным в Табл.2. Визуализация результатов моделирования в FDS приведена на Рис.2.

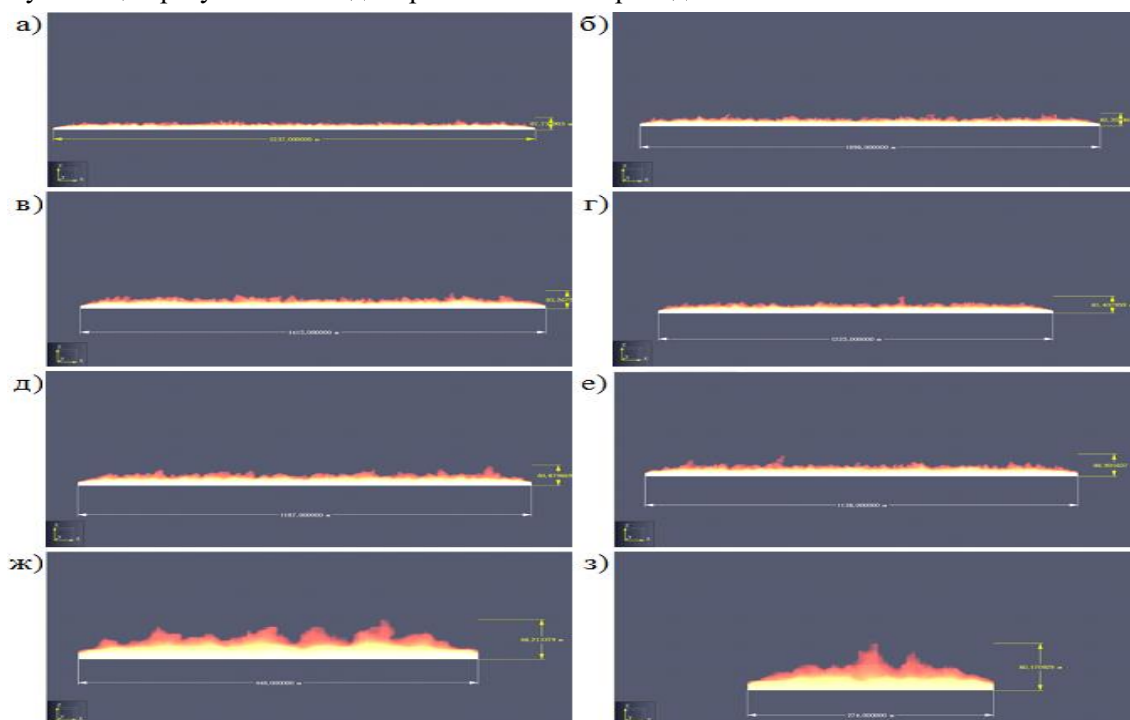


Рис.2. Визуализация результатов моделирования в FDS

- где, а) Н при  $S=5000000 \text{ м}^2$ ;  
 б) Н при  $S=3600000 \text{ м}^2$ ;  
 в) Н при  $S=2000000 \text{ м}^2$ ;  
 г) Н при  $S=1500000 \text{ м}^2$ ;  
 д) Н при  $S=1406659,93 \text{ м}^2$ ;  
 е) Н при  $S=1293149,30 \text{ м}^2$ ;  
 ж) Н при  $S=200000 \text{ м}^2$ ;  
 з) Н при  $S=75000 \text{ м}^2$ .

Численные значения высот племени, полученные с помощью FDS, согласно Рис.2, представлены в Табл.3 и служат ориентиром для сравнительного анализа.

**Табл.3. Сравнение результатов расчетов площади пролива и высоты факела пламени при заданных условиях**

Методики расчетов площади пролива	Результаты расчетов $S, \text{ м}^2$	Методики расчета высоты факела пламени / результаты расчетов Н, м					
		1б	2	3	4	5	FDS
1	200000,00	269,04	225,43	269,04	873,25	248,67	68,21
2	1500000,00	541,88	247,41	541,88	2391,44	521,45	81,41
3	75000,00	191,34	184,77	191,34	534,77	173,41	80,17
4	5000000,00	823,39	108,46	823,39	4366,14	811,65	87,73
5	2000000,00	598,86	231,41	598,86	2761,39	579,60	83,27
6	3600000,00	734,56	168,06	734,56	3704,79	719,35	82,35
7	1293149,30	514,65	252,72	514,65	2220,44	493,77	88,90
8	1406659,93	529,92	249,93	529,92	2315,84	509,28	80,88
Среднее значение	1581241,69	473,86	205,27	473,86	2108,08	455,63	81,62

Анализ результатов, рассмотренных методик расчета площади пролива нонана объемом  $10000 \text{ м}^3$  выявил высокий разброс результатов расчета. Наибольшие значения получатся по методике № 4, где используется фиксированная толщина слоя, что приводит к завышенным и физически нереалистичным результатам. Наиболее близкими к условиям сценария являются результаты методик № 1, 3, 7 и 8, основанных на физико-математических моделях растекания с учетом реологических свойств жидкости и характеристик подстилающей поверхности. Значительный разброс свидетельствует о принципиальной несогласованности нормативных и справочных подходов к оценке масштабов разлива, что обусловлено игнорированием большинством методик ключевых факторов: динамики процесса растекания, шероховатости и уклона поверхности, температурной зависимости вязкости.

Сравнение расчётных высот факела пламени выявляет ещё более значительные несоответствия. Для прогнозирования высоты факела наиболее устойчивые результаты при изменении площади пролива дают методы, в основе которых лежит учет диаметра очага и массовой скорости выгорания. При этом учет ветра (методика № 5) закономерно дает несколько сниженные значения высоты факела по сравнению с безветренным вариантом (методики № 1б, № 3). Значения, полученные по аналитическим методикам (№ 1б - 4), варьируются от 108,46 м до 4366,14 м, при этом результаты моделирования в FDS стабильно

находятся в диапазоне от 68,21 м до 88,90 м, со средним значением около 81,62 м. Таким образом, данные большинства нормативных методик превышают результаты численного моделирования в 3–5 раз, а в случае методики № 4, демонстрирующая гиперболический рост высоты факела от диаметра, дает сильно завышенные значения (более 2 км), что нереалистично.

Значения высоты факела, рассчитанные с помощью компьютерного моделирования FDS в 3-5 раз ниже результатов, полученных по большинству методик. Это указывает на то, что для крупномасштабных проливов высота факела слабо зависит от площади. Метод вычислительной гидродинамики (CFD) позволяет учесть трёхмерную структуру потока, турбулентность и реальные условия окружающей среды, которые упрощены или не в полной мере описываются в представленных в Табл.1 методиках расчета высоты факела пламени.

## **Заключение**

Проведенный комплексный анализ методик расчета площади пролива ГЖ и высоты факела пламени подчеркивает проблему существующей нормативно-методической базы в области промышленной и пожарной безопасности не только в РФ, но и в мире. Исследование показало недопустимо высокую вариативность результатов, получаемых различными подходами. Игнорирование реальных климатических факторов и использование некорректных моделей приводит к значительному искажению оценки опасности, что приводит к неэффективности мер по предотвращению аварий, планированию ликвидации их последствий и минимизации экологического ущерба.

Существующие подходы не учитывают новые угрозы (атаки БПЛА, мгновенное воспламенение) и не способны правильно оценить риск каскадных аварий. Проведенное исследование, согласуясь с выводами других авторов [23], подтверждает необходимость пересмотра существующих нормативных документов и разработки новых методик, подвергнутых валидации на основе компьютерных моделей (CFD) и лабораторных испытаний с малыми объемами, так как провести натурные испытания на основе данного сценария достаточно сложно. Это даст возможность эффективно оценивать риски и планировать меры противопожарной безопасности для объектов хранения ГЖ.

## **Список источников**

1. Кожевин, Д.Ф. Анализ пожаров на объектах хранения и переработки нефти / Д.Ф. Кожевин, Е. В. Радова // Пожарная безопасность: современные вызовы. Проблемы и пути решения: Материалы всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 17 апреля 2025 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы МЧС России им. Героя Российской Федерации генерала армии Е.Н. Зиничева, 2025. – С. 77-81. – EDN WSFYNZ.
2. Шкитронов, М.Е. Аналитический обзор влияния турбулизации пламени на величину высоты факела пожара / М.Е. Шкитронов, Д.Ф. Кожевин, К.Б. Мальчиков // Военный инженер. – 2020. – № 2(16). – С. 27-32. – EDN SRVZLL.
3. Копылов, Н.П. Аэродинамические и температурные характеристики пожаров в резервуарах с нефтепродуктами / Н.П. Копылов, А.В. Карпов, Д.В. Федоткин // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2018. – № 1. – С. 31-34. – EDN QHOYKX.
4. Волков, О.М. Версия «Домино» на пожаре группы РВС-20000 на линейной производственно-диспетчерской станции «Конда» / О.М. Волков // Технологии техносферной безопасности. – 2013. – № 3(49). – С. 3. – EDN SBDYKX.
5. Швырков, С.А. Анализ методов оценки площади пролива жидкости при квазимгновенном разрушении резервуара / С.А. Швырков, В.В. Воробьев // Технологии техносферной безопасности. – 2023. – № 1(99). – С. 17-32. – DOI 10.25257/TTS.2023.1.99.17-32. – EDN MGRAI.
6. Швырков, С.А. Методика прогнозирования площадей разливов нефти и нефтепродуктов при разрушениях вертикальных стальных резервуаров / С.А. Швырков, С. В.

Батманов // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация, – 2008. – № 1. – С. 117-124.- EDN SGXRFF.

7. Приказ МЧС России от 26 июня 2024 г. № 533 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах» (зарегистрировано в Минюсте России 02.09.2024 № 79360).

8. Свод правил СП 12.13130.2009 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности» (утв. приказом МЧС РФ от 25 марта 2009 г. № 182).

9. Швырков, С.А. Обеспечение пожарной безопасности нефтебаз ограничением разлива нефтепродуктов при разрушениях вертикальных стальных резервуаров: специальность 05.26.03 «Пожарная и промышленная безопасность» (по отраслям): диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Швырков Сергей Александрович. – Москва, 2001. – 180 с. – EDN QDROEP.

10. NFPA 30, Flammable and Combustible Liquids Code, by National Fire Protection Association, 2003, <https://archive.org/details/gov.law.nfpa.30.2003/nfpa.30.2003>.

11. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering 5th ed. / ed. by M.J. Hurley., New York, Springer, 2016.

12. Miao, Zhang & Wenhua, Song & ji, Wang & Zhen, Chen. (2014). Accident Consequence Simulation Analysis of Pool Fire in Fire Dike. Procedia Engineering, DOI:10.1016/j.proeng.2014.10.469.

13. Халиков, В.Д. Совершенствование метода расчета площади аварийного пролива нефти для технологических трубопроводов: специальность 05.26.03 «Пожарная и промышленная безопасность» (по отраслям): диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук/ Халиков Вадим Данисович, 2017. – 129 с. – EDN TBYFDG.

14. Разработка уточненных рекомендаций по составлению методик определения категорий производств по взрывопожарной и пожарной опасности: Отчет о НИР / И.В. Рябов, С.И. Таубкин, В.Т. Монахов. – М.: ВНИИПО МВД СССР, 1974.–78 с.

15. Национальный стандарт РФ ГОСТ Р 12.3.047-2012 «Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля» (утв. приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 декабря 2012 г. № 1971-ст).

16. Драйздейл Д., Введение в динамику пожаров/Пер. с англ. К.Г. Бомштейна; под ред. Ю.А. Кошмарова, В.Е. Макарова. - М.: Стройиздат, 1990. - 424 с.

17. Heskestad, G., Fire Plumes, Flame Height, and Air Entrainment, 3rd ed. Quincy MA: NFPA ред., SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2002.

18. Thomas, P.H., «The size of flames from natural fires // Symposium on Combustion», 1963, p. 844–859.

19. Bubbico, Roberto & Dusserre, Gilles & Mazzarotta, Barbara. (2016). Calculation of the Flame Size from Burning Liquid Pools. Chemical Engineering Transactions. 53. 67-72, DOI:10.3303/CET1653012.

20. Свод правил СП 131.13330.2020 «СНиП 23-01-99\* Строительная климатология» (утв. приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 24 декабря 2020 г. N 859/пр) (с изменениями и дополнениями).

21. А.Н. Баратов, А.Я. Корольченко, Г.Н. Кравчук и др., Пожаровзрывоопасность веществ и материалов, и средства их тушения: Справочник в 2-х книгах, М., 1990.

22. А.Я. Корольченко, Д.А. Корольченко, Пожаровзрывоопасность веществ и материалов, и средства их тушения.Справочник в 2-х ч., М.: Асс. «Пожнаука», 2004.

23. Хафизов, Ф.Ш. Разработка зависимости по определению площади пролива для горючих и легковоспламеняющихся жидкостей / Ф.Ш. Хафизов, Д.Ю. Пережогин, А.В. Краснов [и др.] // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2016. – № 4(106). – С. 183-192. – EDN XEJONH.

## References

1. Kozhevin, D.F. Analysis of fires at oil storage and processing facilities / D.F. Kozhevin, E. V. Radova // Fire safety: modern challenges. Problems and solutions: Proceedings of the All-Russian

Scientific and Practical conference, St. Petersburg, April 17, 2025. – Saint Petersburg: Saint Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia. Hero of the Russian Federation, Army General E.N. Zinichev, 2025. – pp. 77-81. – EDN WSFYNZ.

2. Shkitronov, M.E. Analytical review of the effect of flame turbulence on the height of the fire torch / M. E. Shkitronov, D.F. Kozhevnikov, K. B. Boys // *Military engineer*. – 2020. – № 2(16). – pp. 27-32. – EDN SRVZLL.

3. Kopylov, N.P. Aerodynamic and temperature characteristics of fires in tanks with petroleum products / N.P. Kopylov, A.V. Karpov, D.V. Fedotkin // *Environmental protection in the oil and gas complex*. – 2018. – No. 1. – pp. 31-34. – EDN QHOYKX.

4. Volkov, O.M. «Domino» version on the fire of the RVS-20000 group at the «Konda» linear production control station / O.M. Volkov // *Technosphere safety technologies*. – 2013. – № 3(49). – P. 3. – EDN SBDYKX.

5. Shvyrvkov, S.A. Analysis of methods for estimating the area of liquid spillage during quasi-instantaneous destruction of a reservoir / S.A. Shvyrvkov, V.V. Vorobyov // *Technosphere safety technologies*. – 2023. – № 1(99). – pp. 17-32. – DOI 10.25257/TTS.2023.1.99.17-32. – EDN MGPAI.

6. Shvyrvkov, S.A., Batmanov S.V. Methodology for predicting oil and petroleum product spill areas during the destruction of vertical steel tanks // *Fires and emergencies: prevention, elimination.*, – 2008. – № 1. – pp. 117-124. - EDN SGXRFF.

7. Order of the Ministry of Emergency Situations of Russia dated June 26, 2024 No. 533 «On approval of the methodology for determining calculated fire risk values at production facilities» (registered with the Ministry of Justice of Russia on 09/02/2024 No. 79360).

8. Code of Rules SP 12.13130.2009 «Definition of categories of premises, buildings and outdoor installations for explosion and fire hazards» (approved by the order Ministry of Emergency Situations of the Russian Federation No. 182 dated March 25, 2009).

9. Shvyrvkov, S.A. Ensuring the fire safety of oil depots by limiting the spill of petroleum products during the destruction of vertical steel tanks: specialty 05.26.03 «Fire and industrial safety» (by industry): dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences / Shvyrvkov Sergey Alexandrovich. – Moscow, 2001. 180 p. – EDN QDROEP.

10. NFPA 30, Flammable and Combustible Liquids Code, by National Fire Protection Association, 2003, <https://archive.org/details/gov.law.nfpa.30.2003/nfpa.30.2003>.

11. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering 5th ed. / ed. by M.J. Hurley., New York, Springer, 2016.

12. Miao, Zhang & Wenhua, Song & Ji, Wang & Zhen, Chen. (2014). Accident Consequence Simulation Analysis of Pool Fire in Fire Dike. *Procedia Engineering.*, DOI:10.1016/j.proeng.2014.10.469.

13. Khalikov, V.D. Improvement of the method of calculating the area of an emergency oil spill for technological pipelines: specialty 05.26.03 «Fire and industrial safety» (by industry): dissertation for the degree of candidate of Technical Sciences/ Khalikov Vadim Danisovich, 2017. 129 p. – EDN TBYFDG.

14. Development of updated recommendations on the compilation of methods for determining categories of production for explosion and fire hazards: A research report / I.V. Ryabov, S.I. Taubkin, V.T. Monakhov. – M.: VNIPO Ministry of Internal Affairs of the USSR, 1974.-78 p.

15. National standard of the Russian Federation GOST R 12.3.047-2012 «Occupational safety standards system. Fire safety of technological processes. General requirements. Control methods» (approved by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated December 27, 2012 No. 1971-st).

16. Draisdale D., Introduction to the dynamics of fires/ Translated from English by K.G. Bomstein; edited by Yu.A. Koshmarov, V.E. Makarov. - M.: Stroyizdat, 1990. - 424 p.

17. Heskestad, G., Fire Plumes, Flame Height, and Air Entrainment, 3rd ed. Quincy MA: NFPA ed., SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2002.

18. Thomas, P.H., «The size of flames from natural fires // Symposium on Combustion», 1963, pp. 844-859.

19. Bubbico, Roberto & Dusserre, Gilles & Mazarotta, Barbara. (2016). Calculation of the Flame Size from Burning Liquid Pools. *Chemical Engineering Transactions*. 53.pp. 67-72., DOI:10.3303/CET1653012.

20. Code of Rules SP 131.13330.2020 «SNiP 23-01-99\* Construction climatology» (approved by Order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated December 24, 2020 N 859/pr) (with amendments and additions).

21. A.N. Baratov, A.Ya. Korolchenko, G.N. Kravchuk et al., Fire and explosion hazard of substances and materials and their extinguishing agents: A handbook in 2 books, Moscow, 1990.

22. A.Ya. Korolchenko, D.A. Korolchenko, Fire and explosion hazard substances and materials and their extinguishing agents. Handbook in 2 hours, Moscow: Ass. «Pozhnauka», 2004.

23. Khafizov, F. Sh. Development of a dependency for determining the area of a strait for flammable and flammable liquids / F. Sh. Khafizov, D. Yu. Perezhogin, A.V. Krasnov [et al.] // Problems of collecting, preparing and transporting oil and petroleum products, – 2016. – № 4(106). – pp. 183-192. – EDN XEJOHH.

Статья поступила в редакцию 30.09.2025, одобрена после рецензирования 01.12.2025, принята к публикации 15.12.2025.

The article was submitted 30.09.2025, approved after reviewing 01.12.2025, accepted for publication 15.12.2025.