
ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Научная статья

УДК 614.849; 614.835.3; DOI: 10.61260/1998-8990-2026-3-71-82

ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ ПАДАЮЩЕГО ТЕПЛОВОГО ПОТОКА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ БЕЗОПАСНЫХ РАССТОЯНИЙ ПРИ ГОРЕНИИ НЕФТИ В РЕЗЕРВУАРАХ I КЛАССА

✉ Радова Екатерина Владимировна;

Кожевин Дмитрий Федорович;

Самигуллин Гафур Халафович.

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

✉ radova_ev@mail.ru

Аннотация. Рассматривается актуальная проблема определения безопасных расстояний при пожаре вертикального стального резервуара с нефтью объемом 50 000 м³ в условиях, характерных для зимнего периода, с учетом ветровой нагрузки. Работа выполнена на фоне участвовавших атак беспилотных летательных аппаратов на объекты топливно-энергетического комплекса, что создает реальные предпосылки для возникновения крупных пожаров с риском каскадного развития аварии. На основе анализа статистических данных и современных угроз обоснована необходимость уточнения нормативных подходов к оценке теплового воздействия. Выполнены расчеты падающего теплового потока по методике приказа МЧС России от 26 июня 2024 г. № 533 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах» и проведено CFD-моделирование в программе Fire Dynamics Simulator (FDS). Установлено, что методика приказа МЧС России систематически завышает расстояния до пороговых значений: в ближней зоне (до 20 м) в 1,4–2,1 раза, на удалении 40–50 м – в 5–6 раз. Основная причина – идеализированная цилиндрическая модель факела, не учитывающая возвышение очага горения (высота стенки 17,8 м) и связанное с ним затенение. Установлено, что сравнение двух расчетных подходов без привлечения натурных данных позволяет судить лишь об их расхождении, но не об абсолютной точности. При этом предложены два подхода к тактическому планированию: нормативный (консервативный) и риск-ориентированный (с использованием уточненных полей теплового потока). Рассчитаны безопасные расстояния для личного состава и требуемые расходы воды на охлаждение. Подтверждена целесообразность экспериментальной валидации CFD-моделей для выработки рекомендаций по сокращению безопасных расстояний.

Ключевые слова: резервуарный парк, падающий тепловой поток, нефть, пожарная безопасность, FDS-моделирование, безопасные расстояния, «эффект домино», атака беспилотных летательных аппаратов, ручные (лафетные) пожарные стволы

Для цитирования: Радова Е.В., Кожевин Д.Ф., Самигуллин Г.Ф. Оценка величины падающего теплового потока и определение безопасных расстояний при горении нефти в резервуарах I класса // Проблемы управления рисками в техносфере. 2026. № 3 (79). С. 71–82. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-3-71-82

Scientific article

ESTIMATION OF THE FALLING HEAT FLOW AND DETERMINATION OF SAFE DISTANCES DURING OIL FIRES IN CLASS I TANKS

✉ Radova Ekaterina V.;

Kozhevin Dmitrij F.;

Samigullin Gafur Kh.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

✉ radova_ev@mail.ru

Abstract. This article examines the pressing issue of determining safe distances during a fire in a 50,000 m³ vertical steel oil tank under typical winter conditions, taking into account wind loads. This study was conducted against the backdrop of increasingly frequent drone attacks on fuel and energy facilities, creating a real potential for major fires with the risk of cascading accidents. An analysis of statistical data and current threats substantiates the need to refine regulatory approaches to assessing thermal impact. Calculations of incident heat flux were performed using the methodology of Order № 533 of EMERCOM of Russia «On the approval of the methodology for determining the calculated values of fire risk at production facilities», and CFD modeling was conducted using Fire Dynamics Simulator (FDS). It was established that the methodology of Order № 533 of EMERCOM of Russia systematically overestimates distances to threshold values: in the near zone (up to 20 m) by 1,4–2,1 times, and at a distance of 40–50 m – by 5–6 times. The main reason is the idealized cylindrical model of the flare, which does not take into account the elevation of the combustion source (wall height 17,8 m) and the associated shading. It was established that comparing two calculation approaches without using in-kind data only allows one to assess their discrepancies, not their absolute accuracy. Two approaches to tactical planning were proposed: a normative (conservative) approach and a risk-based approach (using refined heat flow fields). Safe distances for personnel and the required cooling water flow rates were calculated. The feasibility of experimental validation of CFD models for developing recommendations for reducing safe distances was confirmed.

Keywords: tank farm, incident heat flux, oil, fire safety, FDS modeling, safe distances, «domino effect», UAV attack, hand-held barrels

For citation: Radova E.V., Kozhevin D.F., Samigullin G.Kh. Estimation of the falling heat flow and determination of safe distances during oil fires in class I tanks // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2026. № 3 (79). P. 71–82. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-3-71-82

Введение

В последние годы резко возросла угроза техногенных аварий, инициированных внешними воздействиями, в первую очередь атаками беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) на объекты топливно-энергетического комплекса (ТЭК) [1, 2].

При пожарах в резервуарах основным поражающим фактором является тепловое излучение. Его интенсивность определяет безопасные расстояния для личного состава, участвующего в тушении, а также риск теплового поражения соседних резервуаров, что может привести к каскадному развитию аварии – так называемому «эффекту домино» [3]. Именно в условиях возросшей террористической угрозы и риска быстрого развития пожара по сценарию «домино» достоверная оценка величины падающего теплового потока становится главной задачей при планировании противопожарной защиты [4, 5] и разработке оперативных планов тушения.

Действующая в Российской Федерации методика определения расчетных величин пожарного риска – приказ МЧС России от 26 июня 2024 г. № 533¹ (Методика) базируется

¹ Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах: приказ МЧС России от 26 июня 2024 г. № 533 (зарег. в Минюсте России 2 сент. 2024 г. № 79360). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс»

на модели цилиндрического факела для расчета падающего теплового потока. Однако реальные метеорологические условия (скорость ветра и температура воздуха) существенно изменяют геометрию пламени, что не учитывается упрощенной моделью [6, 7]. В исследованиях [8, 9] обоснована необходимость учета вероятностной природы теплового воздействия. В работе [10] обосновано, что время до начала тушения является критическим параметром: при использовании мобильных средств оно составляет 14 мин (вероятность разрушения стенки – 57 %), а при стационарных – 4 мин (вероятность – 13 %). Точность прогноза теплового потока напрямую влияет на выбор тактики тушения и на безопасность объекта.

Настоящая статья посвящена количественному сопоставлению величин падающего теплового потока и безопасных расстояний, рассчитанных по Методике и с помощью CFD-моделирования, для условий пожара в резервуаре РВС-50000, выявлению причин расхождений и оценке возможности уточнения тактических нормативов.

Модели и методы исследования

Для обеспечения достоверности оценок теплового воздействия, наряду с аналитическими расчетами по Методике, использовано компьютерное моделирование в программе Fire Dynamics Simulator (FDS). Данный программный комплекс выбран в связи с его высокой верифицированностью при решении задач, касающихся пожаров проливов и резервуарных парков [11, 12]. Верификация нормативных расчетов необходима для оценки достоверности получаемых безопасных расстояний, особенно в условиях ветра и отрицательных температур, влияние которых недостаточно полно отражено в упрощенных моделях [13].

В качестве объекта исследования выбран типовой вертикальный стальной резервуар объемом 50 000 м³. При моделировании рассматривалось горение на всей поверхности зеркала жидкости (верхняя кромка резервуара), а высота стенки учитывалась как вертикальная координата источника излучения. Геометрические, климатические и теплофизические параметры, использованные в расчетах, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для расчетов

Параметр	Обозначение	Значение	Источник/Примечание
Резервуар (РВС-50000)			
Диаметр	D	60,7 м	в соответствии с типовыми проектами, ГОСТ 31385–2023 ² и СП 155.13130.2014 ³
Высота стенки	H _{ст}	17,8 м	
Площадь зеркала горения	F	2 894 м ²	расчет
Условия окружающей среды (зима)			
Температура воздуха	t _{возд}	–7 °С (266,15 К)	характерно для зимнего периода
Скорость ветра	u	6 м/с (западное)	
Плотность воздуха	ρ _в	1,33 кг/м ³	расчет
Теплофизические свойства сырой нефти			
Массовая скорость выгорания	m ^{'''}	0,060 кг/(м ² ·с)	справочные данные ⁴
Низшая теплота сгорания	Q _н	44 200 кДж/кг	
Доля излучения	χ	0,3	по умолчанию для Методики

² ГОСТ 31385–2023. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия (приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 июня 2023 г. № 462-ст введен в действие в качестве национального стандарта Рос. Федерации с 1 авг. 2023 г.). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс»

³ СП 155.13130.2014. Склады нефти и нефтепродуктов. Требования пожарной безопасности (утв. приказом МЧС России от 26 дек. 2013 г. № 837, введен в действие с 1 янв. 2014 г.). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс»

⁴ Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении: учеб. пособие / Ю.А. Кошмаров [и др.]. М.: Академия ГПС МЧС России, 2012. 126 с.

В соответствии с табл. П4.4 Методики приняты следующие пороговые значения интенсивности теплового излучения:

$q = 5,0 \text{ кВт/м}^2$ – допустимо для личного состава в специальной защитной одежде;

$q = 7,0 \text{ кВт/м}^2$ – уровень, вызывающий болевые ощущения при кратковременном пребывании;

$q = 10,5 \text{ кВт/м}^2$ – порог воспламенения материалов, используемый для оценки риска поражения соседних резервуаров.

Расчет выполнен по алгоритму, изложенному в пунктах 30–33 Методики, который основан на модели вертикального цилиндрического факела пламени. Высота пламени (L_{ϕ}) определяется по формуле, учитывающей диаметр резервуара, массовую скорость выгорания, теплоту сгорания и параметры окружающей среды. Падающий тепловой поток на заданном расстоянии (r) от центра резервуара определяется через угловой коэффициент облученности для цилиндрического излучателя.

Для верификации нормативных расчетов проведено численное моделирование в FDS. Расчетная область включала резервуар и прилегающую территорию; размер ячейки сетки составлял 1,0 м, что обеспечивает удовлетворительное разрешение согласно критерию $D^*/\delta x$. Моделирование выполнялось с учетом ветра и реальной геометрии источника горения, расположенного на отметке верхнего пояса (17,8 м) резервуара. Ветер в модели задавался путем определения профиля скорости потока воздуха на входе в расчетную область. Турбулентность воспроизводилась методом крупных вихрей (LES), а радиационный теплообмен – с помощью модели дискретных ординат. Результаты CFD-моделирования позволили получить поля температур, скоростей и тепловых потоков, а также визуализировать форму факела [14].

Результаты исследования и их обсуждение

Согласно результатам расчета по Методике при скорости ветра 6 м/с получена высота пламени $L_{\phi} = 40,35$ м. Полная высота факела от уровня земли с учетом высоты стенки резервуара составляет $H_{\phi} = 58,15$ м. Угол наклона факела при данной скорости ветра обеспечивает смещение излучающей поверхности в подветренном направлении, что приводит к увеличению теплового воздействия с подветренной стороны.

В табл. 2 приведены расстояния от центра резервуара и от его стенки до изолиний 5, 7 и 10,5 кВт/м², рассчитанные по Методике с учетом ветра 6 м/с (подветренная сторона) и определенные в FDS.

Таблица 2

Сравнение безопасных расстояний, полученных по результатам расчета Методики и FDS

№ расчета/ моделирования	Методика (приказ МЧС России № 533)					FDS-моделирование				Коэффициент завышения, Методика/FDS
	Интенсивность теплового излучения	Высота факела,	Полная высота факела	Расстояние от центра пролива	Расстояние от стенок резервуара	Высота факела	Полная высота факела	Расстояние от центра пролива	Расстояние от стенок резервуара	
	$q, \text{ кВт/м}^2$	$L_{\phi}, \text{ м}$	$H_{\phi}, \text{ м}$	$r, \text{ м}$	$x, \text{ м}$	$L_{\phi}, \text{ м}$	$H_{\phi}, \text{ м}$	$r, \text{ м}$	$x, \text{ м}$	
1	5,00	40,35	58,15	95,49	65,14	50,38	68,18	51,50	21,15	1,85
2	7,00			79,51	49,16			47,22	16,87	1,68
3	10,50			65,85	35,50			37,66	7,31	1,75

Полученные результаты свидетельствуют о существенной асимметрии поля теплового излучения. При скорости ветра 6 м/с безопасные расстояния с подветренной стороны для уровня 5 кВт/м² составляют более 65 м от стенки резервуара, что значительно превышает аналогичные показатели при штилевых условиях. Это необходимо учитывать при расстановке пожарной техники и размещении позиций ствольщиков, при выборе позиций для охлаждения стенок горящего и соседних резервуаров.



Рис. 1. Пожары в резервуарах:
а – модель в FDS; б – фото реального пожара в резервуаре с нефтью объемом 50 000 м³

Результаты CFD-моделирования в программе FDS дают высоту факела около 50 м (полная высота около 68 м), что несколько выше рассчитанной по Методике, но соответствуют реальным пожарам, что показано на рис. 1. Однако расстояния до пороговых значений теплового потока по FDS оказались существенно меньшими: для $q = 5 \text{ кВт/м}^2$ – 21,15 м от стенки, для 7 кВт/м^2 – 16,87 м, для $10,5 \text{ кВт/м}^2$ – всего 7,31 м. Коэффициенты завышения K_z лежат в диапазоне 1,68–1,85: это значит, что Методика завышает требуемые безопасные расстояния почти в 1,7–1,9 раза. Основная причина расхождения – идеализированная цилиндрическая модель факела в Методике, тогда как FDS воспроизводит реальную коническую форму пламени с загнутым подветренным контуром, при которой основное излучение на наземные объекты исходит из относительно низкой приземной зоны («борта» пламени). Дополнительным фактором является то, что нормативная цилиндрическая модель не учитывает фактическое возвышение очага горения над уровнем земли (высота стенки резервуара составляет 17,8 м). В результате реальный источник излучения расположен выше, а часть теплового потока рассеивается и поглощается на пути к объектам, что в Методике не принимается во внимание, но учитывается при FDS-моделировании.

Для обоснования тактических решений были также рассчитаны значения падающего теплового потока на фиксированных расстояниях от стенки резервуара (от 5 до 50 м) при ветре 6 м/с (табл. 3). Эти данные позволяют определить зоны, где требуется охлаждение соседних резервуаров и где возможно размещение личного состава.

Таблица 3

Распределение теплового потока в зависимости от расстояния до резервуара

№ расчета/ моделирования	Расстояние от стенок резервуара	Интенсивность теплового излучения		Коэффициент завышения Методика/FDS
		Методика	FDS	
	$X_{\text{ст}}, \text{ м}$	$q, \text{ кВт/м}^2$		K_z
1	5,00	18,38	13,24	1,39
2	10,00	17,41	9,42	1,85
3	20,00	15,13	7,21	2,10
4	30,00	12,22	3,66	3,34

№ расчета/ моделирования	Расстояние от стенок резервуара	Интенсивность теплового излучения		Коэффициент завышения Методика/FDS
		Методика	FDS	
	Х _{ст} , м	q, кВт/м ²		К _з
5	40,00	9,17	1,68	5,46
6	50,00	6,84	1,17	5,87

Как видно из табл. 3, согласно результатам расчета, проведенного по Методике, на расстоянии 30 м от стенки тепловой поток превышает пороговое значение 10,5 кВт/м², что требует обязательного охлаждения соседних резервуаров. На расстоянии 50 м поток снижается до 6,84 кВт/м², что безопасно для кратковременного пребывания личного состава в специальной защитной одежде. Однако данные FDS показывают гораздо более быстрое убывание теплового потока: на 30 м он составляет всего 3,66 кВт/м², на 50 м – 1,17 кВт/м². Коэффициент завышения K_3 растет с расстоянием, достигая 5–6 раз на 40–50 м. Это связано с тем, что на удалении от резервуара основное излучение приходит от верхней части факела, которая в реальности экранируется собственным корпусом резервуара и стенкой, а также поглощается влагой воздуха. Цилиндрическая модель Методики не учитывает эффекта возвышения источника и затенения.

На рис. 2 представлена визуализация результатов CFD-моделирования: распределение теплового потока в вертикальной плоскости (а) и на уровне земли (б). Хорошо видна асимметрия факела и зона максимального излучения вблизи подветренной стороны резервуара.

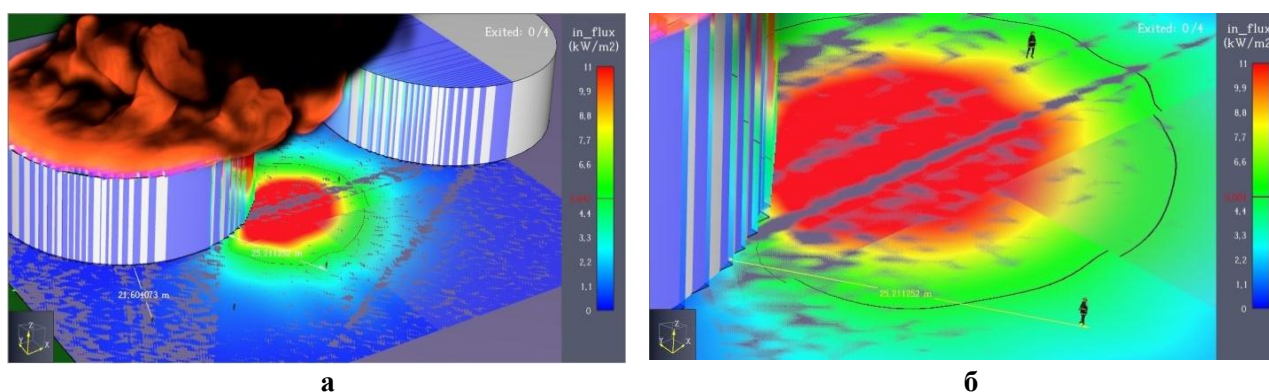


Рис. 2. Визуализация пожара в резервуаре РВС-50000 (ветер 6 м/с, западное направление):

а – температурное поле в вертикальной плоскости;

б – распределение падающего теплового потока на уровне земли (изолинии, кВт/м²)

Согласно табл. 3 и рис. 2 в FDS на расстоянии 30 м величина падающего теплового потока не превышает 3,7 кВт/м², что значительно ниже критического уровня 10,5 кВт/м². Это означает, что реальная опасность для соседних резервуаров существенно меньше, чем прогнозирует Методика, и безопасные расстояния могут быть сокращены при условии подтверждения результатов дополнительными расчетами и экспериментами.

Помимо геометрических факторов (возвышение очага, коническая форма факела), существенную роль в затухании излучения на больших расстояниях (40–50 м) играет ослабление излучения в атмосфере. Методика в инженерной реализации часто пренебрегает поглощением лучистой энергии парами воды и диоксидом углерода, тогда как модель в FDS учитывает состав среды и ее температуру. В условиях низкой температуры воздуха и, как следствие, повышенной относительной влажности, ослабление излучения становится значимым фактором, что объясняет рост коэффициента завышения K_3 до 5–6 раз на удалении 50 м.

Сопоставление результатов расчета по Методике и CFD-моделирования выявило существенные расхождения в оценках теплового воздействия (табл. 2 и табл. 3). Модель FDS, более точно учитывающая аэродинамику и форму факела, показывает, что реальные тепловые потоки на удалении от резервуара значительно ниже прогнозируемых по Методике (коэффициент завышения K_z достигает 5,87 на расстоянии 50 м). Это позволяет сделать два вывода: во-первых, Методика дает заведомо завышенные оценки безопасных расстояний, что гарантирует безопасность при стандартных расчетах; во-вторых, применение FDS-моделирования позволяет обоснованно сократить эти расстояния при детальном планировании оперативных действий.

Однако в условиях реального пожара, особенно вызванного внешними воздействиями (атака БПЛА), где высока вероятность нештатных сценариев (частичное обрушение конструкций, разлив нефти), применение упрощенных, но нормативно закрепленных методов является обязательным. В связи с этим предлагаемые ниже тактические рекомендации базируются на действующих нормативных требованиях с оговорками о возможности их корректировки на основе более точных моделей.

Полученные результаты позволяют сформулировать два подхода к определению тактических возможностей подразделений пожарной охраны: нормативный (согласно Методике) и расчетный (по данным FDS). Выбор подхода зависит от оперативной обстановки на пожаре, возможностей передислокации подчиненных подразделений, метеорологических условий (ветровая нагрузка) с соблюдением правил мониторинга теплового потока.

На основании справочных и расчетных данных распределения теплового потока (табл. 2, 3) следует, что личный состав пожарной охраны может находиться в боевой одежде пожарного (БОП) 1 класса на расстоянии 65 м (согласно Методике) и 21 м (по данным FDS) в течение 240 с⁵, поскольку интенсивность теплового излучения составляет 5,00 кВт/м². В случае использования специальной защитной одежды (СЗО) полутяжелого типа (ТОК-200) личный состав может располагаться на удалении 35 м (согласно Методике) и 7 м (по данным FDS) в течение 900 с, с учетом постоянной смены газодымозащитников, дозируя тем самым тепловую нагрузку.

Согласно данным FDS и тактико-технических характеристик (ТТХ) ручных пожарных стволов личный состав пожарной охраны может находиться ближе дальности компактных струй ручных стволов (табл. 4). Следовательно, охлаждение горящего РВС-50000 может осуществляться при помощи ручных стволов без использования ТОК-200 (так как интенсивность теплового излучения не превышает 5,00 кВт/м²), но только при условии непрерывного мониторинга тепловой обстановки и под защитой водяных завес.

Согласно справочным значениям Методики нахождение личного состава в БОП допустимо на расстоянии не ближе 65 м, соответственно охлаждение горящего РВС-50000 возможно осуществлять только лафетными стволами, что окажет влияние на расстановку пожарной техники, выбор насосно-рукавных систем, количество привлекаемого личного состава, решающее направление и ранг пожара. В случае использования СЗО полутяжелого (ТОК-200) и тяжелого типа (ТОК-800) необходимо будет использовать средства индивидуальной защиты органов дыхания (СИЗОД), что потребует привлечения дополнительных сил и средств (пожарные автомобили, базы газодымозащитной службы (ГДЗС), мастера ГДЗС и др.).

Таким образом, интенсивность теплового потока является ключевым фактором, определяющим допустимые расстояния и время пребывания личного состава, а следовательно, и тактические возможности подразделений, участвующих в тушении и охлаждении резервуара.

⁵ ГОСТ Р 53264–2019. Техника пожарная. Одежда пожарного специальная защитная. Общие технические требования. Методы испытаний (утв. и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 сент. 2019 г. № 807-ст). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс»



Рис. 3. Подача пожарных стволов на охлаждение стенок горящих резервуаров в СЗО

Порог длительного теплового воздействия, способного вызвать деформацию и воспламенение материалов соседнего резервуара ($q = 10,5 \text{ кВт/м}^2$), по расчетам Методики достигается на удалении 35,5 м (табл. 2). В резервуарных парках расстояния между соседними резервуарами регламентируются СП 155.13130.2014 и зависят от типа и объема емкостей. Для резервуаров объемом до 20 000 м³ эти расстояния могут составлять от 20 до 40 м, однако для рассматриваемого в статье РВС-50000 норматив составляет 30 м. Поскольку расчетное расстояние до порога $10,5 \text{ кВт/м}^2$ (35,5 м с подветренной стороны) превышает это значение, резервуары, расположенные с подветренной стороны, попадают в зону поражения и требуют обязательного охлаждения.

Несмотря на то, что расчеты по CFD-моделям выдают более низкие значения, при планировании реальных действий сотрудникам пожарной охраны рекомендуется руководствоваться действующими нормативами⁶:

1. Горящий резервуар необходимо охлаждать по всему периметру. Интенсивность подачи воды на охлаждение горящего резервуара необходимо обеспечивать в диапазоне от 0,5–1,0 л/с на 1 м длины окружности резервуара. Для резервуара объемом 50 000 м³ диаметр составляет приблизительно 60 м (зависит от проекта, но для расчета принимаем 60 м), высота стенок – 17,8 м. Следовательно, для периметра резервуара 188,4 м и интенсивности подачи 0,8 л/с потребуется 150,7 л/с на охлаждение горящего резервуара (в табл. 4 представлены рекомендации по применению пожарных стволов).

2. Для охлаждения соседнего с горящим резервуаром интенсивность подачи воды должна быть в пределах от 0,2–0,5 л/с на 1 м полупериметра резервуара. Соответственно, потребуется 37,7 л/с воды на охлаждение стенок рядом стоящего резервуара.

Таблица 4

**Количество и ТТХ пожарных стволов, необходимых на защиту
горящего (смежного) РВС-50000, согласно расчетным значениям FDS**

Наименование пожарного ствола	Количество необходимых стволов на охлаждение, ед		Дальность компактной струи, м	Производи- тельность, л/с	Необходимость применения СЗО ТОК-200	
	РВС-50000 (горящий)	РВС-50000 (смежный)			Методика	По FDS
Лафетные стволы						
ЛС-С40У	4	1	70	40	–	–
ПЛС-П20У:						
d насадка 22 мм	8	2	61	19	+	–
d насадка 28 мм	7	2	67	23	–	–
d насадка 32 мм	5	2	68	30	–	–
ЛС-П20У	7	2	52	20–25	+	–

⁶ Руководство по тушению нефти и нефтепродуктов в резервуарах и резервуарных парках. М.: ГУГПС-ВНИИПО-МИПБ, 1999

Наименование пожарного стволы	Количество необходимых стволов на охлаждение, ед		Дальность компактной струи, м	Производи- тельность, л/с	Необходимость применения СЗО ТОК-200	
	РВС-50000 (горящий)	РВС-50000 (смежный)			Методика	По FDS
Ручные стволы						
Delta fire attack 750	12	3	45	4,75–12,50	+	–
Delta H500	18	5	40	0,83–8,30	+	–
Delta attack 500 версия CAF	19	5	45	2–8	+	–
РСКУ-50А	19	5	35	2–8	+	–
КУРС-8	19	5	35	2–8	+	–
РСК-70	20	5	35	7,40	+	–
ОРТ-50А	20	5	33	7,40	+	–
РСКУ-50	19	5	30	2–8	+	–
РСКУ-70	10	3	32	6–15	+	–

Анализ данных интенсивности теплового потока расчетной модели FDS указывает, что на расстоянии 21,15 м от стенки горящего резервуара личный состав может находиться в БОП, без применения СЗО ТОК-200 (ТОК-800). Данное расстояние позволяет ствольщикам применять ручные пожарные стволы на охлаждение горящего резервуара без использования СИЗОД. В свою очередь, применять 18–20 ручных стволы нецелесообразно из-за большого количества личного состава, требуемого для эффективного тушения. Работа 4–8 лафетных стволы вместо 20 ручных позволяет сократить численность личного состава на позициях в 2,5–5 раз. Это не только снижает риск теплового поражения людей, но и освобождает дополнительные силы для решения других задач (организация бесперебойного водоснабжения, создания резерва или дополнительного боевого участка).

Для эффективного и безопасного охлаждения резервуаров класса I (объемом 50 000 м³ и более) применение лафетных стволы является наиболее эффективным тактическим решением, позволяющим реализовать принцип сосредоточения необходимого расхода огнетушащего вещества с минимальным привлечением личного состава в зонах высокого теплового излучения.

Таким образом, выявленное расхождение между Методикой и FDS моделями не должно служить основанием для немедленного снижения безопасных расстояний в реальных условиях, но открывает перспективу для научно обоснованной корректировки нормативной базы в будущем.

Заключение

В данной статье рассмотрена актуальная задача по определению безопасных расстояний при пожаре вертикального стального резервуара с нефтью объемом 50 000 м³. Участвовавшие внешние террористические воздействия на объекты ТЭК, в частности атаки БПЛА, создают реальную угрозу возникновения крупных пожаров с возможным каскадным развитием аварии.

Проведенные расчеты по Методике и их верификация с помощью метода вычислительной гидродинамики позволили не только получить конкретные значения безопасных расстояний для зимних условий ($t = -7^{\circ}\text{C}$, ветер 6 м/с), но и выявить степень завышения оценок, заложенного в Методике. Установлено, что Методика систематически завышает расстояния теплового воздействия в 1,7–1,9 раза, а на больших расстояниях (от 40 м) – в 5–6 раз по сравнению с CFD-моделью, что объясняется идеализированной цилиндрической моделью факела, которая не учитывает возвышение очага горения (высота стенки 17,8 м) и связанное с ним экранирование излучения.

Ключевым выводом для практики является необходимость ориентации на действующие нормативные требования при планировании расстановки сил и средств. В частности, для условий рассмотренного моделирования:

- безопасное расстояние для личного состава ($q=5$ кВт/м²) составляет не менее 65 м с подветренной стороны;
- зона обязательного охлаждения соседних резервуаров (для предотвращения эффекта домино) охватывает расстояние до 50 м от стенки горящего резервуара;
- требуемый расход воды на охлаждение горящего резервуара должен составлять 150,7 л/с, а на охлаждение соседнего – не менее 37,7 л/с.

Накопление и анализ результатов CFD-моделирования для различных типов резервуаров позволит в перспективе уточнить нормативные методы расчета безопасных расстояний, сохранив требуемый уровень безопасности при снижении избыточности мер защиты.

Настоящее исследование представляет собой сравнительный анализ двух расчетных методик. Полученные коэффициенты расхождения ($K_3=1,7-5,9$) характеризуют разницу между моделями, а не их абсолютную погрешность относительно реального пожара. Валидация CFD-моделей требует сопоставления с натурными экспериментами, которые в условиях резервуарных пожаров крайне ограничены. Поэтому выводы о «завышении» безопасных расстояний нормативной методикой являются предварительными и требуют подтверждения.

Список источников

1. Кожевин Д.Ф., Радова Е.В. Анализ статистических данных о пожарах на объектах, входящих в инфраструктуру нефтяной промышленности // Проблемы управления рисками в техносфере. 2025. № 3 (75). С. 99–110. EDN BUMRDE. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-3-99-110
2. Кожевин Д.Ф., Радова Е.В. Анализ пожаров на объектах хранения и переработки нефти // Пожарная безопасность: современные вызовы. Проблемы и пути решения: материалы Всерос. науч.-практ. конф. СПб.: С.-Петербург. ун-т ГПС МЧС России, 2025. С. 77–81. EDN WSFYNZ.
3. Волков О.М. Версия «Домино» на пожаре группы РВС-20000 на линейной производственно-диспетчерской станции «Конда» // Технологии техносферной безопасности. 2013. № 3 (49). С. 3. EDN SBDYKX.
4. James I. Chang, Cheng-Chung Lin. A study of storage tank accidents // Journal of Loss Prevention in the Process Industries ed. 2006. P. 51–59. DOI: 10.1016/j.jlp.2005.05.015
5. Sesseng C., Storesund K., Steen-Hansen A. Analysis of 985 fire incidents related to oil and gas production on the Norwegian continental shelf. 2018. P. 1847–1853.
6. Копылов Н.П., Карпов А.В., Федоткин Д.В. Аэродинамические и температурные характеристики пожаров в резервуарах с нефтепродуктами // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2018. № 1. С. 31–34. EDN QHOYKX.
7. Теоретическое и экспериментальное исследование пожаров в крупных топливных резервуарах и создание инновационной технологии их тушения / Н.П. Копылов [и др.] // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2022. № 76. С. 131–149. DOI: 10.17223/19988621/76/1
8. Абрамов Ю.А., Басманов А.Е. Стохастическая модель нагрева резервуара с нефтепродуктом под тепловым воздействием пожара // Пожаровзрывобезопасность. 2007. Т. 16. № 4. С. 37–42.
9. Колесников Е.Ю. О модельной неопределенности пожарного риска наземного резервуара с бензином // Пожаровзрывобезопасность. 2013. Т. 22. № 3. С. 38–45.
10. Хафизов Ф.Ш., Бакиров И.К., Айткалеева Б.У. Исследование тушения пожаров в резервуаре нефтепродуктов с использованием пеноподъемника мобильного средства

тушения // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2016. № 3 (105). С. 146–159. EDN WZJMZL.

11. Fire Dynamics Simulator (Version 6), User's Guide. NIST Special Publication 1019. 6th ed. / K. McGrattan [et al.] // Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology, 2024. 524 p. DOI: 10.6028/NIST.SP.1019

12. Радова Е.В. Анализ методов расчета площади разлива и высоты факела пламени горючих жидкостей // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2025. № 4 (39). С. 170–181. EDN ZYLEWO. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2025.95.51.011

13. Шкитронов М.Е., Кожевин Д.Ф., Мальчиков К.Б. Аналитический обзор влияния турбулизации пламени на величину высоты факела пожара // Военный инженер. 2020. № 2 (16). С. 27–32. EDN SRVZLL.

14. Hu L. A review of physics and correlations of pool fire behaviour in wind and future challenges // Fire Safety Journal. 2017. Vol. 91. P. 41–55. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.05.008

References

1. Kozhevin D.F., Radova E.V. Analiz statisticheskikh dannyh o pozharah na ob'ektah, vkhodyashchih v infrastrukturu neftyanoy promyshlennosti // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2025. № 3 (75). S. 99–110. EDN BUMRDE. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-3-99-110

2. Kozhevin D.F., Radova E.V. Analiz pozharov na ob'ektah hraneniya i pererabotki nefti // Pozharnaya bezopasnost': sovremennye vyzovy. Problemy i puti resheniya: materialy Vseros. nauch.-prakt. konf. SPb.: S.-Peterb. un-t GPS MCHS Rossii, 2025. S. 77–81. EDN WSFYNZ.

3. Volkov O.M. Versiya «Domino» na pozhare gruppy RVS-20000 na linejnoy proizvodstvenno-dispetcherskoj stancii «Konda» // Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti. 2013. № 3 (49). S. 3. EDN SBDYKX.

4. James I. Chang, Cheng-Chung Lin. A study of storage tank accidents // Journal of Loss Prevention in the Process Industries ed. 2006. P. 51–59. DOI: 10.1016/j.jlp.2005.05.015

5. Sesseng C., Storesund K., Steen-Hansen A. Analysis of 985 fire incidents related to oil and gas production on the Norwegian continental shelf. 2018. P. 1847–1853.

6. Kopylov N.P., Karpov A.V., Fedotkin D.V. Aerodinamicheskie i temperaturnye harakteristiki pozharov v rezervuarah s nefteproduktami // Zashchita okruzhayushchej sredy v neftegazovom komplekse. 2018. № 1. S. 31–34. EDN QHOYKX.

7. Teoreticheskoe i eksperimental'noe issledovanie pozharov v krupnyh toplivnyh rezervuarah i sozdanie innovacionnoj tekhnologii ih tusheniya / N.P. Kopylov [i dr.] // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika. 2022. № 76. S. 131–149. DOI: 10.17223/19988621/76/1

8. Abramov Yu.A., Basmanov A.E. Stohasticheskaya model' nagreva rezervuara s nefteproduktom pod teplovym vozdejstviem pozhara // Pozharovzryvbezopasnost'. 2007. T. 16. № 4. S. 37–42.

9. Kolesnikov E.Yu. O model'noj neopredelennosti pozharnogo riska nazemnogo rezervuara s benzinom // Pozharovzryvbezopasnost'. 2013. T. 22. № 3. S. 38–45.

10. Hafizov F.Sh., Bakirov I.K., Ajtkaleeva B.U. Issledovanie tusheniya pozharov v rezervuare nefteproduktov s ispol'zovaniem penopod"emnika mobil'nogo sredstva tusheniya // Problemy sbora, podgotovki i transporta nefti i nefteproduktov. 2016. № 3 (105). S. 146–159. EDN WZJMZL.

11. Fire Dynamics Simulator (Version 6), User's Guide. NIST Special Publication 1019. 6th ed. / K. McGrattan [et al.] // Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology, 2024. 524 p. DOI: 10.6028/NIST.SP.1019

12. Radova E.V. Analiz metodov rascheta ploshchadi razliva i vysoty fakela plameni goryuchih zhidkostej // Sibirskij pozharno-spasatel'nyj vestnik. 2025. № 4 (39). S. 170–181. EDN ZYLEWO. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2025.95.51.011

13. Shkitronov M.E., Kozhevin D.F., Mal'chikov K.B. Analiticheskij obzor vliyaniya turbulizacii plameni na velichinu vysoty fakela pozhara // Voennyj inzhener. 2020. № 2 (16). S. 27–32. EDN SRVZLL.

14. Hu L. A review of physics and correlations of pool fire behaviour in wind and future challenges // Fire Safety Journal. 2017. Vol. 91. P. 41–55. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.05.008

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 30.03.2025; одобрена после рецензирования: 06.07.2026;
принята к публикации: 31.08.2026

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 30.03.2025; approved after review: 06.07.2026;
accepted for publication: 31.08.2026

Информация об авторах:

Радова Екатерина Владимировна, адъюнкт факультета подготовки кадров высшей квалификации Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: radova_ev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4687-6692>, SPIN-код: 3992-9600

Кожевин Дмитрий Федорович, начальник кафедры физико-химических основ процессов горения и тушения Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), доктор технических наук, доцент, e-mail: Yagmort_KDF@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6418-107X>, SPIN-код: 9647-7196

Самигуллин Гафур Халафович, профессор кафедры физико-химических основ процессов горения и тушения Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), доктор технических наук, профессор, e-mail: samigullin.gh@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5688-8921>, SPIN-код: 8830-4253

Information about the authors:

Radova Ekaterina V., adjunct of the faculty of training highly qualified personnel of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), e-mail: radova_ev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4687-6692>, SPIN: 3992-9600

Kozhevin Dmitriy F., chief of the physical and chemical bases of the burning and extinguishing processes department of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), candidate of technical sciences, associate professor, e-mail: Yagmort_KDF@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6418-107X>, SPIN: 9647-7196

Samigullin Gafur Kh., professor of the physical and chemical bases of the burning and extinguishing processes department of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), doctor of technical sciences, professor, e-mail: samigullin.gh@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5688-8921>, SPIN-код: 8830-4253