

УДК 614.841

DOI 10.48612/ntp/vtv9-nx33-fn47

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОЦЕССА НАГРЕВАНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО СТАЛЬНОГО РЕЗЕРВУАРА ПРИ ПОЖАРЕ

А. В. ТОПОРОВ, В. Е. ИВАНОВ, В. В. КИСЕЛЕВ

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Иваново

E-mail: ironaxe@mail.ru, vitaliyivanov@yandex.ru, slavakis76@mail.ru

В данной работе приведены результаты численных исследований динамики прогрева и потери несущей способности стенки вертикального стального резервуара (на примере РВС-5000) при воздействии теплового потока при пожаре. Для расчетов использовался нелинейный нестационарный термический и статический прочностной анализ методом конечных элементов с учетом температурной деградации свойств стали 03Х17Н14М3. В результате расчетов установлено, что критическое время до обрушения конструкции – 5-10 минут. Выявлена локализация максимальных эквивалентных напряжений (2191 МПа) в верхнем поясе («свободном борту»), превышающих предел текучести более чем в 12 раз. Научная новизна заключается в детерминированном расчете кинетики разрушения тонкостенной оболочки. Практическая значимость состоит в обосновании необходимости немедленно приступить к охлаждению с целью предотвращения прогрессирующего обрушения стенок резервуара.

Ключевые слова: пожар, горение, нефтепродукты, резервуар, температура, механические характеристики, метод конечных элементов, расчет, моделирование.

FINITE ELEMENT MODELING OF THE HEATING PROCESS OF A VERTICAL STEEL TANK IN A FIRE

A. V. TOPOROV, V. E. IVANOV, V. V. KISELEV

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education
«Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation
for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,
Russian Federation, Ivanovo

E-mail: ironaxe@mail.ru, vitaliyivanov@yandex.ru, slavakis76@mail.ru

This paper presents the results of numerical studies of the dynamics of heating and the loss of load-bearing capacity of the wall of a vertical steel tank (using the RVS-5000 as an example) under the influence of a heat flux during a fire. The calculations were performed using a nonlinear non-stationary thermal and static strength analysis by the finite element method, taking into account the temperature-induced degradation of the properties of 03Kh17N14M3 steel. The calculations showed that the critical time before the structure collapses is 5–10 minutes. The localization of maximum equivalent stresses (2191 MPa) in the upper belt (“free side”) has been identified, exceeding the yield strength by more than 12 times. The scientific novelty lies in the deterministic calculation of the failure kinetics of a thin-walled shell. The practical significance lies in the justification for the need to immediately begin cooling in order to prevent the progressive collapse of the tank walls.

Key words: fire, combustion, petroleum products, tank, temperature, mechanical characteristics, finite element method, calculation, modeling.

В условиях постоянного роста объемов добычи, транспортировки, хранения и переработки углеводородного сырья во всем мире, вопросы обеспечения пожарной безопасности на объектах нефтехранилищ приобретают особую значимость. История промышленной эксплуата-

ции резервуарных парков знает множество примеров, когда возгорание приводило к самым катастрофическим последствиям [1].

Вертикальные стальные резервуары (РВС) широко используются на нефтеперерабатывающих заводах, нефтебазах, крупных

промышленных предприятиях и терминалах. Их конструктивные особенности – большие объёмы хранимых нефтепродуктов (до 50 000 м³), значительная высота (18 м), наличие легковоспламеняющихся паров – создают условия для быстрого развития пожара и усложняют процесс его тушения. В этой связи, важной задачей является систематизация отечественного и зарубежного опыта по ликвидации последствий крупных пожаров на объектах хранения нефти и нефтепродуктов. Анализ таких происшествий позволяет выработать практические рекомендации по минимизации рисков и повышению устойчивости резервуарных парков при пожарах, а также обосновать способы их охлаждения и тушения. Для этого необходимо глубокое понимание физических процессов, протекающих при пожарах на резервуарных парках, что является залогом успешной борьбы с огнём.

Горение нефтепродуктов в РВС – это сложный физико-химический процесс, сопровождающийся интенсивным выделением теплоты, формированием конвективных потоков, интенсивным излучением, приводящим к формированию характерных температурных полей. Под температурным полем подразумевается пространственное распределение температуры в рассматриваемой области. Понимание структуры этих полей критически важно для оценки пожарной опасности, прогнозирования развития пожара, выбора эффективных средств тушения и обеспечения безопасности персонала.

При возгорании нефтепродукта в РВС формируется высокотемпературная зона горения (пламя). Тепловое излучение от пламени и конвективный перенос горячих газов приводят к быстрому прогреву стенок резервуара, крыши (плавающей или стационарной), нагреву соседних конструкций и хранящихся в них продуктов [2]. Поскольку на процесс горения влияет множество факторов, температурное поле при пожаре в РВС будет иметь ярко выраженную неоднородность и сложную конфигурацию.

На практике определение конфигурации температурных полей при горении РВС сопряжено с рядом серьёзных технических трудностей. Для этих целей возможно использовать ряд методов, которые возможно условно разделить на три категории.

Контактные методы – традиционный подход, основанный на размещении датчиков непосредственно в измеряемой среде или на поверхности конструкции еще на этапе ее возведения. Относительно прост в реализации, но для получения адекватной картины необходимо большое количество датчиков. Также большую техническую проблему представляет сбор и обработка информации, особенно во время

пожара, когда велика вероятность повреждения самих датчиков и контрольных линий.

Бесконтактные методы позволяют измерять температуру на расстоянии, что особенно ценно в условиях пожара. Инфракрасная термография (теплофотография) позволяет запечатлеть собственное тепловое излучения объектов в инфракрасном диапазоне спектра. Тепловизор отображает полную двумерную картину распределения температуры по поверхности объекта за один кадр. Можно дистанционно измерять температуру пламени, стенок, а также соседних резервуаров. Основная проблема применения этого метода – дым и водяные пары являются экраном для ИК-излучения, что ограничивает дальность и точность измерений. Также необходимо учитывать изменение коэффициента излучения (он меняется от температуры и состояния поверхности) [3]. Применение пирометров позволяет производить измерения высоких температур, но лишь в одной точке. Также, недостатки тепловизора в полной мере характерны и для пирометрии.

Реализация этих двух подходов возможно лишь при непосредственном горении либо на модельном очаге, либо на реальном пожаре.

Расчётно-аналитические и компьютерные методы позволяют смоделировать прогрев стенки резервуара во времени, оценить термические напряжения в металле и спрогнозировать момент потери несущей способности конструкции, а также другие параметры. Этим способом возможно с высокой точностью рассчитать двухмерные и трёхмерные поля температур, как непосредственно в зоне горения, так и на прилегающей территории. Расчётно-аналитические методы позволяют прогнозировать развитие сценария пожара и оценивать риски для конструкций, которые невозможно оснастить датчиками или исследовать при помощи тепловизора. Основное и неоспоримое достоинство компьютерного моделирования – виртуализация процесса – для его реализации не требуются реальные объекты и события [4, 5].

На практике, основной проблемой может являться снижение точности результатов расчета, которая напрямую зависит от качества исходных данных (геометрия, свойства материалов) и адекватности используемой модели.

Целью настоящей работы является численное исследование процесса прогрева и последующего разрушения стенки резервуара РВС 5000 из нержавеющей стали 03X17H14M3 при воздействии теплового потока от пожара в резервуаре при горении бензина, а также определение критического времени до потери несущей способности конструкции.

Объектом исследования в данной работе является вертикальный стальной резервуар номинальным объемом 5000 м³. Геометрические параметры резервуара: высота стенки: 12 м; диаметр: порядка 22,8 м (принято типовое значение для объема 5000 м³); толщина стенки резервуара в зависимости от пояса изменяется от 7 до 9 мм, при расчетах принято среднее значение 8 мм.

Моделирование выполнялось в программном комплексе SolidWorks Simulation. На первом этапе моделирования была создана твердотельная модель резервуара.

Тепловое воздействие моделировалось как поверхностный тепловой поток на внутреннюю поверхность стенки. Ввиду неравномерности пламени по высоте и согласно экспериментальным данным для бензина [6], в расчете принято значение пикового теплового потока 60 кВт/м². Данное значение обосновано тем, что оно отражает локальную нагрузку на верхнюю часть резервуара («свободный борт»), не омываемую жидкостью изнутри, и согласуется с данными СП 12.13130.2009 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности», а также с необходимостью обеспечения консервативного запаса прочности.

На внешней поверхности также задавался конвективный теплообмен с воздухом. Коэффициент конвекции для условий пожара (вынужденная конвекция) принят в диапазоне 25–50 Вт/м²·К. Начальная температура конструкции и окружающей среды 20 °С.

Материал стенки – аустенитная нержавеющая сталь 03X17H14M3. В расчете использованы следующие свойства при нормальной температуре: предел текучести – 172,3 МПа; модуль упругости $E = 193$ ГПа; коэффициент линейного теплового расширения $1,6 \cdot 10^{-5}$ /К; плотность – 8000 кг/м³; удельная теплоемкость 500 Дж/кг·К; теплопроводность 16,3 Вт/м·К. Для корректного моделирования в статическом анализе учитывалось снижение предела текучести и модуля упругости при повышенных

температурах в соответствии с литературными данными [7, 8].

Моделирование проводилось в два этапа.

На первом этапе реализовывался термический анализ (нестационарный). Проводился расчет поля температур по толщине и высоте стенки в течение 10 минут (600 с) с шагом по времени 10 секунд.

На втором этапе выполнялся статический прочностной анализ. Моделирование выполнялось методом конечных элементов. В работах [9, 10, 11] описывается данный метод и применяется при совершенствовании конструкций деталей устройств пожарной техники. Для проведения прочностного анализа резервуара использовались полученные температурные поля в момент времени $t = 5$ мин. Далее выполнялся расчет напряженно-деформированного состояния с учетом температурного расширения и снижения механических свойств.

Результаты расчета динамики прогрева стенки представлены в таблице. Анализ показал, что тонкостенная конструкция прогревается чрезвычайно быстро.

Уже после 5 минут температура стенки резервуара приближается к условному порогу в 500 °С, при достижении которого в стали интенсифицируются процессы, связанные с ползучестью [8]. При этом начинается интенсивное снижение прочностных характеристик стали. Через 10 минут температура достигает 904 °С, что соответствует полной потере несущей способности.

На рис. 1 и 2 представлено распределение температур через 5 и соответственно 10 минут воздействия теплового потока в 60 кВт/м² на стенки резервуара.

Полученные картины распределения тепловых полей свидетельствуют, что наибольшую температуру имеет верхний пояс резервуара. Столь высокий темп нагрева обусловлен значительной интенсивностью теплового потока от пламени бензина 60 кВт/м² и малой толщиной стенки.

Таблица. Температура стенки РВС 5000 в зоне максимального нагрева

Время воздействия, мин	Температура, °С	Последствия для конструкции резервуара
5	481	Деформация, потеря устойчивости
10	904	Механическое разрушение

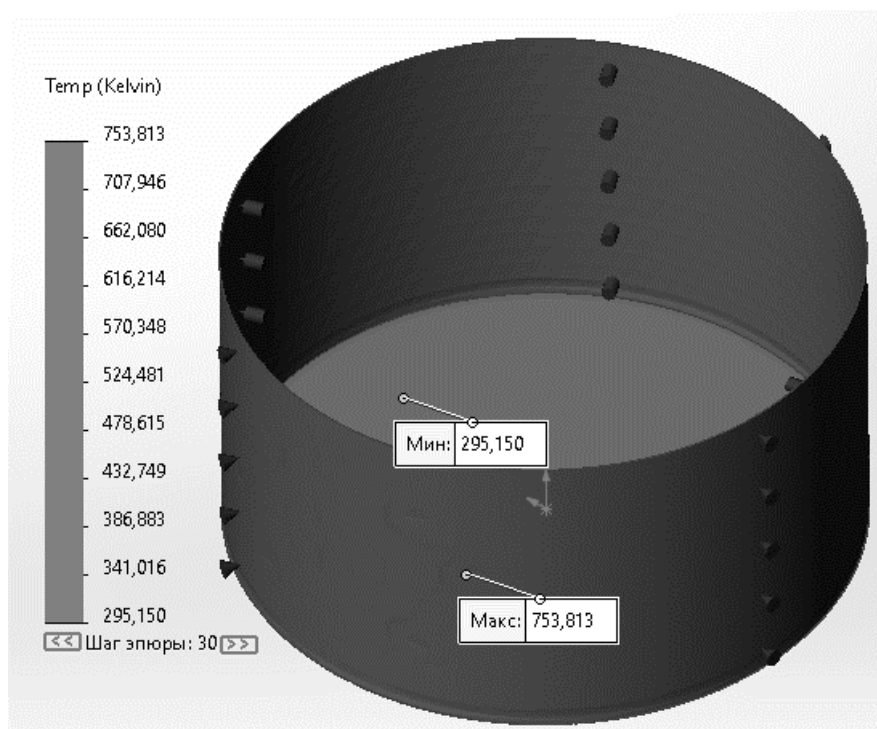


Рис. 1. Результаты термического расчета резервуара при воздействии теплового потока 60 кВт/м^2 на стенки резервуара в течении 5 минут

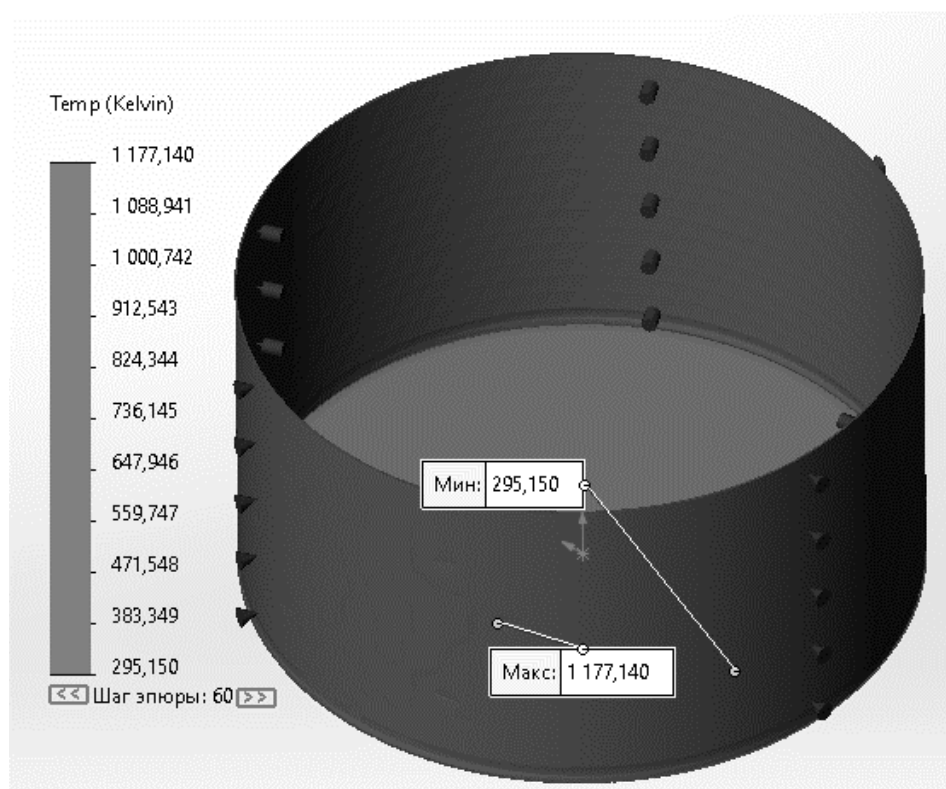


Рис. 2. Результаты термического расчета резервуара при воздействии теплового потока 60 кВт/м^2 на стенки резервуара в течении 10 минут

Проведенные тепловые расчеты послужили базой для статического прочностного анализа. Установлено, что в момент времени $t = 5$ мин при температуре 481°C максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу в верхней части резервуара достигают значения 2191 МПа . В то же время предел текучести стали 03Х17Н14М3 при данной температуре (с учетом температурной деградации свойств) составляет порядка $120\text{--}150\text{ МПа}$. Таким образом, наблюдается более чем 12-кратное превышение напряжений над пределом текучести.

На рис. 3 представлено напряженно-деформированное состояние конструкции резервуара при температуре 481°C . Как видим из рисунка, верхний пояс резервуара подвергается значительным деформациям.

В нижней части резервуара, где влияние теплового потока меньше и стенка частично

охлаждается жидкостью внутри, а также грунтом на который резервуар установлен, напряжения существенно ниже – минимальные значения составили $6,733\text{ МПа}$. Данный градиент напряжений (от $6,7$ до 2191 МПа) создает колоссальный изгибающий момент и приводит к неизбежной потере устойчивости. Это в результате и приводит к деформированию верхнего пояса.

Через 10 минут воздействия, при температуре 904°C , коэффициент снижения предела текучести для нержавеющей стали составляет менее $0,06$ от исходного значения. Фактически материал переходит в состояние ползучести под действием собственного веса и незначительных внешних нагрузок. Это приводит к полному разрушению конструкции. Поэтому, проведение расчетов на отрезке времени, превышающем 10 минут, не целесообразно.

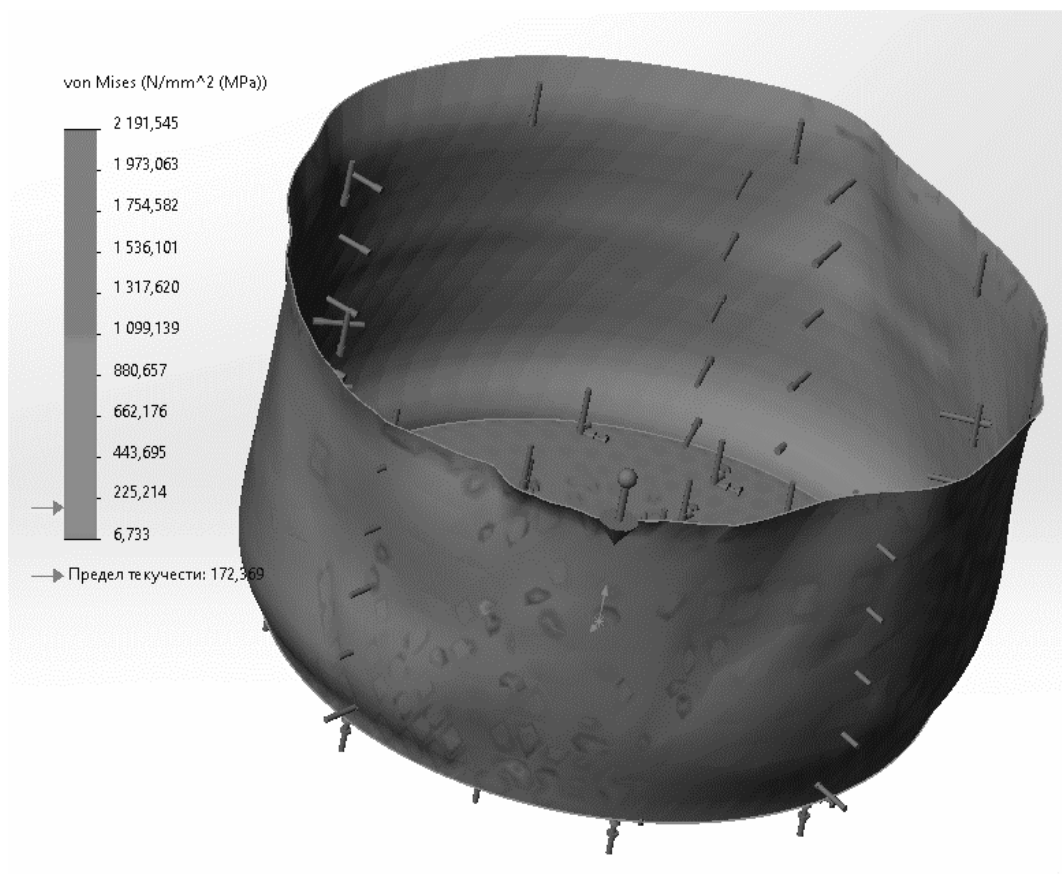


Рис. 3. Напряженно-деформированное состояние конструкции резервуара при температуре 481°C .

Результаты моделирования подтверждают экспериментальные данные о том, что потеря несущей способности РВС 5000 в условиях реального пожара при горении бензина происходит в интервале 5–10 минут. Это обусловлено тем, что процесс деформации стенок резервуара начинается через 5 минут после

начала воздействия высоких температур. При истечении 10 минут времени материал стенок резервуара практически полностью теряет прочность, что приводит к его разрушению.

В наиболее опасных условиях находится «свободный борт» – верхний пояс высотой около 2 м , не омываемый жидкостью (может

быть больше при уменьшении количества жидкости в резервуаре). Его разрушение приводит к взрывоподобному складыванию стенки внутрь или наружу резервуара с последующим выбросом горящего бензина.

Единственным эффективным способом сохранения целостности конструкции является немедленное применение систем водяного орошения стенок с целью их охлаждения. Причем, меры по охлаждению резервуара должны применяться немедленно. Промедление даже на 5 минут, как показывают расчеты, ставит конструкцию на грань разрушения вследствие появления трещин из-за резкого теплового удара при подаче воды на поверхность, разогретую до 500 °С и выше.

Таким образом, численное моделирование в SolidWorks Simulation позволило сделать следующие выводы:

1. Стенка резервуара PBC-5000 (сталь 03X17H14M3, толщина 8 мм) при пиковом тепловом потоке от горения бензина (60 кВт/м²) прогревается до критических температур в течение 5 минут.

2. Максимальные эквивалентные напряжения за это время достигают 2191 МПа, что превышает предел текучести материала при данной температуре более чем в 12 раз.

3. Критическое напряженно-деформированное состояние локализовано в «свободном борту» – верхнем поясе стенки высотой около 2 метров, не охлаждаемом жидкостью изнутри. Именно здесь начинается интенсивное пластическое деформирование и потеря устойчивости формы.

4. Через 10 минут температура достигает 904 °С, что приводит к деградации механических свойств стали до уровня менее 6 % от исходных, перевода материала в состояние ползучести и гарантируя обрушение конструкции.

5. Результаты подтверждают абсолютную необходимость немедленно приступить к охлаждению с целью предотвращения прогрессирующего обрушения стенок резервуара.

6. Задержка начала охлаждения даже на 5 минут неминуемо приведет к деформации и трещинообразованию из-за резкого термического удара при подаче воды на поверхность, разогретую свыше 500 °С.

Список литературы

1. Лунгу В. К. О необходимости разработки и исследования нового способа тушения пожаров нефти и нефтепродуктов в резервуарах // Естественные и технические науки. – 2023. № 6 (181). С. 258–262. EDN: JCCLST.

2. Рубцов В. В., Ширяев Е. В., Хай Л. В. Влияние скорости воздушного потока на тепловое излучение от углеводородного пожара в резервуаре для хранения нефти // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2024. № 3. С. 7–14. DOI: 10.25257/FE.2024.3.7-14. EDN: DSIZXT.

3. Туринов В. И. Измерение коэффициента температуропроводности поверхностных слоев непрозрачных твердых тел // Журнал технической физики. 1997. Т. 67, № 8. С. 128–130. EDN: RYNAMN.

4. Experimental and numerical study on earthquake-fire coupling failure mechanism of steel cylindrical tanks / J. Men, G. Chen, G. Reniers [et al.]. Reliability Engineering & System Safety, 2024, vol. 245, p. 110016. EDN: YDKFXI

5. Paula H. M. Insights from 595 tank farm fires from around the world. Process Safety and Environmental Protection, 2023, vol. 171, pp. 773–782. EDN: OKANYL

6. Исследование горения бензина в вертикальных каналах разного диаметра при разных температурах / Ф. Ш. Хафизов, Р. Р. Каримов, И. Ф. Хафизов [и др.] // Техносферная

безопасность. – 2019. – № 1(22). – С. 102-111. – EDN ZACLBR.

7. Марочник сталей и сплавов. 4-е изд., переработ. и доп. / Ю. Г. Драгунов, А. С. Зубченко, Ю. В. Каширский [и др.]. М.: 2014. 1216 с.

8. Pal V. K., Singh L. P. Study on Long-Term Tempering on the Microstructure of Creep Strength Enhanced Ferritic P92 Steel. Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies, 2022, vol. 15, issue 4, pp. 459–471. DOI: 10.17516/1999-494X-0407. EDN: HYJDEM.

9. Иванов В. Е., Пучков П. В., Легова И. А. Разработка рациональной конструкции зажима для восстановления работоспособности напорных пожарных рукавов // Современные проблемы гражданской защиты. 2020. № 2 (35). С. 54–60. EDN: CJYJZY.

10. Puchkov P. V., Ivanov V. E. Strength of Lifting Devices in a Tower Dryer for Fire Hoses. Russian Engineering Research, 2023, vol. 43, issue 3, pp. 297–298. DOI: 10.3103/s1068798x23040275. EDN: HVCOWI.

11. Иванов В. Е., Пучков П. В., Топоров А. В. Разработка конструкций устройств для разбивания автомобильных стекол // Современные проблемы гражданской защиты. 2023. № 2 (47). С. 61–67. EDN: OFIDWA.

References

1. Lungu V. K. O neobkhodimosti razrabotki i issledovaniya novogo sposoba tusheniya

pozharov nefi i nefteproduktov v rezervuarakh [On the need to develop and research a new method for extinguishing oil and petroleum product fires in tanks]. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2023, vol. 6 (181), pp. 258–262. EDN: JCCLST.

2. Rubtsov V. V., Shiryayev E. V., Khai L. V. Vliyanie skorosti vozdušnogo potoka na teplovoe izluchenie ot uglevodorodnogo pozhara v rezervuare dlya khraneniya nefi [Influence of air flow velocity on thermal radiation from a hydrocarbon fire in an oil storage tank]. *Pozhary i chrezvychnyye situatsii: predotvrashchenie, likvidatsiya*, 2024, issue 3, pp. 7–14. DOI: 10.25257/FE.2024.3.7-14. EDN: DSIZXT.

3. Turinov V. I. Izmerenie koeffitsienta temperaturoprovodnosti poverkhnostnykh sloev neprozrachnykh tverdykh tel [Measurement of the Thermal Diffusivity Coefficient of the Surface Layers of Invisible Solids]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 1997, vol. 67, issue 8, pp. 128–130. EDN: RYNAMN

4. Experimental and numerical study on earthquake-fire coupling failure mechanism of steel cylindrical tanks / J. Men, G. Chen, G. Reniers [et al.]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2024, vol. 245, p. 110016. EDN: YDKFXI

5. Paula H. M. Insights from 595 tank farm fires from around the world. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, vol. 171, pp. 773–782. EDN: OKANYL

6. Issledovanie goreniya benzina v vertikal'nykh kanalakh raznogo diametra pri raznykh temperaturakh [Research of gasoline combustion in vertical channels of different diameters at different temperatures] / F. Sh. Khafizov,

R. R. Karimov, I. F. Khafizov [et al.]. *Tekhnosfer-naya bezopasnost'*, 2019, vol. 1 (22), pp. 102–111. EDN: ZACLBR

7. Marochnik staley i splavov. 4-e izd., pere-rabot. i dop. [Brand Book of Steels and Alloys. 4th ed., revised. and additional] / Yu. G. Dragunov, A. S. Zubchenko, Yu. V. Kashirskii [et al.]. Moscow: 2014. 1216 p.

8. Pal V. K., Singh L. P. Study on Long-Term Tem-pering on the Microstructure of Creep Strength Enhanced Ferritic P92 Steel. *Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies*, 2022, vol. 15, issue 4, pp. 459–471. DOI: 10.17516/1999-494X-0407. EDN: HYJDEM.

9. Ivanov V. E., Puchkov P. V., Legkova I. A. Razrabotka ratsional'noi konstruktsii zazhima dlya vosstanovleniya rabotosposobnosti napornykh pozharnykh rukavov [Development of a rational design for a clamp to restore the functionality of pressure fire hoses]. *Sovremennyye problemy grazhdanskoi zashchity*, 2020, vol. 2 (35), pp. 54–60. EDN: CJYJZY.

10. Puchkov P. V., Ivanov V. E. Strength of Lifting Devices in a Tower Dryer for Fire Hoses. *Russian Engineering Research*, 2023, vol. 43, issue 3, pp. 297–298. DOI: 10.3103/s1068798x23040275. EDN: HVCOWI.

11. Ivanov V. E., Puchkov P. V., Toporov A. V. Razrabotka konstruktsii ustroystv dlya razbivaniya avtomobil'nykh stekol [Development of designs for devices used to break car windows]. *Sovremennyye problemy grazhdanskoi zashchity*, 2023, vol. 2 (47), pp. 61–67. EDN: OFIDWA.

Топоров Алексей Валериевич

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,

Российская Федерация, г. Иваново

кандидат технических наук, доцент

E-mail: ironaxe@mail.ru

Toporov Aleksey Valerievich

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy

of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies

and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,

Russian Federation, Ivanovo

candidate of technical sciences, docent

E-mail: ironaxe@mail.ru

Иванов Виталий Евгеньевич

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,

Российская Федерация, г. Иваново

кандидат технических наук, доцент

E-mail: vitaliyivanov@yandex.ru

Ivanov Vitaly Evgenievich

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,
Russian Federation, Ivanovo
candidate of technical sciences, docent
E-mail: vitaliyivanov@yandex.ru

Киселев Вячеслав Валериевич

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Иваново
кандидат технических наук, доцент
E-mail: slavakis76@mail.ru

Kiselev Vyacheslav Valerievich

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,
Russian Federation, Ivanovo
candidate of technical sciences, docent
E-mail: slavakis76@mail.ru