

Оперативное прогнозирование теплового потока при пожаре в вертикальном стальном резервуаре с защитной стенкой с использованием ANFIS

© Т.С. Станкевич^{1, 2} ✉, Д. Далнер³, М. Трчка³, А. Томитчек³

¹ Калининградский государственный технический университет (Россия, 236022, г. Калининград, Советский пр-т, 1)

² Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Россия, 101000, г. Москва, Мясницкая ул., 20)

³ Высшая горно-металлургическая школа — Остравский технический университет (Чешская Республика, 708 00, г. Острава-Поруба, 17 Листопаду, 2172/15)

АННОТАЦИЯ

Введение. Резервуары и резервуарные парки широко распространены во многих субъектах Российской Федерации и являются одним из важнейших элементов технологической схемы добычи, подготовки, транспортировки и переработки нефти и нефтепродуктов. Проблема обеспечения пожарной безопасности резервуарных парков, соответствующих, согласно риск-ориентированной модели безопасности, наиболее высоким уровням риска, является актуальной как на российском, так и на мировом уровнях. В связи с развитием в течение последних десятилетий информационных и коммуникационных технологий и их внедрением в процессы функционирования и управления различными объектами появились передовые методы прогнозирования возникновения и развития чрезвычайных ситуаций на объектах, оптимизации управленческих решений при локализации и ликвидации чрезвычайных ситуаций, в том числе и пожаров.

Цели и задачи. В работе авторы представляют разработанную ими модель оперативного прогнозирования теплового потока на основе искусственных нейронных сетей для повышения безопасности персонала пожарной охраны при тушении пожара на наземном вертикальном стальном резервуаре с защитной стенкой. В исследовании особое внимание авторы уделяют выявлению зависимости теплового потока от ветровой нагрузки.

Методы. Для достижения указанной цели авторами организована и проведена серия экспериментов, осуществлен сбор экспериментальных данных о тепловом потоке и сформированы обучающие и тестовые выборки.

Результаты. Посредством построения искусственных нейронных сетей ANFIS выполнено определение зависимостей теплового потока от факторов внешней среды. Произведено сравнение различных типов функций принадлежности, методов оптимизации и методов генерирования системы и установлено, что для сетей ANFIS, выполняющих прогнозирование теплового потока без учета и с учетом ветровой нагрузки, оптимальным является применение метода субкластеризации и гибридного метода оптимизации, что обеспечивает самые низкие значения ошибки на выборках.

Обсуждение. Результаты анализа показывают, что скорость ветра и расположение резервуара могут привести к повышению температуры воздуха, стенки резервуара и бензина. Поэтому, несмотря на сложность анализа, регистрация всех этих факторов позволяет прогнозировать безопасное для пожаротушения расстояние от горящего резервуара.

Выводы. Научное исследование позволило разработать модель оперативного прогнозирования теплового потока на основе использования элементов искусственного интеллекта (сетей ANFIS). Полученные в ходе работы результаты позволяют повысить эффективность оперативного прогнозирования динамики развития пожаров в резервуарах и резервуарных парках и оптимизацию процессов принятия управленческих решений ответственными лицами.

Ключевые слова: пожарная безопасность; бензин; физическая модель; ветровая нагрузка; искусственные нейронные сети

Благодарности. Работа выполнена в рамках НИР «Разработка модели пожара для оценки риска на особо опасных и технически сложных объектах», Остравский технический университет, Чешская Республика, 2018–2019 гг.

Для цитирования: Станкевич Т.С., Далнер Д., Трчка М., Томитчек А. Оперативное прогнозирование теплового потока при пожаре в вертикальном стальном резервуаре с защитной стенкой с использованием ANFIS // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 5. С. 13–39. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.05.13-39

✉ Станкевич Татьяна Сергеевна, e-mail: tatiana.stankevich@klgtu.ru

Введение

В настоящее время мировое сообщество все большее внимание уделяет обеспечению безопасности человека и устойчивому развитию человечества во взаимодействии с окружающей средой. Глобаль-

ной проблемой, вызывающей озабоченность во всем мире, является возрастание пожарной опасности ряда объектов, относящихся к стратегически важным для национальной безопасности государства объектам топливно-энергетического комплекса.

Актуальность проблемы обеспечения пожарной безопасности объектов топливно-энергетической сферы обусловлена тем, что именно энергетика является основной отраслью промышленности любого государства. Кроме того, энергетика имеет решающее межотраслевое значение, поскольку уровень и качество добычи, производства и поставок энергоресурсов определяют условия производственной деятельности страны и обслуживания населения.

В настоящее время в России, как указано в Единой межведомственной информационно-статистической системе (ЕМИСС)¹, насчитывается 8139 резервуаров для хранения нефтепродуктов общей вместимостью 16 512,17 тыс. м³ и 772 резервуара для хранения нефти общей вместимостью 5590,58 тыс. м³. Согласно итоговым отчетам Минэнерго России за 2018 г.² и за 2019 г.³, в российской нефтяной отрасли в 2018 г. введено в эксплуатацию 54 месторождения, в 2019 г. — 31 месторождение, в 2018 г. общая протяженность новых магистральных нефтепроводов составила 216 км, в 2019 г. — 324 км. Рост переработки нефти для внутреннего использования и для вывоза за рубеж сопровождается строительством крупных нефтебаз с большими объемами резервуаров на территории страны. Так, в Российской Федерации активно строятся резервуарные парки с резервуарами объемом до 50 тыс. м³, и в то же время ведутся работы по проектированию резервуаров объемом до 100 тыс. м³.

Рост объемов добычи нефти и активное развитие нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности в России увеличивают количество

пожаров, способствуя росту их масштабов и наносимому ими ущербу. За период с 2007 по 2016 гг., как указано в [1], произошло 126 чрезвычайных ситуаций. Динамика возникновения различных типов чрезвычайных ситуаций (пожар, взрыв или выброс) представлена на рис. 1. За десятилетний период произошло 65 пожаров, 46 взрывов и 15 выбросов опасных веществ, что составляет от общего количества инцидентов 52, 36 и 12 %, соответственно (рис. 2). Среди пожаров на нефтебазах 93,4 % пожаров и аварий зафиксировано на наземных резервуарах, из которых 53,9 % — на резервуарах для хранения бензина; 32,1 % — на резервуарах для хранения сырой нефти; 14,0 % — на резервуарах, используемых для хранения других видов нефтепродуктов (дизельное топливо, керосин, мазут и т.д.).

Согласно [2], риски различных происшествий на резервуарах в России достаточно высоки. Например, риск возникновения пожара дыхательной арматуры и в зеркале нефтепродукта составляет $9,0 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$, что в 90 раз выше рекомендованного уровня 10^{-6} , указанного в ГОСТ 12.1.004-91⁴.

Несмотря на то, что статистические данные об авариях на объектах нефтеперерабатывающей и нефтехимической отраслей демонстрируют снижение частоты возникновения пожаров и уменьшение количества пострадавших людей при пожарах, цифры неутешительны и превышают аналогичные показатели в Европе, представленные в Major Accident Reporting System (eMARS)⁵, и США, содержащиеся в данных National Fire Protection Association⁶.

¹ ЕМИСС. URL: <https://www.fedstat.ru/organizations/>

² Итоги работы Минэнерго России и основные результаты функционирования ТЭК в 2018 году. Задачи на среднесрочную перспективу. URL: https://minenergo.gov.ru/prezentaciya_kollegiya_2019.pdf

³ Итоги работы Минэнерго России в 2019 году и основные задачи на 2020 год. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/18288>

⁴ ГОСТ 12.1.004-91. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность. Общие требования. URL: <http://docs.cntd.ru/document/9051953>

⁵ eMARS. URL: <https://emars.jrc.ec.europa.eu/en/emars/content>

⁶ National Fire Protection Association. U.S. fire problem. URL: <https://www.nfpa.org/News-and-Research/Data-research-and-tools/US-Fire-Problem>

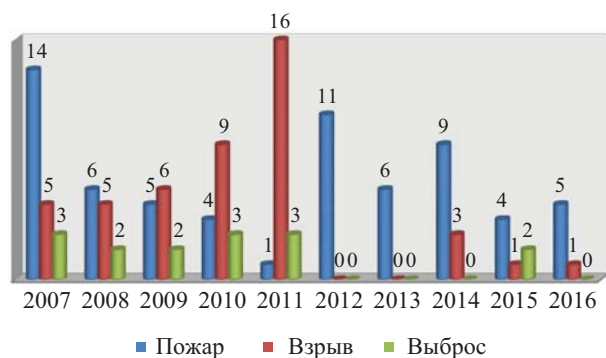


Рис. 1. Количество чрезвычайных ситуаций на объектах нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности в России за период с 2007 по 2016 гг.

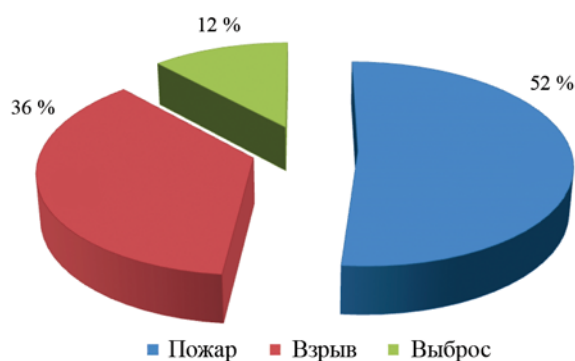


Рис. 2. Распределение типов чрезвычайных ситуаций на объектах нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности в России за период с 2007 по 2016 гг.

Возникновение пожаров в хранилищах нефти и нефтепродуктов и их распространение несет существенную угрозу для жизни и здоровья граждан, а также оказывает негативное воздействие на окружающую среду (вплоть до катастрофических значений). Пожары на объектах топливно-энергетической сферы характеризуются обширной зоной развития горения, мощным тепловым излучением в окружающую среду, при этом высота светящейся части пламени в 1–2 раза превышает диаметр горящего резервуара [3]. В случае пожара огонь распространяется с большой скоростью, горение сопровождается взрывами и выбросами горячей жидкости. Пожары в резервуарах носят затяжной характер, и для полной ликвидации пожара может потребоваться от нескольких часов до нескольких дней и большое количество сил и средств [3]. Особенно опасны пожары на нефтебазах и нефтехранилищах, поскольку нагрев соседних резервуаров может стать причиной каскадного развития пожара.

Таким образом, повышение пожаро- и взрывобезопасности резервуаров и резервуарных парков является важной и актуальной проблемой. Работа в этом направлении обеспечивает более высокий уровень защиты населения и окружающей среды от угроз техногенного характера. Для изучения выбранны резервуарные парки для хранения бензина, так как именно в них сконцентрировано максимальное количество горючей жидкости и существует высокая вероятность распространения огня на соседние резервуары. Выбор вида топлива (бензина) обусловлен результатами анализа статистических данных о пожарах на объектах хранения нефти и нефтепродуктов (более половины аварийных ситуаций происходят в наземных резервуарах для хранения бензина).

В данном исследовании предлагается рассмотреть парк с вертикальными стальными резервуарами с защитной стенкой. Это связано с тем, что этот тип хранилищ является многообещающей тенденцией в строительстве новых или расширении существующих складов нефти и нефтепродуктов.

Целью исследования является повышение безопасности персонала пожарной охраны при тушении пожара на наземном вертикальном стальном резервуаре с защитной стенкой путем разработки модели прогнозирования динамики развития пожара (теплового потока) на основе искусственных нейронных сетей.

Материалы и методы

Процессы горения жидкостей активно изучаются российскими и зарубежными учеными. В качестве примера можно привести работу В.И. Блинова, Г.М. Худякова и И.И. Петрова [4], в ходе которой

авторами проводились комплексные исследования процессов горения нефти и нефтепродуктов и механизмов тушения веществ. Естественным продолжением указанной работы стали совместные исследования И.И. Петрова и В.Ч. Реутта [5], в которых особое внимание уделялось установлению критических условий потухания пламени нефтепродукта при его перемешивании в резервуаре. Вопросы пожарной безопасности в резервуарных парках исследовались О.М. Волковым и Г.А. Проскуряковым [6], а именно причины возникновения и развития пожаров на объектах, основные мероприятия по предупреждению и тушению пожаров нефти и нефтепродуктов. Ю.А. Абрамов и А.Е. Басманов в работе [7] рассмотрели детерминированную и стохастическую модели постановки задачи оптимального расположения и выбора боевых задач для пожарных стволов при локализации пожара в резервуарном парке. Ими предложены метод и алгоритм решения сформулированной задачи как в детерминированном, так и в стохастическом виде. В исследовании [8] Zabetakis M.G. и Burgess D.S. рассматривали вопрос испарения жидкого водорода с точки зрения теории теплопередачи и экспериментально определяли распределение легковоспламеняющихся смесей над зоной разлива. В процессе экспериментов выполнялось воспламенение паров водорода над сосудом Дьюара и воспламенение паровоздушной смеси над зоной разлива в различное время после разлива различного количества (до 90 л) жидкого водорода. Markstein G.H. в работах [9, 10] описал результаты экспериментов по измерению общего лучистого излучения на свободно горящем пламени щелевой горелки и на струйном факеле (топливо — метан, этан, этилен и пропилен с общей скоростью тепловыделения), провел измерения лучистого теплообмена и теплопередачи от горения метана, этана, этилена и пропилена на вертикальной поверхности пористого металла.

Форму пламени и тепловой поток описывал в своих работах Drysdale D. [11]. Также в литературе представлены некоторые экспериментальные исследования, связанные с пожарами в резервуарах для хранения топлива или пожарами в бассейнах. Например, в работе Babrauskas V. [12] содержатся экспериментальные данные по скоростям горения бензина, сжиженного природного газа и спирта для бассейнов диаметром от 0,2 до 7,0 м. Munoz M. в работе [13] проведены термографические измерения при пожарах в бассейнах с бензином и дизельным топливом диаметром от 1,5 до 6,0 м. В работе [14] описаны эксперименты по пожаротушению в бассейнах (диаметр 3,0 м) для измерения массовых скоростей горения. Особенности развития пожаров в резервуарах типа «стакан в стакане» описаны в ра-

ботах [15, 16]. Влияние тепловых нагрузок пожара в нефтяном резервуаре на ближайшие резервуары представлено в статье [17].

На основании анализа литературных источников можно сделать вывод, что в основном эксперименты проводятся без учета влияния ветровой нагрузки (при скорости ветра 0 м/с), в работах большинства исследователей либо не учитывается влияние ветра на тепловой поток при пожаре, либо использует упрощенные соотношения.

Поскольку процессы горения, теплового излучения пламени и его рассеяния в атмосфере отличаются сложным взаимным влиянием, необходимо тщательно изучить процесс развития пожара в резервуаре при различной ветровой нагрузке, чтобы выбрать средства защиты резервуара и разработать рекомендации о том, как проводить действия пожарных подразделений по тушению пожара.

Недавний прорыв в развитии искусственного интеллекта, больших данных и машинного обучения создал беспрецедентные возможности для перехода к передовым интеллектуальным системам, обеспечивающим обработку большого объема информации различной природы и формирующим управленческие решения в неформализуемых и слабоформализуемых критических ситуациях обеспечения безопасности объектов. Однако подобные инструменты активно применяются на практике именно в областях маркетинга, социальных сетей, бизнеса, медицине, на производстве указанные методы используются ограниченно.

В представленной работе авторами предложено использовать элементы искусственного интеллекта (искусственные нейронные сети) для обработки данных эксперимента по моделированию пожара в резервуаре на территории резервуарного парка, что соответствует приоритетам и перспективам научно-технологического развития России согласно Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации (Стратегии НТР РФ).

В исследовании использована адаптивная система нейро-нечеткого вывода (adaptive network-based fuzzy inference system — ANFIS) [18] для прогнозирования динамики пожара в основном резервуаре. Выбор сети ANFIS обусловлен тем, что данный тип сетей обеспечивает меньшую среднеквадратичную ошибку RMSE по сравнению с другими нейро-нечеткими системами. Кроме того, сети ANFIS очень эффективны для решения задач прогнозирования [19].

С точки зрения архитектуры, сеть ANFIS — это пятислойная сеть с узлами, каждый из которых имеет специализированную функциональность. Функция узла каждого входа определяется по формуле (1) [18]:

$$O_{1,i} = \mu_{A_i}(P_j), \quad (1)$$

где P_j — входные данные для узла i ;

A_i — функция принадлежности.

Для обобщенной колоколообразной функции используется формула (2)⁷:

$$\mu_A(P_j) = \frac{1}{1 + \left| \frac{P_j - c_i}{a_i} \right|^{2b_i}}, \quad (2)$$

где a_i — коэффициент концентрации функции принадлежности;

b_i — коэффициент крутизны функции принадлежности;

c_i — координата максимума функции принадлежности.

Для гауссовой функции применяется формула (3)⁸:

$$\mu_A(P_j) = e^{-\frac{(P_j - b_i)^2}{2c_i^2}}, \quad (3)$$

где b_i — координата максимума функции принадлежности;

c_i — коэффициент концентрации функции принадлежности.

Для гауссовой комбинированной функции применяются формулы (4)–(5)⁹:

если $c_{1,i} < c_{2,i}$, то

$$\mu_A(P_j) = \begin{cases} e^{-\frac{(P_j - c_{1,i})^2}{2a_{1,i}^2}}, & P_j < c_{1,i}, \\ 1, & c_{1,i} \leq P_j \leq c_{2,i}, \\ e^{-\frac{(P_j - c_{2,i})^2}{2a_{2,i}^2}}, & P_j > c_{2,i}; \end{cases} \quad (4)$$

если $c_{1,i} > c_{2,i}$, то

$$\mu_A(P_j) = \begin{cases} e^{-\frac{(P_j - c_{1,i})^2}{2a_{1,i}^2}}, & P_j < c_{2,i}, \\ e^{-\frac{(P_j - c_{1,i})^2}{2a_{1,i}^2}} \cdot e^{-\frac{(P_j - c_{2,i})^2}{2a_{2,i}^2}}, & c_{2,i} \leq P_j \leq c_{1,i}, \\ e^{-\frac{(P_j - c_{2,i})^2}{2a_{2,i}^2}}, & P_j > c_{1,i}; \end{cases} \quad (5)$$

где $c_{1,i}(c_{2,i})$ — минимальное (максимальное) значение ядра нечеткого множества;

$a_{1,i}(a_{2,i})$ — коэффициент концентрации левой (правой) части функции принадлежности.

⁷ MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/gbellmf.html>

⁸ MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/gaussmf.html>

⁹ MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/gauss2mf.html>

Для треугольной функции расчет производится по формуле (6)¹⁰:

$$\mu_A(P_j) = \begin{cases} 0, & P_j \leq a_i, \\ \frac{P_j - a_i}{b_i - a_i}, & a_i \leq P_j \leq b_i, \\ \frac{c_i - P_j}{c_i - b_i}, & b_i \leq P_j \leq c_i, \\ 0, & c_i \leq P_j, \end{cases} \quad (6)$$

где $[a_i, c_i]$ — диапазон изменения переменной;

b_i — наиболее вероятное значение переменной.

Для трапециевидной функции применяется формула (7)¹¹:

$$\mu_A(P_j) = \begin{cases} 0, & P_j \leq a_i, \\ \frac{P_j - a_i}{b_i - a_i}, & a_i \leq P_j \leq b_i, \\ 1, & b_i \leq P_j \leq c_i, \\ \frac{d_i - P_j}{d_i - c_i}, & c_i \leq P_j \leq d_i, \\ 0, & d_i \leq P_j, \end{cases} \quad (7)$$

где $[a_i, d_i]$ — пессимистическая оценка значений переменной;

$[b_i, c_i]$ — оптимистическая оценка значений переменной.

Для разности между двумя сигмоидальными функциями принадлежности используется формула (8)¹²:

$$\mu_A(P_j) = \frac{1}{1 + e^{-a_{1,i}(P_j - c_{1,i})}} - \frac{1}{1 + e^{-a_{2,i}(P_j - c_{2,i})}}. \quad (8)$$

Для пи-образной функции принадлежности применяется формула (9)¹³:

$$\mu_A(P_j) = \begin{cases} 0, & P_j \leq a_i \\ 2 \left(\frac{P_j - a_i}{b_i - a_i} \right)^2, & a_i \leq P_j \leq \frac{a_i + b_i}{2} \\ 1 - 2 \left(\frac{P_j - b_i}{b_i - a_i} \right)^2, & \frac{a_i + b_i}{2} \leq P_j \leq b_i \\ 1, & b_i \leq P_j \leq c_i \\ 1 - 2 \left(\frac{P_j - c_i}{d_i - c_i} \right)^2, & c_i \leq P_j \leq \frac{c_i + d_i}{2} \\ 2 \left(\frac{P_j - d_i}{d_i - c_i} \right)^2, & \frac{c_i + d_i}{2} \leq P_j \leq d_i \\ 0, & P_j \geq d_i \end{cases} \quad (9)$$

Расчет произведения двух сигмоидальных функций принадлежности выполняется по формуле (10)¹⁴:

$$\mu_A(P_j) = \frac{1}{1 + e^{-a_{1,i}(P_j - c_{1,i})}} \cdot \frac{1}{1 + e^{-a_{2,i}(P_j - c_{2,i})}}. \quad (10)$$

Для изучения влияния теплового потока на основную и защитную стенки объекта и на соседние резервуары при различных ветровых нагрузках в рамках исследований для резервуара с защитной стенкой выполнено моделирование пожара, вызванного горением бензина в основном резервуаре.

Авторами проводился эксперимент с использованием модели реального объекта — резервуара объемом 125 тыс. м³. Геометрические размеры модели представлены в табл. 1, на рис. 3 наглядно изображена схема модели, на рис. 4 представлены фотографии модели. Общий объем жидкости (топливо + водяной балласт) соответствует 80 % вместимости бака. Выбор данной вместимости обусловлен тем, что заполнение объема резервуара на 80 % является типичным вариантом заполнения. Используемая марка стали модели — S590, она соответствует марке стали реального резервуара с защитной стенкой объемом 125 тыс. м³.

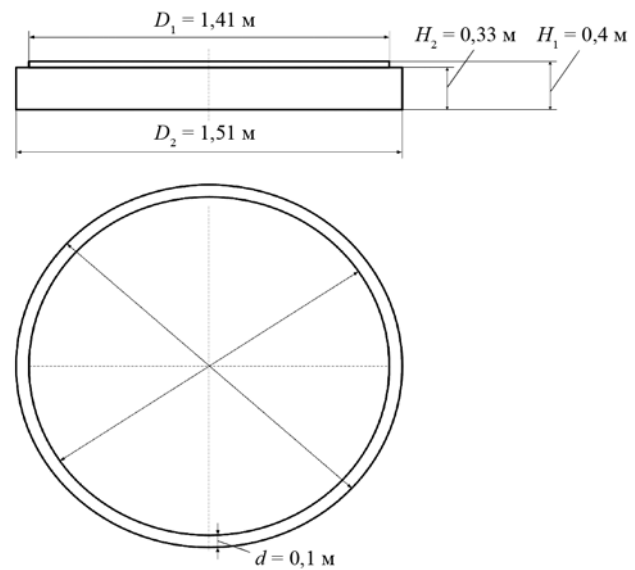


Рис. 3. Схема (вид сбоку и вид сверху) физической модели: D_1 — диаметр основного резервуара, м; D_2 — диаметр защитного резервуара, м; d — ширина межстенного пространства, м; H_1 — высота основного резервуара, м; H_2 — высота защитного резервуара, м

При каждом испытании и диаметре основного бака количество сжигаемого топлива составляло 0,499 м³. Как указано в [20], присутствие воды под топливом может влиять на характеристики сгорания при кипении (внезапное испарение воды), которое

¹⁰ MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/trimf.html>

¹¹ MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/trapmf.html>

¹² MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/dsimgf.html>

¹³ MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/pimf.html>

¹⁴ MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/psimgf.html>



Рис. 4. Модель резервуара с защитной стенкой

зависит от типа топлива и количества топлива над водой. Однако это явление не наблюдалось во время продолжающихся экспериментов.

Таблица 1. Геометрические параметры физической модели

Параметр	Реальный объект	Физическая модель
Диаметр защитного резервуара, м	90,47	1,51
Диаметр основного резервуара, м	84,47	1,41
Высота защитного резервуара, м	20,00	0,33
Высота основного резервуара, м	24,10	0,40
Толщина стенки и днища резервуара, м	0,06...0,26	0,002

Температура окружающей среды во время испытаний составляла 0 °С, атмосферное давление — 1 атм. Поскольку резервуар был открыт сверху (без крыши), то эти эксперименты похожи на пожары в бассейне.

В процессе моделирования пожара авторами выбраны значения наиболее характерных для июля ветров (июль — самый опасный период для обеспечения пожарной безопасности хранилищ нефти и нефтепродуктов). Учтено, что, как указано в [15], максимальная скорость ветра при численном моделировании не должна превышать 10 м/с, поскольку угол отклонения пламени от вертикали под действием ветра и длина пламени больше не изменяются значительно с дальнейшим увеличением скорости ветра. Эксперименты с физической моделью проводились в помещении при различных ветровых нагрузках: эксперименты № 1, 2, 10 и 11 — без ветровой нагрузки; эксперимент № 3 — скорость ветра 1,9 м/с; эксперименты № 4 и 5 — 1,3 м/с; эксперименты № 6 и 7 — 0,9 м/с; эксперимент № 8 — 4 м/с; эксперимент № 9 — 4,4 м/с.

В ходе экспериментов использованы датчики теплового потока, характеристики которых более подробно представлены в табл. 2. Расположение датчиков теплового потока SBG01 показано на рис. 5–8. Более подробная информация о датчиках доступна в инструкции¹⁵.

¹⁵ User manual SBG01. Water cooled heat flux sensor. URL: https://www.hukseflux.com/uploads/product-documents/SBG01_manual_v1722.pdf

Таблица 2. Датчики теплового потока

Номер эксперимента	Диапазон измерения датчика, кВт/м ²	Расстояние от центра резервуара до датчика, м	Угол наклона датчика от горизонтали, направленной вверх, град	Высота датчика от земли, м
1	0...100	1,56	50	0,4
2	0...100	2,00	33	0,4
3	0...200	1,26	56	0,4
4	0...50	2,80	27	0,4
5	0...50	2,80	27	0,4
6	0...100	1,26	56	0,4
7	0...100	1,26	56	0,4
8	0...100	1,26	56	0,4
9	0...100	1,56	50	0,4
10	0...100	1,56	50	0,4
11	0...100	1,56	50	0,4

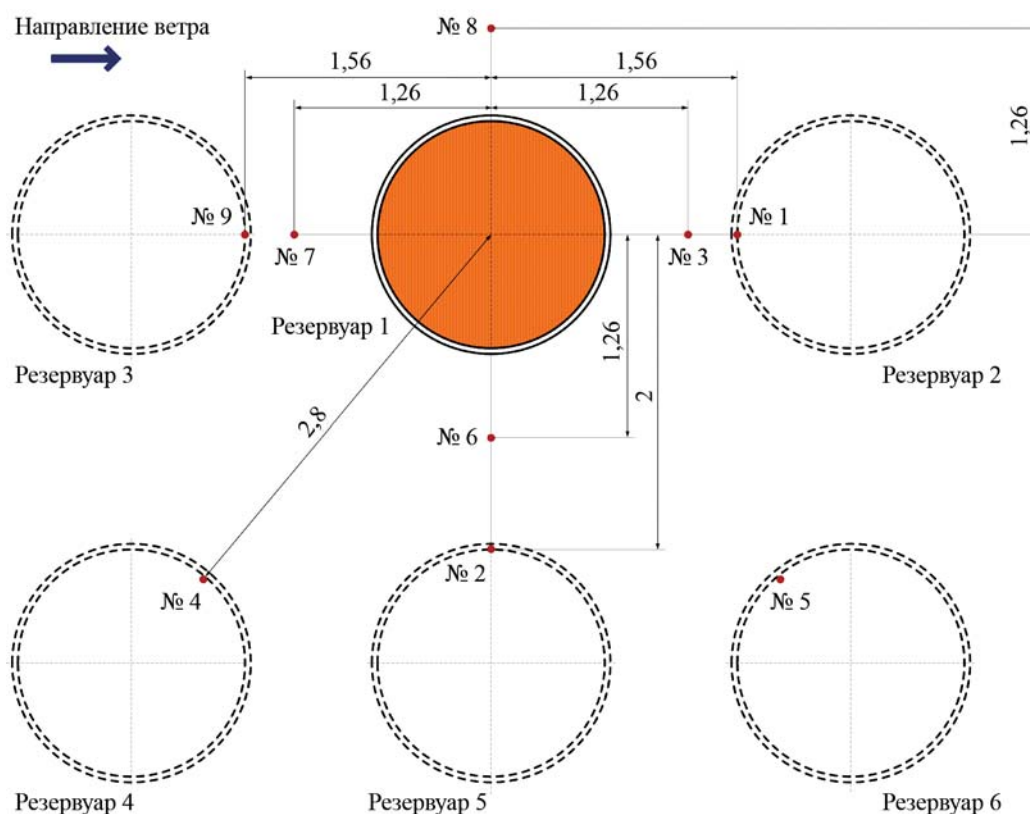


Рис. 5. Датчики теплового потока (вид сверху)

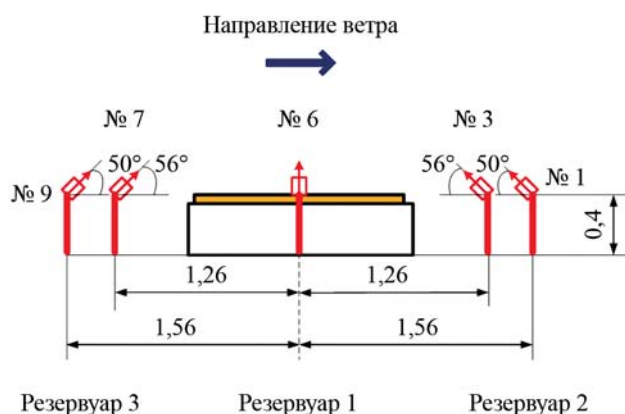


Рис. 6. Датчики теплового потока (вид сбоку для резервуаров № 1–3)

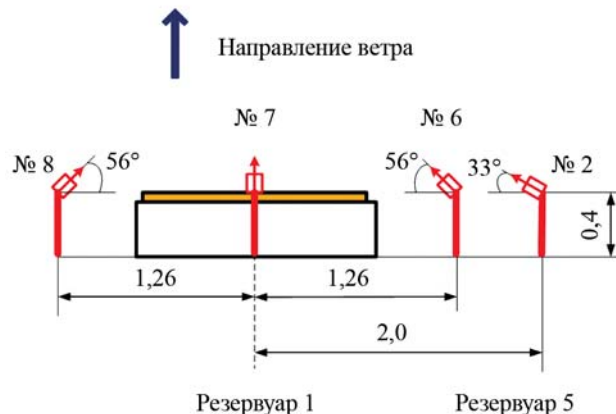


Рис. 7. Датчики теплового потока (вид сбоку для резервуаров № 1 и 5)

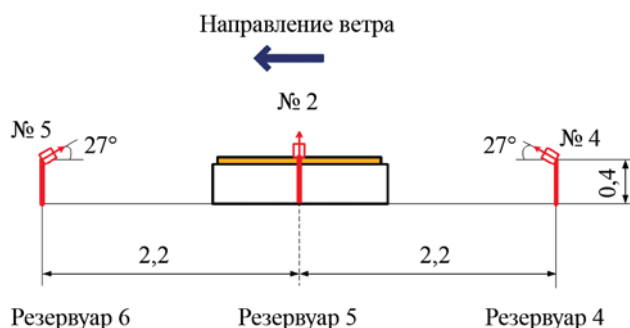


Рис. 8. Датчики теплового потока (вид сбоку для резервуаров № 4–6)

При использовании модельного эксперимента возникает проблема сравнения модели с реальным объектом, которая решается путем применения теории подобия. Теория подобия позволяет установить характеристики модели, параметры, которые целесообразно варьировать в экспериментах, правила переноса результатов на реальные объекты и ответить на иные вопросы, связанные с реализацией экспериментов.

В проведенном авторами исследовании применялся метод подобия. Необходимым и достаточным условием подобия модели и объекта является постоянство числовых значений безразмерных комплексов. В экспериментах модель объекта и вертикальный стальной резервуар с защитной стенкой объемом 125 тыс. м³ геометрически подобны, так как их одинаковые размеры пропорциональны и углы равны.

Поскольку в процессе исследования создавалась различная ветровая нагрузка, это требовало кинематического сходства реальной скорости ветра и скорости ветра в эксперименте. Работа [21] демонстрирует очень слабую зависимость коэффициента подобия k от критерия Рейнольдса

Re при $Re \gg 1000$, т.е. аэродинамические коэффициенты на моделях требуют выполнения только условия подобия по геометрической (линейной) шкале. При этом влияние степени турбулентности на расчетные значения обычно не принимается во внимание, поскольку измерения степени турбулентности в потоке воздуха и регулирования этой степени требуют сложного оборудования и специальных исследований. Таким образом, скорость на модели и скорость на реальном объекте кинематически подобны, поскольку при соблюдении геометрического подобия скорости подобных точек пропорциональны, их траектории аналогичны:

$$\frac{l_{1i}}{l_{2i}} = idem, \quad \frac{v_{1k}}{v_{2k}} = idem, \\ i = 1, 2, \dots, n, \quad k = 1, 2, \dots, m, \quad (11)$$

где l_{1i} , l_{2i} , l_{1k} , l_{2k} — характерные геометрические размеры и скорости.

Известно, что характер, форма и размеры пламени при прочих равных условиях определяются характеристиками горючей жидкости, ее температурой, размерами сосуда и ветровой нагрузкой. На ос-

новании геометрического подобия модели и реального объекта, кинематического подобия скоростей ветра и выбора одинакового вида горючей жидкости (бензина) можно сделать вывод, что в ходе экспериментов обеспечивается подобие пламенной зоны на физической модели и резервуаре объемом 125 тыс. м³. Кроме того, при выборе геометрических размеров модели авторами учитывалось требование обеспечения развития турбулентного режима горения, которое характерно для реального объекта.

Результаты и их обсуждение

После проведения экспериментов с использованием модели авторами получены значения теплового потока при пожаре бензина в основном резервуаре в зависимости от расстояния от резервуара до объекта и скорости ветра. На рис. 9 наглядно представлены данные от датчика № 1, зафиксированные в результате экспериментов № 1, 2, 10 и 11, на рис. 10 — данные от датчика № 1 при скорости ветра 1,9 м/с.

Для построения сети ANFIS, прогнозирующей тепловой поток (без ветровой нагрузки), отобрано четыре эксперимента без ветровой нагрузки: эксперименты № 1, 2, 10 и 11. В качестве входных па-

раметров сети использованы следующие: вход 1 — время, с; вход 2 — расстояние от центра резервуара, м; вход 3 — угол наклона от горизонтали вверх, град.; выходной параметр сети — тепловой поток, кВт/м².

С целью построения сети ANFIS для прогнозирования теплового потока (с ветровой нагрузкой) отобрано семь экспериментов с ветровой нагрузкой: эксперименты № 3–9. В качестве входных параметров сети использованы следующие: вход 1 — время, с; вход 2 — скорость ветра, м/с; вход 3 — расстояние от центра резервуара, м; вход 4 — угол наклона от горизонтали вверх, град.; выходной параметр сети — тепловой поток, кВт/м².

Общее количество экспериментальных данных для построения сети ANFIS, прогнозирующей тепловой поток без ветровой нагрузки, составило 10 845 записей: 50 % от общего набора — обучающая выборка, 50 % от общего набора — тестовая выборка. При построении сети ANFIS, определяющей прогноз теплового потока при ветровой нагрузке, использованы экспериментальные данные в количестве 32 518 записей. Из общего набора записей сформированы выборки для обучения и тестирования: 50 % от общего набора — обучающая выборка,

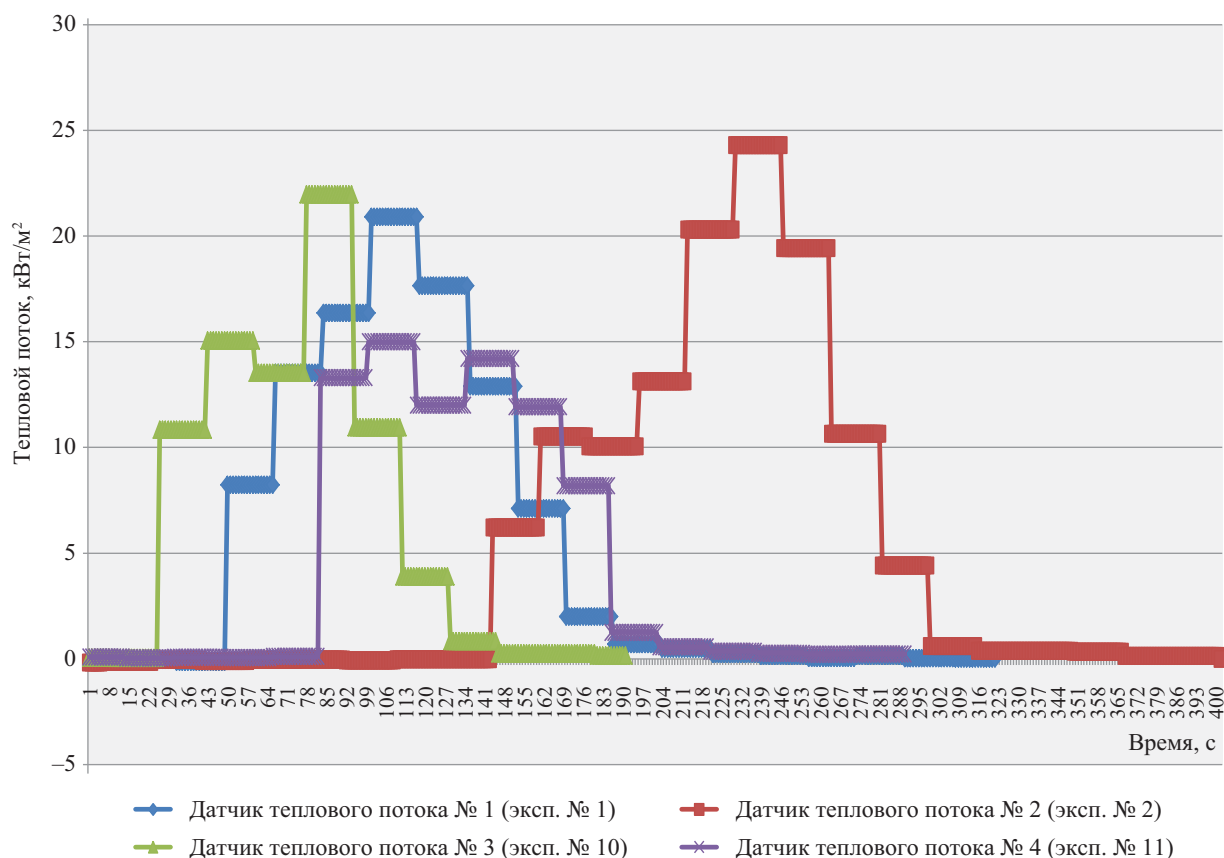


Рис. 9. Зависимость теплового потока от времени (датчик теплового потока № 1, скорость ветра — 0 м/с)

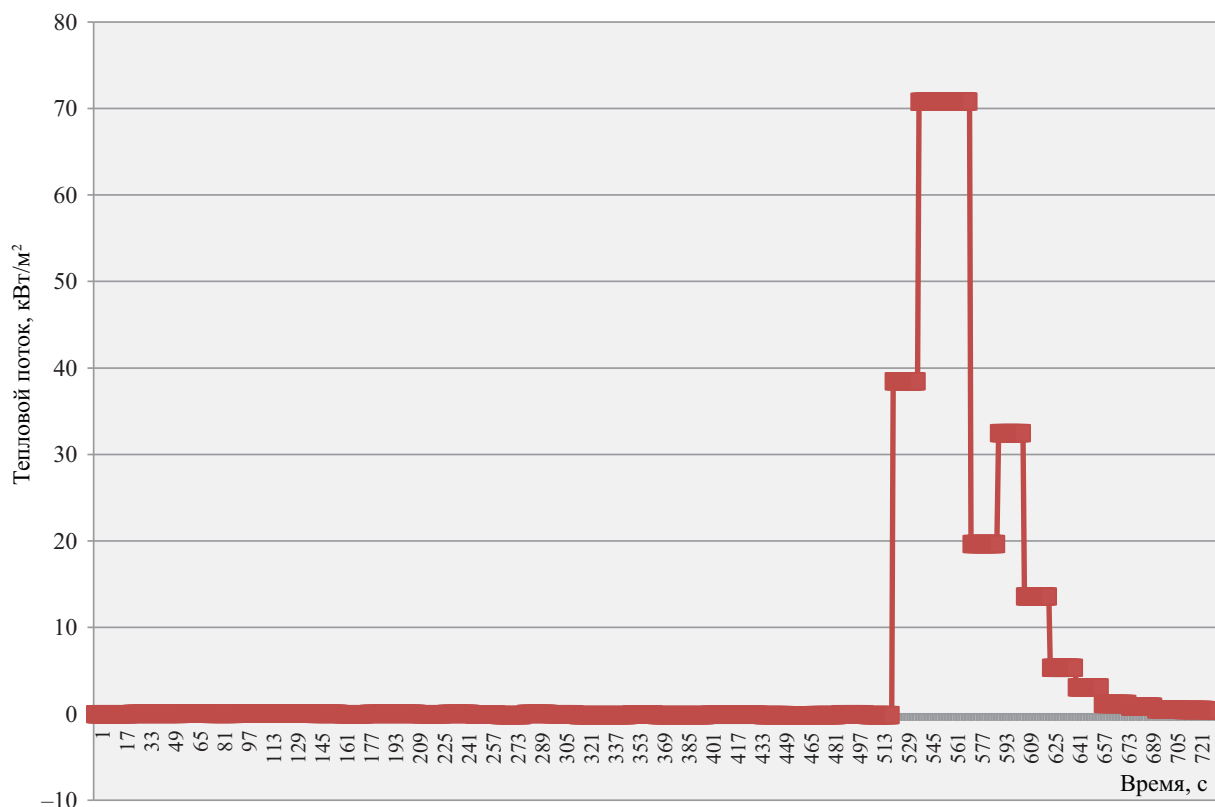


Рис. 10. Зависимость теплового потока от времени (датчик теплового потока № 1, скорость ветра — 1,9 м/с)

50 % от общего набора — тестовая выборка. Для формирования обучающей выборки (табл. 3 и 4) из общего набора записей в обоих случаях отобраны все записи с нечетными числами, для тестовой выборки (табл. 5 и 6) — с четными числами.

Выполнено сравнение типов функций принадлежности при различных методах оптимизации при генерировании системы по алгоритму решетчатого разбиения при следующих параметрах сети:

- количество обучающих эпох — 100;
- количество функций-членов для каждого входа — 3;

- погрешность — 0;
- метод оптимизации — гибридный или метод обратного распространения ошибки.

Как видно из полученных результатов (табл. 7), наименьшая ошибка RMSE для сети ANFIS без ветровой нагрузки соответствует использованию произведения двух сигмоидальных функций принадлежности. Для сети ANFIS, формирующей прогноз с учетом ветровой нагрузки, наименьшая ошибка RMSE, как видно из табл. 8, соответствует применению обобщенной колоколообразной функции принадлежности.

Таблица 3. Фрагмент обучающей выборки для ANSIS (без ветровой нагрузки)

Номер	Вход 1	Вход 2	Вход 3	Выход
1	1,00	1,56	50,00	0
2	3,00	1,56	50,00	0
3	5,00	1,56	50,00	0
4	7,00	1,56	50,00	0
5	9,00	1,56	50,00	0
...	...	...	...	...
5423	290,00	1,56	50,00	1

Таблица 4. Фрагмент обучающей выборки для ANSIS (с ветровой нагрузкой)

Номер	Вход 1	Вход 2	Вход 3	Вход 4	Выход
1	1,00	1,90	1,26	56,00	0
2	3,00	1,90	1,26	56,00	0
3	5,00	1,90	1,26	56,00	0
4	7,00	1,90	1,26	56,00	0
5	9,00	1,90	1,26	56,00	0
...	...	...	...	...	...
16 259	270,00	4,40	1,56	50,00	0

Таблица 5. Фрагмент тестовой выборки для ANSIS (без ветровой нагрузки)

Номер	Вход 1	Вход 2	Вход 3	Выход
1	2,00	1,56	50,00	0
2	4,00	1,56	50,00	0
3	6,00	1,56	50,00	0
4	8,00	1,56	50,00	0
5	10,00	1,56	50,00	0
...	...	...	...	...
5422	289,00	1,56	50,00	1

Таблица 6. Фрагмент обучающей выборки для ANSIS (с ветровой нагрузкой)

Номер	Вход 1	Вход 2	Вход 3	Вход 4	Выход
1	2,00	1,90	1,26	56,00	0
2	4,00	1,90	1,26	56,00	0
3	6,00	1,90	1,26	56,00	0
4	8,00	1,90	1,26	56,00	0
5	10,00	1,90	1,26	56,00	0
...	...	...	...	...	...
16 258	269,00	4,40	1,56	50,00	0

Таблица 7. Значения ошибки ANFIS (без ветровой нагрузки) в зависимости от типа функции принадлежности и метода оптимизации

Функция принадлежности	RMSE для обучающей выборки	RMSE для тестовой выборки
Гибридный метод		
Треугольная	8,90	8,86
Трапецевидная	9,01	8,96
Обобщенная колоколообразная	8,92	8,87
Гауссова	8,89	8,84
Гауссова комбинационная	9,01	8,96
Пи-образная	9,05	9,00
Разность между двумя сигмоидальными функциями	8,78	8,73
Произведение двух сигмоидальных функций	8,72	8,67
Метод обратного распространения ошибки		
Треугольная	10,85	10,79
Трапецевидная	10,78	10,73
Обобщенная колоколообразная	10,85	10,79
Гауссова	10,85	10,79
Гауссова комбинационная	10,77	10,79
Пи-образная	10,76	10,70
Разность между двумя сигмоидальными функциями	10,78	10,72
Произведение двух сигмоидальных функций	10,74	10,68

Таблица 8. Значения ошибки ANFIS (с ветровой нагрузкой) в зависимости от типа функции принадлежности и метода оптимизации

Функция принадлежности	RMSE для обучающей выборки	RMSE для тестовой выборки
Гибридный метод		
Треугольная	7,30	7,26
Трапецевидная	7,34	7,29
Обобщенная колоколообразная	7,07	7,02
Гауссова	7,16	7,12
Гауссова комбинационная	7,34	7,30
Пи-образная	7,36	7,31
Разность между двумя сигмоидальными функциями	7,31	7,27
Произведение двух сигмоидальных функций	7,31	7,27
Метод обратного распространения ошибки		
Треугольная	7,97	7,93
Трапецевидная	7,91	7,87
Обобщенная колоколообразная	7,97	7,92
Гауссова	7,97	7,93
Гауссова комбинационная	7,91	7,87
Пи-образная	7,91	7,86
Разность между двумя сигмоидальными функциями	7,91	7,86
Произведение двух сигмоидальных функций	7,91	7,86

Произведено сравнение полученных результатов с результатами при генерировании системы через субтрактивную кластеризацию по горному методу. При построении сетей ANFIS с использованием метода субкластеризации применены следующие параметры:

- вектор радиусов — 0,5;
- коэффициент подавления — 1,25;
- коэффициент принятия — 0,5;
- коэффициент отторжения — 0,15;
- количество обучающих эпох — 100.

Результаты, представленные в табл. 9 и 10, демонстрируют следующие выводы:

- сеть ANFIS для прогнозирования теплового потока без учета ветровой нагрузки, построенная с использованием метода субкластеризации, является оптимальной (метод оптимизации — гибридный);
- сеть ANFIS для прогнозирования теплового потока с учетом ветровой нагрузки, построенная с использованием метода субкластеризации, является оптимальной (метод оптимизации — гибридный).

Таблица 9. Значения ошибки ANFIS (без ветровой нагрузки) в зависимости от метода оптимизации на обучающей и тестовой выборках

Метод оптимизации	RMSE для обучающей выборки	RMSE для тестовой выборки
Гибридный метод	8,33	8,28
Метод обратного распространения ошибки	42,53	42,42

Таблица 10. Значения ошибки ANFIS (с ветровой нагрузкой) в зависимости от метода оптимизации на обучающей и тестовой выборках

Метод оптимизации	RMSE для обучающей выборки	RMSE для тестовой выборки
Гибридный метод	6,61	6,56
Метод обратного распространения ошибки	9,01	8,96

Таким образом, произведено сравнение различных типов функций принадлежности, методов оптимизации и методов генерирования системы и установлено, что для сетей ANFIS, выполняющих прогнозирование теплового потока без учета и с учетом ветровой нагрузки, оптимальным является применение метода субкластеризации и гибрид-

ного метода оптимизации, что обеспечивает самые низкие значения ошибки на выборках.

Разработанные сети ANFIS использованы для формирования системы правил с целью определения зависимости теплового потока в резервуарах с защитной стенкой от факторов внешней среды. Сети ANFIS предназначены для формирования прогностического сценария развития пожара в основном резервуаре для резервуара с защитной стенкой.

Результаты анализа показывают, что скорость ветра и расположение резервуара могут привести к повышению температуры воздуха, стенки резервуара и бензина. Поэтому, несмотря на сложность анализа, регистрация всех этих факторов позволяет прогнозировать безопасное расстояние от горящего резервуара для пожаротушения.

Существует разница между результатами исследований и экспериментальными данными. Причиной этого может быть то, что вспышки пожаров зависят от других факторов, помимо скорости ветра, расстояния и угла, которые не были включены в модель. Кроме того, во временном ряду может присутствовать шум, связанный с колебаниями незарегистрированных факторов.

Таким образом, можно сделать следующий вывод: сеть ANFIS, построенная с использованием метода субкластеризации, является оптимальной (метод оптимизации — гибридный).

Выводы

В исследовании авторами рассмотрен сценарий развития пожара в основном резервуаре внутри резервуара с защитной стенкой, входящего в состав резервуарного парка.

Процесс планирования и проведения полевых экспериментов подробно описан в представленной работе (см. рис. 3–9). В результате экспериментов произведен сбор экспериментальных данных (см. рис. 10 и 11) с использованием датчиков теплового потока SBG01.

На основании экспериментальных данных сформированы обучающие и тестовые выборки (см. табл. 3–6) и определены зависимости теплового потока от факторов внешней среды посредством построения искусственных нейронных сетей ANFIS.

Выполнено сравнение типов функций принадлежности для выбора оптимальной функции для обеих сетей ANFIS (без ветровой нагрузки и с ветровой нагрузкой). Установлено, что при гибридном методе оптимизации произведение двух сигмоидальных функций принадлежности является оптимальным типом функции принадлежности для сети ANFIS без ветровой нагрузки (RMSE = 8,72 для обучающей выборки, RMSE = 8,67 для тестовой выборки). Для сети ANFIS, учитывающей ветро-

вую нагрузку, при гибридном методе оптимизации обеспечиваются лучшие результаты применения обобщенной колоколообразной функции принадлежности ($RMSE = 7,07$ для обучающей выборки, $RMSE = 7,02$ для тестовой выборки).

Выполнен анализ сетей ANFIS, построенных с использованием метода субкластеризации. Установлено, что для прогнозирования теплового потока с использованием сети ANFIS как без учета, так и с учетом ветровой нагрузки метод субкластеризации (при гибридном методе оптимизации) обеспечивает самые низкие значения ошибки на выборках. Так, для сети ANFIS без учета ветровой нагрузки $RMSE = 8,33$ для обучающей выборки, $RMSE = 8,28$ для тестовой выборки, а для сети ANFIS с учетом ветровой нагрузки $RMSE = 6,61$ для обучающей выборки, $RMSE = 6,56$ для тестовой выборки.

Научное исследование позволило разработать модель оперативного прогнозирования теплового потока на основе использования элементов искусственного интеллекта (сетей ANFIS). В представленном исследовании авторы особое внимание уделили выявлению зависимости теплового потока от ветровой нагрузки. Полученные в ходе работы результаты позволят повысить эффективность локализации и ликвидации пожаров, безопасность пожарных объектов и персонала, сократить социальный, экономический и экологический ущерб. Модель оперативного прогнозирования теплового потока, учитывающая влияние факторов окружающей среды, в том числе и ветровой нагрузки, может применяться в системах поддержки принятия управленческих решений для принятия управленческих решений по размещению персонала и оборудования в современных резервуарных парках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Краснов А.В., Садыкова З.Х., Пережогин Д.Ю., Мухин И.А. Статистика чрезвычайных происшествий на объектах нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности за 2007–2016 гг. // Нефтегазовое дело. 2017. № 6. С. 179–191. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30784379>
2. Демёхин Ф.В., Таранцев А.А., Белов Д.И. О проблеме тушения пожаров в резервуарах с кольцевой защитной стенкой // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. 2013. № 2. С. 68–75. URL: <https://vestnik.igps.ru/wp-content/uploads/V52/13.pdf>
3. Петрова Н.В., Чешко И.Д., Галишев М.А. Анализ практики экспертного исследования пожаров на объектах хранения нефти и нефтепродуктов // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. 2016. № 3. С. 40–46. URL: <https://vestnik.igps.ru/wp-content/uploads/V83/7.pdf>
4. Блинов В.И., Худяков Г.Н., Петров И.И. О механизме тушения горения нефтепродуктов в резервуарах путем перемешивания их воздухом. М. : Информационный сборник ЦНИИПО, 1958. С. 34–38.
5. Петров И.И., Реутт В.Ч. Критические условия потухания пламени нефтепродукта при его перемешивании в резервуаре. М. : Информационный сборник ЦНИИПО, 1959. С. 58–61.
6. Волков О.М., Проскуряков Г.А. Пожарная безопасность на предприятиях транспорта и хранения нефти и нефтепродуктов. М. : Недра, 1981. 256 с.
7. Абрамов Ю.А., Басманов А.Е. Минимизация ущерба при пожаре в резервуарных парках // Пожаровзрывобезопасность. 2007. № 4. С. 59–65. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12512034>
8. Zabetakis M.G., Burgess D.S. Research on hazards associated with production and handling of liquid hydrogen. Bureau of Mines, Washington, D.C., 1961. DOI:10.2172/5206437
9. Markstein G.H., De Ris J. Wall-fire radiant emission. Part 1: Slot-burner flames, comparison with jet flames // Symposium (International) on Combustion. 1991. Vol. 23. No. 1. Pp. 1685–1692. DOI: 10.1016/S0082-0784(06)80443-1
10. Markstein G.H., De Ris J. Wall-fire radiant emission — Part 2: Radiation and heat transfer from porous-metal wall burner flames // Symposium (International) on Combustion. 1992. Vol. 24. No. 1. Pp. 1747–1752. DOI: 10.1016/S0082-0784(06)80204-3
11. Drysdale D. An introduction to fire dynamic. John Wiley & Sons, 2011. 512 p.
12. Babrauskas V. Estimating large pool fire burning rates // Fire Technology. 1983. Vol. 19. No. 4. Pp. 251–261. DOI: 10.1007/BF02380810
13. Munoz M., Arnaldos J., Casal J., Planas E. Analysis of the geometric and radiative characteristics of hydrocarbon pool fires // Combustion and Flame. 2004. Vol. 139. No. 3. Pp. 263–277. DOI: 10.1016/j.combustflame.2004.09.001

14. Швырков С.А., Воробьев В.В., Ибатуллин Р.К. Опасность каскадного развития пожара в резервуарном парке при ветровом воздействии // Технологии техносферной безопасности. 2017. № 4 (74). 8 с. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2017-4/26-04-17.ttb.pdf>
15. Рубцов Д.Н., Шалымов М.С. О развитии пожара в резервуаре типа «стакан в стакане» с нефтью и нефтепродуктами // Технологии техносферной безопасности. 2016. № 3 (67). 8 с. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2016-3/23-03-16.ttb.pdf>
16. Schälike S., Mishra K.B., Malow M., Berger A., Wehrstedt K.D., Schönbucher A. Mass burning rate of a large TBPB pool fire – experimental study and modeling // Chemical Engineering Transactions. 2013. Vol. 31. Pp. 853–858. DOI: 10.3303/CET1331143
17. Шалымов М.С. Влияние тепловых нагрузок пожара в нефтяном резервуаре на соседние резервуары // Технологии техносферной безопасности. 2015. № 2 (60). 8 с. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2015-2/16-02-15.ttb.pdf>
18. Anwar Z., Afzal H., Bibi N., Abbas H., Mohsin A., Arif O. A hybrid-adaptive neuro-fuzzy inference system for multi-objective regression test suites optimization // Neural Computing and Applications. 2019. Vol. 31. No. 11. Pp. 7287–7301. DOI: 10.1007/s00521-018-3560-8
19. Зайченко Ю.П., Севаев Ф. Исследование эффективности нечеткой нейронной сети ANFIS в задачах макроэкономического прогнозирования // Системні дослідження та інформаційні технології. 2005. № 1. С. 100–112. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/13765>
20. Leite R.M., Centenob F.R. Effect of tank diameter on thermal behavior of gasoline and diesel storage tanks fires // Journal of Hazardous Materials. 2018. Vol. 342. Pp. 544–552. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2017.08.052
21. Yun-Wei Zhanga, Zhao-Lin Gua, Zan-She Wanga, Chuck Wah Francis Yua. Revisit of wind flows between wind tunnels and real canyons – the viewpoint of Reynolds dynamic similarity // Indoor Built Environ 2013. Vol. 22. No. 3. Pp. 467–470. DOI: 10.1177/1420326X12489064

Поступила 29.07.2020, после доработки 05.08.2020;
принята к публикации 18.08.2020.

Информация об авторах

СТАНКЕВИЧ Татьяна Сергеевна, канд. техн. наук, доцент кафедры техносферной безопасности, Калининградский государственный технический университет (КГТУ), г. Калининград, Российская Федерация; магистрант, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ), г. Москва, Российская Федерация; РИНЦ ID: 717673; ResearcherID: O-7418-2017; Scopus Author ID: 57214781783; ORCID: 0000-0002-8707-7187; e-mail: tatiana.stankevich@klgtu.ru

ДАЛНЕР Далибор, PhD, инженер, кафедра безопасности труда и процессов, Остравский технический университет, г. Острава, Чешская Республика; Scopus Author ID: 57194767595; ORCID: 0000-0003-4071-1918; e-mail: dalibor.balner@vsb.cz

ТРЧКА Мартин, PhD, инженер, кафедра безопасности труда и процессов, Остравский технический университет, г. Острава, Чешская Республика; Scopus Author ID: 56330779100; ORCID: 000-0002-4574-229X; e-mail: martin.trcka@vsb.cz

ТОМИТЧЕК Адам, PhD, инженер, кафедра безопасности труда и процессов, Остравский технический университет, г. Острава, Чешская Республика; Scopus Author ID: 56331461400; ORCID: 0000-0002-6697-8787; e-mail: adam.thomitzek@vsb.cz

Prompt forecasting of heat flows under fire conditions in a vertical steel tank having an ANFIS protective wall

© Tatiana S. Stankevich^{1, 2} ✉, Dalibor Balner³, Martin Trcka³, Adam Thomitzek³

¹ Kaliningrad State Technical University (Sovetskiy Avenue, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation)

² National Research University Higher School of Economics (Myasnikitskaya St., 20, Moscow, 101000, Russian Federation)

³ VSB – Technical University of Ostrava (17.Listopadu 2172/15, Ostrava-Poruba, 708 00, Czech Republic)

ABSTRACT

Introduction. Tanks and tank farms are widespread in many constituent entities of the Russian Federation and are among the most important elements of the model for the production, treatment, transportation and processing of oil and oil products. It is relevant both at the Russian and global levels to ensure that fire safety is arranged for tank farms to reduce highest risk levels according to the risk-based safety model. In the context of information and communication technology (ICT) developments and introduction of ICT into the operation and management of various facilities, over the past decades advanced methods have emerged for predicting the occurrence and development of emergency situations at facilities and enhancing management decisions on containment and elimination of emergency situations including fires.

Goals and objectives. In this paper, the authors present a model that they developed to promptly forecast heat flows using artificial neural networks. The forecast model will improve the safety of fire brigade personnel responsible for extinguishing fires inside ground-based vertical steel tanks having protective walls. In the research, the authors place special emphasis on identifying dependence between the heat flow and the wind load.

Methods. To achieve this goal, the authors arranged and conducted a series of experiments, collected experimental data on heat flows, and created training and test samples.

Results. Dependences between heat flows and environmental factors were identified by constructing adaptive neuro-fuzzy inference systems or adaptive network-based fuzzy inference systems (ANFIS). Various types of membership functions, optimisation and system generation methods were compared and it was found out that for ANFISs, prediction of heat flows with regard to and disregarding wind loads were optimal, if subcluster and hybrid optimisation methods were used, as they had lowest error values for samples.

Discussion. The analysis shows that wind speed and tank location can rise temperatures of the air, tank wall and petrol. Therefore, despite the complexity of the analysis, the regard for all these factors makes it possible to identify a safe distance between a burning tank and firefighters.

Conclusions. The research made it possible to develop a model for prompt heat flow forecasting with the help of artificial intelligence elements (ANFIS). The results obtained in the course of the work make it possible to increase the efficiency of prompt forecasting of the dynamic behaviour of fire inside tanks and tank farms and optimize managerial decision-making by responsible persons.

Keywords: fire safety; petrol; physical model; wind load; artificial neural networks

Acknowledgments. The work was carried out within the framework of the research project Development of a Fire Model for Risk Assessment at Highly Dangerous and Technically Challenging Objects, Ostrava Technical University, Czech Republic, 2018-2019

For citation: Stankevich T.S., Balner D., Trcka M., Thomitzek A. Prompt forecasting of heat flows under fire conditions in a vertical steel tank having an ANFIS protective wall. *Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(5):13-39. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.05.13-39

✉ Tatiana Sergeevna Stankevich, e-mail: tatiana.stankevich@klgtu.ru

Introduction

Recently, a particular focus has been placed by the global community on ensuring human security and sustainable development of mankind in interaction with the environment. A global problem of concern throughout the world is the growing fire hazard from the facilities that are of strategic importance for the national security, namely the national fuel and energy sector.

The relevance of fire safety at the facilities of the fuel and energy sector originates from the fact that

power engineering is the main industry in any state. In addition, power engineering is of decisive cross-sectoral importance, since the level and quality of mining, producing and supplying energy resources determine the conditions for national production activities and services.

Currently, in Russia, as stated by the Unified Inter-departmental Statistical Information System (EMISS)¹,

¹ EMISS. URL: <https://www.fedstat.ru/organizations/>

there are 8,139 tanks for oil products with a total capacity of 16,512,170 m³ and 772 tanks for crude oil with a total capacity of 5,590,580 m³. According to the final reports of the Russian Ministry of Energy for 2018² and 2019³, 54 fields were commissioned in the Russian oil industry in 2018, 31 fields in 2019; and in 2018, the total length of new oil pipelines reached 216 km, in 2019 — 324 km. Growing oil refining for domestic use and export is accompanied by the construction of large oil depots having big tanks in the country. Tank farms having tanks with the capacity of up to 50,000 m³ are being intensively built in the Russian Federation; at the same time, tanks having the capacity of up to 100,000 m³ are being designed.

An increase in oil production and intensive development of oil production and oil refining industries in Russia boost the number of fires, thus, leading to the growth of the fire scale and the damage caused. From 2007 to 2016, as indicated in [1], 126 emergencies occurred. The dynamics of various emergency situations (fire, explosion or emission) is shown in Fig. 1. Over a ten-year period, there have been 65 fires, 46 explosions and 15 emissions of hazardous substances, which is 52, 36 and 12 % of the total number of incidents, respectively (Fig. 2). 93.4 % of fires and accidents at oil depots were recorded at ground storage tanks, of which 53.9 % were at petrol storage tanks; 32.1 % at crude oil storage tanks; 14.0 % at tanks used for storing other oil products (diesel fuel, kerosene, fuel oil. etc.).

According to [2], risks of various accidents, involving tanks, are quite high in Russia. For example, the risk of fire in pressure vent valves and oil level is

$9.0 - 10^{-5} \text{ year}^{-1}$, which is 90 times higher than the recommended level of 10^{-6} specified in GOST 12.1.004-91⁴.

Despite the fact that the statistics on accidents at the facilities of the oil refining and petrochemical industries show a decrease in the frequency of fires and in the number of people injured in fires, the numbers are disappointing and exceed those in Europe presented in the Major Accident Reporting System (eMARS)⁵, and in the USA according to the National Fire Protection Association data⁶.

The outbreak of fires in oil and oil product storage facilities and their spread pose a significant threat to life and health of citizens, and also has a negative impact on the environment (which is almost irretrievable). Fires at facilities of the fuel and energy sector can be characterised by a vast combustion spread area, powerful thermal radiation, while the height of the glowing flame is 1-2 times bigger than the diameter of a burning tank [3]. A fire spreads at high speed; burning is accompanied by explosions and emissions of burning liquid. Fires in tanks are long lasting; and they may last from several hours to several days and require a large amount of manpower and resources to be completely extinguished [3]. Fires are especially hazardous at oil depots and oil storage facilities, since heating of neighbouring tanks can cause a cascade fire.

Indeed, the increase in the number of fires and explosions inside tanks and at tank farms is a relevant problem. The research in this area can ensure higher security for the population and the environment from man-made threats and technology-related risks. For the purpose of research, tank farms designated for storing petrol were selected, since they can accumu-

² Operating performance of the Russian Ministry of Energy in 2019 and key challenges for 2020. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/18288>

³ Operating performance of the Russian Ministry of Energy and key results of the fuel-and-power sector operations in 2018. Mid-term objectives. URL: https://minenergo.gov.ru/prezentaciya_kollegiya_2019.pdf

⁴ GOST 12.1.004-91. Occupational safety standards system (SSBT). Fire safety. General requirements. URL: <http://docs.cntd.ru/document/9051953>

⁵ eMARS. URL: <https://emars.jrc.ec.europa.eu/en/emars/content>

⁶ National Fire Protection Association. U.S. fire problem. URL: <https://www.nfpa.org/News-and-Research/Data-research-and-tools/US-Fire-Problem>

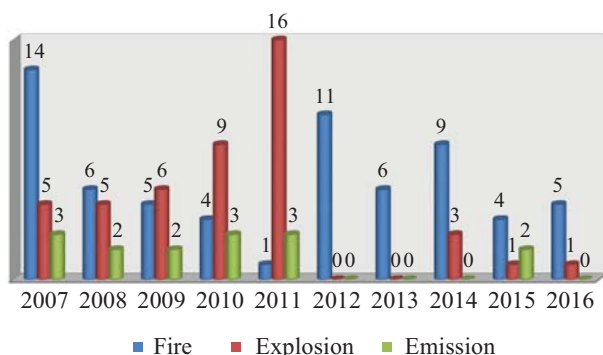


Fig. 1. Number of emergencies at the facilities of oil and oil refining industries in Russia from 2007 to 2016

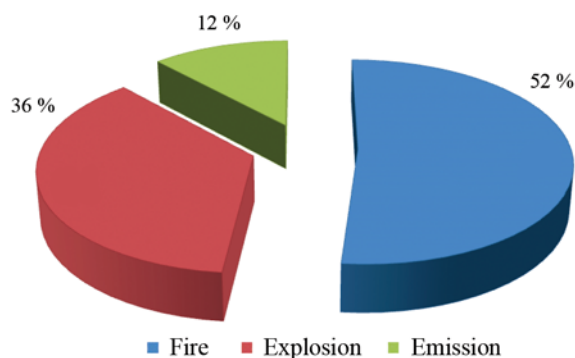


Fig. 2. Breakdown of emergency situations at oil production and refining facilities in Russia from 2007 to 2016

late the largest amount of flammable liquid, and there is a high probability of fire spread to adjacent tanks. The type of fuel (petrol) is chosen due to the reviewed statistical data on fires at oil and oil product storage facilities (over 50 % of emergency situations occur inside above-ground petrol storage tanks).

This research is focused on a farm having vertical steel tanks with a protective wall. This type of storage units represents a new trend in building oil and oil product storage facilities and expanding the existing ones.

The research is aimed at improving the safety of firefighting personnel when extinguishing a fire inside a ground-based vertical steel tank with a protective wall by using artificial neural networks to simulate the fire (heat flow) spread pattern.

Materials and methods

A rigorous research into liquid combustion processes is conducted by Russian and foreign scientists, including the work co-authored by V.I. Blinova, G.M. Khudyakov and I.I. Petrov [4], in which the authors carried out comprehensive studies of extinguishing patterns applicable to oil and oil product combustion processes and substances. A joint research by I.I. Petrov and V.Ch. Reutt [5] was a natural follow-up to this work; in this project, special focus was placed on identification of critical conditions for flame extinction in a tank, in case that an oil product is stirred there. Fire safety issues inside tank farms were studied by O.M. Volkov and G.A. Proskuryakov [6]. They analyzed the origin and development of fires at facilities as well as key measures to prevent and extinguish fires involving oil and oil products. Yu.A. Abramov and A.E. Basmanov in [7] considered deterministic and stochastic models of setting the optimal location and choosing combat missions for fire-fighters containing fire at tank farms. They proposed a method and an algorithm for solving the problem in deterministic and stochastic forms. In the study [8] M.G. Zabetakis and D.S. Burgess considered the evaporation of liquid hydrogen from the point of view of the theory of heat transfer and experimentally identified the pattern of distribution of flammable mixtures over the spill area. During the experiments, ignition of hydrogen vapour above the Dewar vessel and ignition of the vapour-air mixture above the spill area were carried out at different times after the spill of various amounts (up to 90 litres) of liquid hydrogen. G.H. Markstein [9, 10] described the results of experiments on measuring the total radiation emitted by the burning flame of a slot burner and a jet flame (fuel — methane, ethane, ethylene and propylene), measured radiant heat transfer and heat transfer caused by the combustion of methane, ethane, ethylene and propylene on the vertical surface of porous metal.

The shape of the flame and the heat flow were described by D. Drysdale in his works [11]. There are also some experimental researches related to fires in fuel storage tanks or in pools. For example, V. Babrauskas' work [12] contains experimental data on combustion rates of petrol, liquefied natural gas and alcohol for pools having a diameter of 0.2 to 7.0 m. M. Munoz in [13] took thermographic measurements of fires in 1.5 to 6.0 m diameter pools containing petrol and diesel fuel. In [14], experiments on fire extinguishing in pools (3.0 m in diameter) are described and mass combustion rates are measured. Fire development inside the tanks of the 'glass in a glass' type are described in works [15, 16]. The influence of the thermal load of a fire inside an oil tank on nearest tanks is presented in the article [17].

Based on the analysis of reference sources, it can be concluded that experiments are basically carried out without taking into account the effect of the wind load (at a wind speed of 0 m/s), in the works, most researchers either do not take into account the effect of wind on the heat flow during the fire, or use simplified ratios.

Since the processes of combustion, thermal radiation of the flame and its scattering in the atmosphere differ due to their complex mutual influence, it is necessary to carefully study the fire development process in a tank under different wind loads in order to choose tank protection measures and develop recommendations on how to carry out fire extinguishing actions.

The recent breakthrough in the development of artificial intelligence, big data and machine learning has created unprecedented opportunities for transition to advanced intelligent systems that process a large amount of information of various nature and generate management decisions in non-standard environments and hardly projected critical support situations to ensure the security of facilities. However, such tools are actively used in practice in marketing, social networks and business operations, while these methods are used to a limited extent in medicine and production activities.

In this work, the authors proposed to use artificial intelligence elements (artificial neural networks) to process data from an experiment on simulating a fire in a tank in the territory of a tank farm, which corresponds to the priorities and prospects of Russia's research and technological advancement according to the Scientific and Technological Development Strategy of the Russian Federation (Strategy of the RF STDS).

The research used an adaptive network-based fuzzy inference system (ANFIS) [18] to predict the fire development pattern in the main tank. The choice of the ANFIS network is substantiated by the fact that this type of networks provides a lower root-mean-square error (RMSE) in comparison with other neuro-fuzzy systems. In addition, ANFIS networks are very effective in forecasting [19].

Architecturally, ANFIS is a five-layer network with nodes, each of which has dedicated features. The function of the node of each input is determined by the formula (1) [18]:

$$O_{1,i} = \mu_{A_i}(P_j), \quad (1)$$

where P_j — input data for node i ;

A_i — membership function.

For the generalised bell-shaped function, formula (2) is used⁷:

$$\mu_A(P_j) = \frac{1}{1 + \left| \frac{P_j - c_i}{a_i} \right|^{2b_i}}, \quad (2)$$

where a_i is the membership function concentration coefficient;

b_i is the coefficient of steepness of the membership function;

c_i is a coordinate of the membership function maximum.

For the Gaussian function, formula (3)⁸ is applied:

$$\mu_A(P_j) = e^{-\frac{(P_j - b_i)^2}{2c_i^2}}, \quad (3)$$

where b_i is the coordinate of the membership function maximum;

c_i is the coefficient of the membership function concentration.

For the Gaussian combined function formulas (4)–(5)⁹ apply:

$c_{1,i} < c_{2,i}$, then

$$\mu_A(P_j) = \begin{cases} e^{-\frac{(P_j - c_{1,i})^2}{2a_{1,i}^2}}, & P_j < c_{2,i}, \\ e^{-\frac{(P_j - c_{1,i})^2}{2a_{1,i}^2}} \cdot e^{-\frac{(P_j - c_{2,i})^2}{2a_{2,i}^2}}, & c_{2,i} \leq P_j \leq c_{1,i}, \\ e^{-\frac{(P_j - c_{2,i})^2}{2a_{2,i}^2}}, & P_j > c_{1,i}; \end{cases} \quad (4)$$

$c_{1,i} > c_{2,i}$, then

$$\mu_A(P_j) = \begin{cases} e^{-\frac{(P_j - c_{1,i})^2}{2a_{1,i}^2}}, & P_j < c_{2,i}, \\ e^{-\frac{(P_j - c_{1,i})^2}{2a_{1,i}^2}} \cdot e^{-\frac{(P_j - c_{2,i})^2}{2a_{2,i}^2}}, & c_{2,i} \leq P_j \leq c_{1,i}, \\ e^{-\frac{(P_j - c_{2,i})^2}{2a_{2,i}^2}}, & P_j > c_{1,i}; \end{cases} \quad (5)$$

where $c_{1,i}$ ($c_{2,i}$) is the minimum (maximum) value of the fuzzy set kernel;

$a_{1,i}$ ($a_{2,i}$) is the concentration coefficient of the left (right) part of the membership function.

For a triangular function, the calculation is made according to formula (6)¹⁰:

$$\mu_A(P_j) = \begin{cases} 0, & P_j \leq a_i, \\ \frac{P_j - a_i}{b_i - a_i}, & a_i \leq P_j \leq b_i, \\ \frac{c_i - P_j}{c_i - b_i}, & b_i \leq P_j \leq c_i, \\ 0, & c_i \leq P_j, \end{cases} \quad (6)$$

where $[a_i, c_i]$ is the variable range;

b_i is the most likely value of the variable.

For the trapezoidal function the following formula (7)¹¹ is used:

$$\mu_A(P_j) = \begin{cases} 0, & P_j \leq a_i, \\ \frac{P_j - a_i}{b_i - a_i}, & a_i \leq P_j \leq b_i, \\ 1, & b_i \leq P_j \leq c_i, \\ \frac{d_i - P_j}{d_i - c_i}, & c_i \leq P_j \leq d_i, \\ 0, & d_i \leq P_j, \end{cases} \quad (7)$$

where $[a_i, d_i]$ is a pessimistic assessment of variable values;
 $[b_i, c_i]$ is an optimistic assessment of the variable values.

For the difference between two sigmoidal membership functions, the following formula is used (8)¹²:

$$\mu_A(P_j) = \frac{1}{1 + e^{-a_{1,i}(P_j - c_{1,i})}} - \frac{1}{1 + e^{-a_{2,i}(P_j - c_{2,i})}}. \quad (8)$$

For the pi-shaped membership function, the following formula (9)¹³ is applied:

$$\mu_A(P_j) = \begin{cases} 0, & P_j \leq a_i \\ 2 \left(\frac{P_j - a_i}{b_i - a_i} \right)^2, & a_i \leq P_j \leq \frac{a_i + b_i}{2} \\ 1 - 2 \left(\frac{P_j - b_i}{b_i - a_i} \right)^2, & \frac{a_i + b_i}{2} \leq P_j \leq b_i \\ 1, & b_i \leq P_j \leq c_i \\ 1 - 2 \left(\frac{P_j - c_i}{d_i - c_i} \right)^2, & c_i \leq P_j \leq \frac{c_i + d_i}{2} \\ 2 \left(\frac{P_j - d_i}{d_i - c_i} \right)^2, & \frac{c_i + d_i}{2} \leq P_j \leq d_i \\ 0, & P_j \geq d_i \end{cases} \quad (9)$$

¹⁰ MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/trimf.html>

¹¹ MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/trapmf.html>

¹² MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/dsimgmf.html>

¹³ MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/pimf.html>

The product of two sigmoidal membership functions is calculated according to formula (10)¹⁴

$$\mu_A(P_j) = \frac{1}{1 + e^{-a_{1,j}(P_j - c_{1,j})}} \cdot \frac{1}{1 + e^{-a_{2,j}(P_j - c_{2,j})}}. \quad (10)$$

To study the effect of heat flow on the main and protective walls of an item on fire and neighbouring tanks under various wind loads, within the research into a tank that has a protective wall, a fire caused by the combustion of petrol in the main tank was simulated.

The authors carried out an experiment on a simulated real item, or a tank having a volume of 125,000 m³. The geometric dimensions of the simulation are presented in Tabl. 1; Fig. 3 illustrates a diagram of the simulation; Fig. 4 shows photographs of the simulation. The total liquid volume (fuel + water ballast) corresponds to 80 % of the tank capacity. The choice of this capacity is explained by the fact that tanks are usually 80 % full. The steel grade used in the simulation is S590; it corresponds to the steel grade of a real 125,000 m³ tank having a protective wall.

The amount of consumed fuel was 0.499 m³ for each experiment and tank diameter. As it was pointed out in [20], the presence of water below the fuel can

affect combustion and boiling characteristics (sudden vaporisation of water), which depend on the type of fuel and amount of fuel above the water. However, this phenomenon was not registered during the experiments.

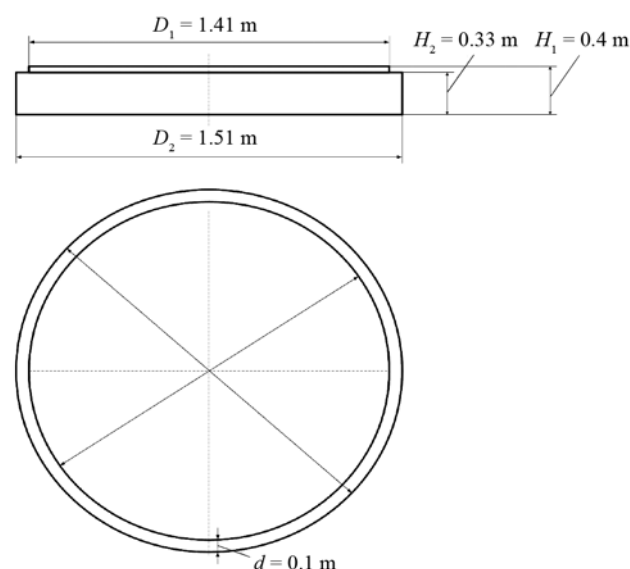


Fig. 3. Diagram (side view and top view) of a physical model: D_1 — diameter of the main tank, m; D_2 — diameter of the protective tank, m; d — width of the inter-wall space, m; H_1 — height of the main tank, m; H_2 — height of the protective tank, m



Fig. 4. Model of a tank having a protective wall

¹⁴ MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/psigmf.html>

Table 1. Geometric parameters of the physical model

Parameter	Real object	Physical model
Protective tank diameter, m	90.47	1.51
Main tank diameter, m	84.47	1.41
Protective tank height, m	20.00	0.33
Main tank height, m	24.10	0.40
Tank wall and bottom thickness, m	0.06...0.26	0.002

The ambient temperature during the experiments was 0 °C, the atmospheric pressure was 1 atm. Since the tank was open (it had no lid), these experiments are similar to pool fires.

When simulating a fire, the authors selected the wind values most typical for July (July is the most unsafe period for oil and oil product storages). It is taken into account that, as indicated in [15], maximum wind speed during numerical simulation should not exceed 10 m/s, since the angle of deflection of the flame from the vertical under the influence of the wind and the flame length no longer change significantly with a further increase in the wind speed. Experiments involving a physical model were carried out indoors at various wind loads: Experiments 1, 2, 10 and 11 — without wind load; Experiment 3 — wind speed

1.9 m/s; Experiments 4 and 5 — 1.3 m/s; Experiments 6 and 7 — 0.9 m/s; Experiment 8 — 4 m/s; Experiment 9 — 4.4 m/s.

During the experiments, heat flow sensors were used, the characteristics of which are presented in more detail in Tabl. 2. Heat flow sensors SBG01 are located as shown in Fig. 5–8. More detailed information about the sensors is available in user manuals¹⁵.

In a simulation experiment, there arises a problem of comparing simulation with a real object, which is solved by applying the theory of similarity. The similarity theory makes it possible to set simulation characteristics and parameters that are worth varying in experiments, the rules used to transfer results to real objects, and answer other questions relating to the experiment implementation.

In the research carried out by the authors, the similarity method was used. A necessary and sufficient condition of similarity between a simulation model and a simulated object is the consistency of numerical values of dimensionless items. In the experiments, a simulation model of the object and a vertical steel tank with a protective wall having a volume of 125,000 m³ are geometrically similar, since their equal dimensions are proportional and angles are equal.

¹⁵ User manual SBG01. Water cooled heat flux sensor. URL: https://www.hukseflux.com/uploads/product-documents/SBG01_manual_v1722.pdf

Table 2. Heat flow sensors

Experiment number	Sensor measuring range, kW/m ²	Distance from the centre of the tank to the sensor, m	Angle of inclination of the sensor from the contour line directed upwards, degrees	Sensor height from the ground, m
1	0...100	1.56	50	0.4
2	0...100	2.00	33	0.4
3	0...200	1.26	56	0.4
4	0...50	2.80	27	0.4
5	0...50	2.80	27	0.4
6	0...100	1.26	56	0.4
7	0...100	1.26	56	0.4
8	0...100	1.26	56	0.4
9	0...100	1.56	50	0.4
10	0...100	1.56	50	0.4
11	0...100	1.56	50	0.4

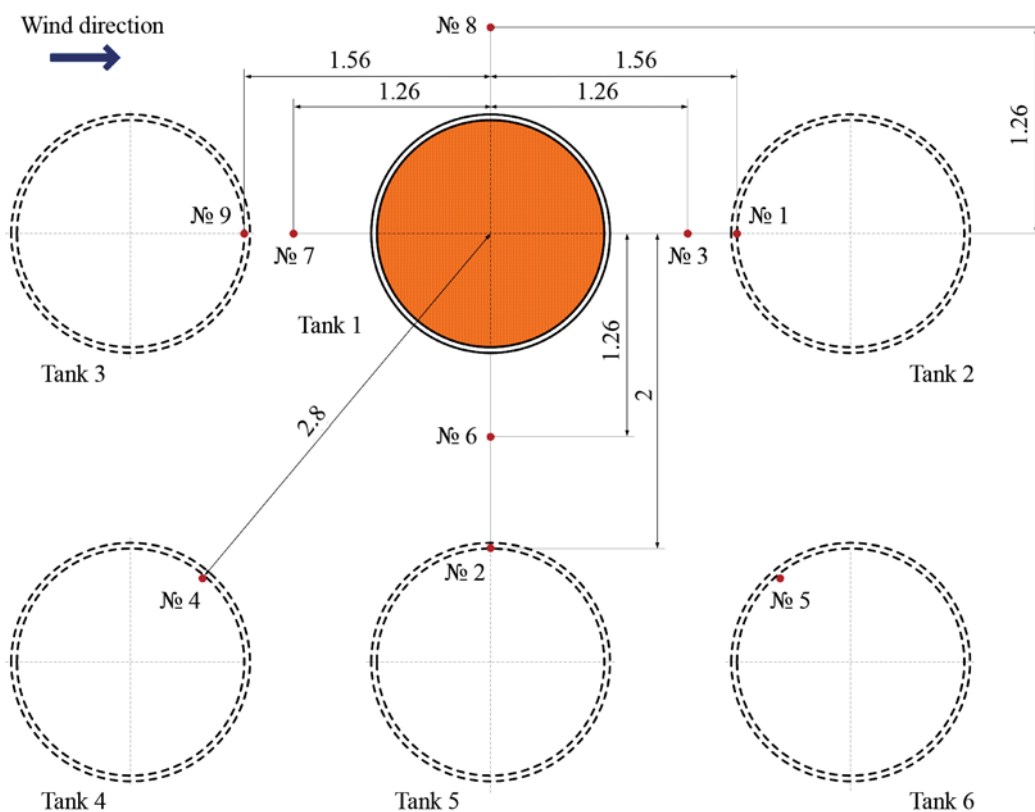


Fig. 5. Heat flow sensors (top view)

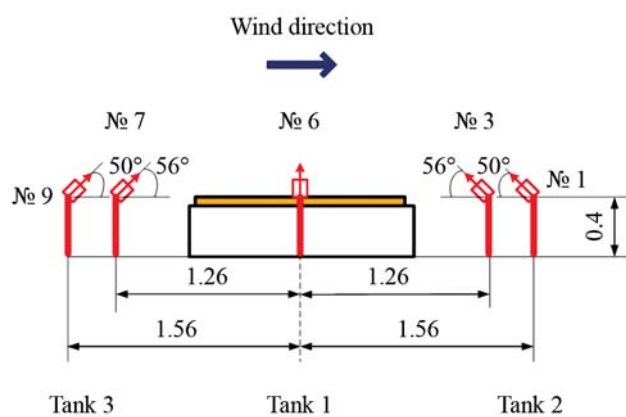


Fig. 6. Heat flow sensors (side view for Tanks 1-3)

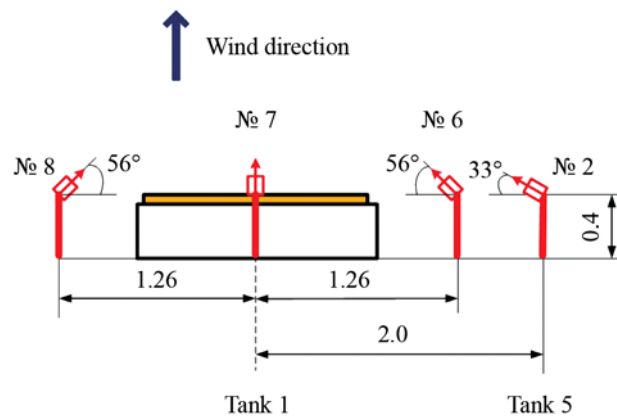


Fig. 7. Heat flow sensors (side view for Tanks 1 and 5)

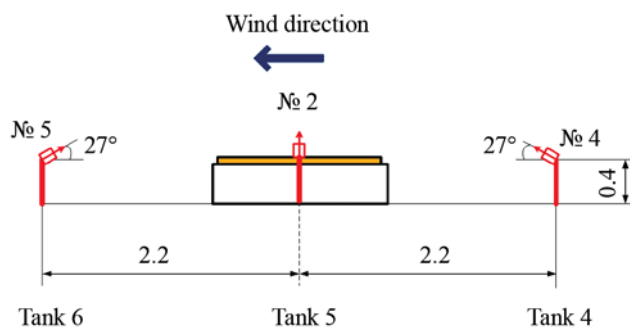


Fig. 8. Heat flow sensors (side view for tanks 4-6)

Since different wind loads were applied during the research, this experiment required kinematic similarity between the real wind speed and the wind speed in the experiment. The study [21] demonstrates a very low dependence of similarity coefficient k on Reynolds criterion Re at $Re \gg 1,000$, i.e. aerodynamic coefficients of models only require the fulfilment of the geometric (linear) similarity condition. In this case, the influence of the turbulence intensity on calculated values is usually not taken into account, since measuring the turbulence in the air flow and regulating this figure require some sophisticated equipment and special studies. Indeed, the speed in a simulation model and the speed in a real object are kinematically similar, since, subject to their geometric similarity, speeds are proportional, and their trajectories are similar:

$$\frac{l_{1i}}{l_{2i}} = idem, \frac{v_{1k}}{v_{2k}} = idem, \quad (11)$$

$$i = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, m,$$

where l_{1i} , l_{2i} , l_{1k} , l_{2k} , are typical geometric dimensions and velocities.

It is understood that the nature, shape and size of flame, other things being equal, are determined by the characteristics of the flammable liquid, its temperature, the tank size and wind load. Based on

the geometric similarity of the simulation model and the real object, the kinematic similarity of wind speeds and the choice of the same type of combustible liquid (petrol), it can be concluded that the experiments ensure similarity of the burning area of a physical simulation model and a tank having a volume of 125,000 m³.

Results and discussion

Having conducted experiments involving the simulation model, the authors obtained values of heat flows emitted during petrol combustion in the main tank depending on the tank-to-object distance and the wind speed. Fig. 9 shows the data from Sensor 1 recorded as a result of experiments 1, 2, 10 and 11; Fig. 10 shows the data from Sensor 1 at the wind speed of 1.9 m/s.

To build an ANFIS network that will make heat flow projections (disregarding wind loads), four wind load-free experiments were selected; they were experiments 1, 2, 10 and 11. The following network input parameters were used: Input 1 — time, s; Input 2 — distance from the centre of the tank, m; Input 3 — angle of deviation from the horizontal, degrees; network output parameter — heat flow, kW/m².

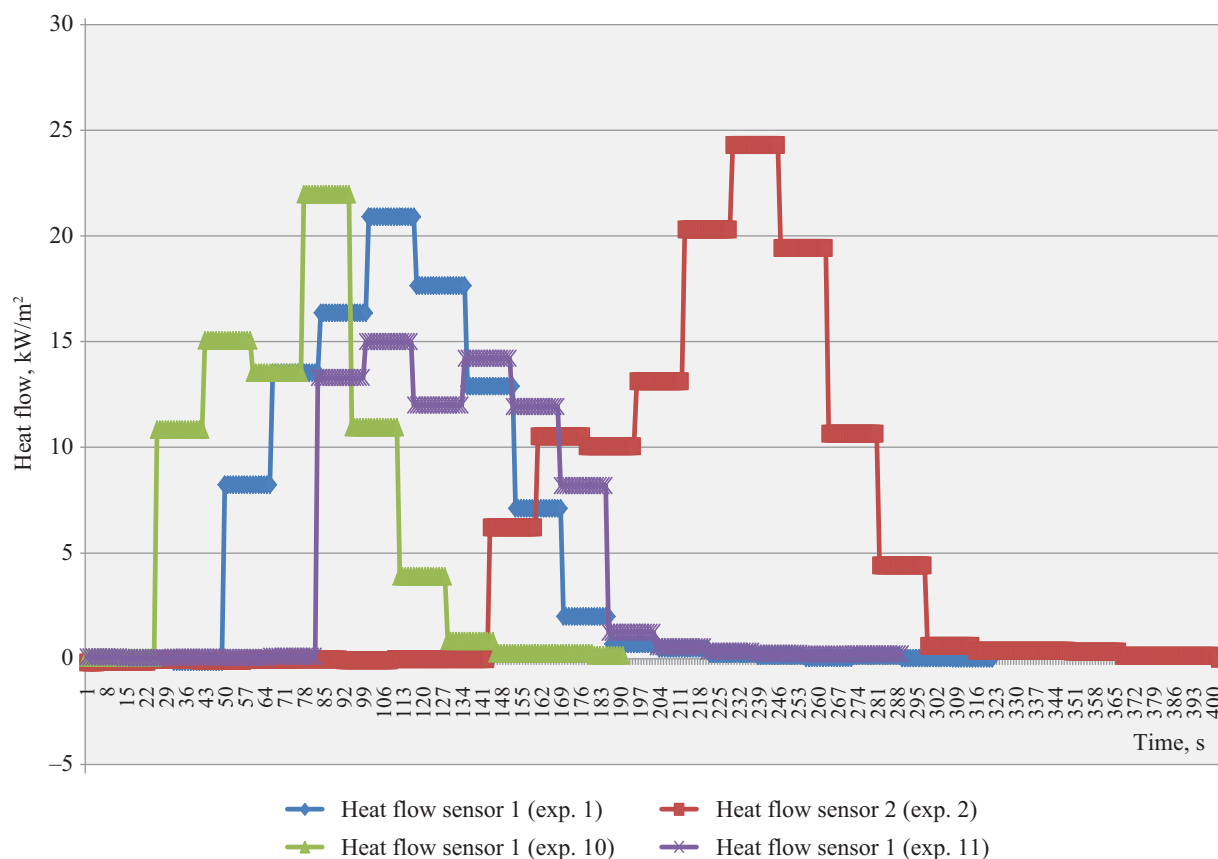


Fig. 9. Dependence of heat flow on time (heat flow sensor 1, wind speed — 0 m/s)

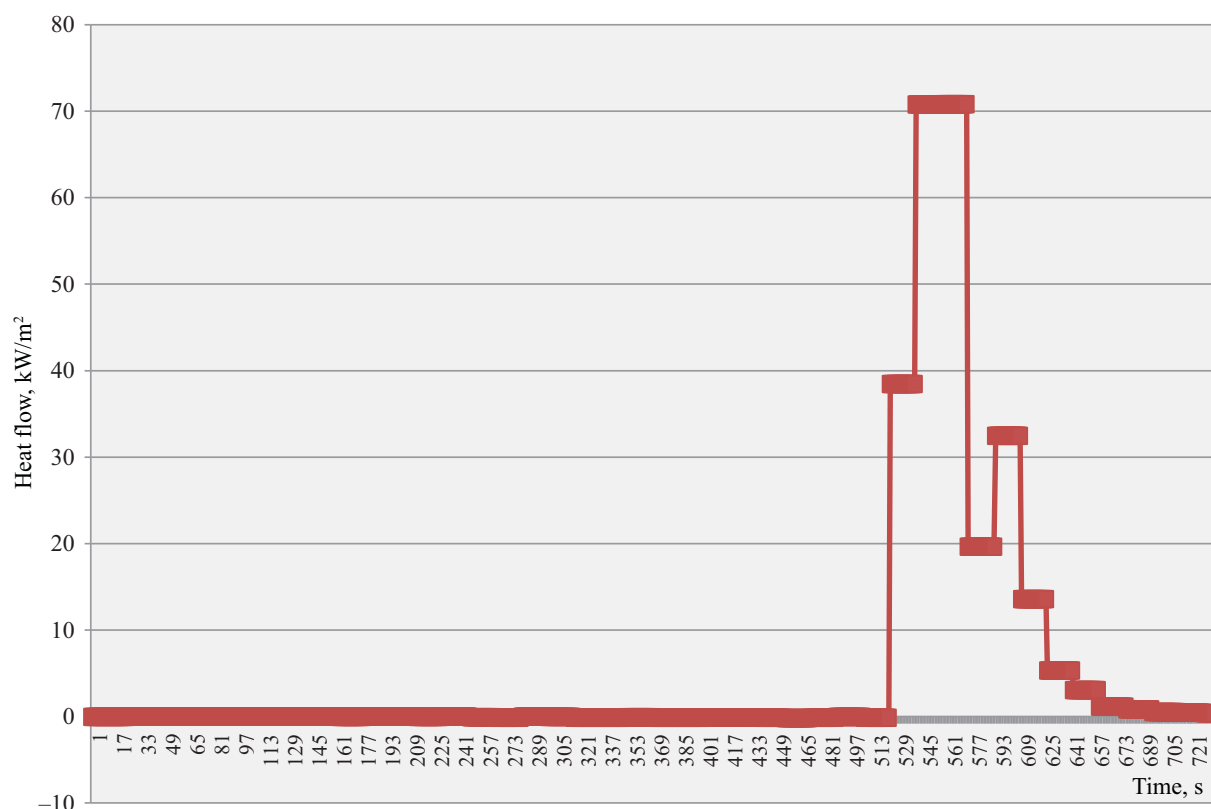


Fig. 10. Dependence of heat flow on time (heat flow sensor 1, wind speed — 1.9 m/s)

In order to build an ANFIS network will make heat flow projections (with regard for wind loads), seven experiments that took account of wind load were selected; they were experiments 3 to 9. The following network input parameters were used: Input 1 — time, s; Input 2 — wind speed, m/s; Input 3 — distance from the centre of the tank, m; Input 4 — angle of deviation from the contour line, degrees; network output parameter — heat flow, kW/m².

The total amount of experimental data applied to construct an ANFIS network capable of predicting heat flows disregarding the wind load comprised 10,845 records: 50 % of the total package were used

to produce the training sample, 50 % of the total package were applied to make the test sample. Experimental data that represented 32,518 records were used to make an ANFIS network capable of projecting heat flows with regard to the wind load. Training and testing samples were generated: 50 % of the total package were designated for training purposes, 50 % of the total package were test samples. All records having odd numbers were selected from the package of records to make a training sample (Tabl. 3 and 4), and records having even numbers were chosen for the test sample (Tabl. 5 and 6).

Table 3. Fragment of the training package for ANSIS (no wind load)

Number	Input 1	Input 2	Input 3	Output
1	1.00	1.56	50.00	0
2	3.00	1.56	50.00	0
3	5.00	1.56	50.00	0
4	7.00	1.56	50.00	0
5	9.00	1.56	50.00	0
...	...	...	...	...
5423	290.00	1.56	50.00	1

Table 4. Fragment of the training package for ANSIS (wind load)

Number	Input 1	Input 2	Input 3	Input 4	Output
1	1.00	1.90	1.26	56.00	0
2	3.00	1.90	1.26	56.00	0
3	5.00	1.90	1.26	56.00	0
4	7.00	1.90	1.26	56.00	0
5	9.00	1.90	1.26	56.00	0
...	...	...	...	...	...
16 259	270.00	4.40	1.56	50.00	0

Table 5. Fragment of the test sample for ANSIS (no wind load)

Number	Input 1	Input 2	Input 3	Output
1	2.00	1.56	50.00	0
2	4.00	1.56	50.00	0
3	6.00	1.56	50.00	0
4	8.00	1.56	50.00	0
5	10.00	1.56	50.00	0
...	...	...	...	...
5422	289.00	1.56	50.00	1

Table 6. Fragment of the training package for ANSIS (wind load)

Number	Input 1	Input 2	Input 3	Input 4	Output
1	2.00	1.90	1.26	56.00	0
2	4.00	1.90	1.26	56.00	0
3	6.00	1.90	1.26	56.00	0
4	8.00	1.90	1.26	56.00	0
5	10.00	1.90	1.26	56.00	0
...	...	...	...	...	...
16 258	269.00	4.40	1.56	50.00	0

Table 7. ANFIS error values (no wind load) depending on the type of membership function and optimisation method

Optimisation method	RMSE for the training package	RMSE for the test package
Hybrid method		
Triangular	8.90	8.86
Trapezoidal	9.01	8.96
Generalised bell-shaped	8.92	8.87
Gaussian	8.89	8.84
Gaussian combinational	9.01	8.96
Pi-shaped	9.05	9.00
Difference between two sigmoidal functions	8.78	8.73
Product of two sigmoidal functions	8.72	8.67
Backpropagation		
Triangular	10.85	10.79
Trapezoidal	10.78	10.73
Generalised bell-shaped	10.85	10.79
Gaussian	10.85	10.79
Gaussian combinational	10.77	10.79
Pi-shaped	10.76	10.70
Difference between two sigmoidal functions	10.78	10.72
Product of two sigmoidal functions	10.74	10.68

Table 8. ANFIS error values (wind load taken account of) depending on the type of membership function and optimisation method

Membership function	RMSE for the training package	RMSE for the test package
Hybrid method		
Triangular	7.30	7.26
Trapezoidal	7.34	7.29
Generalised bell-shaped	7.07	7.02
Gaussian	7.16	7.12
Gaussian combinational	7.34	7.30
Pi-shaped	7.36	7.31
Difference between two sigmoidal functions	7.31	7.27
Product of two sigmoidal functions	7.31	7.27
Backpropagation		
Triangular	7.97	7.93
Trapezoidal	7.91	7.87
Generalised bell-shaped	7.97	7.92
Gaussian	7.97	7.93
Gaussian combinational	7.91	7.87
Pi-shaped	7.91	7.86
Difference between two sigmoidal functions	7.91	7.86
Product of two sigmoidal functions	7.91	7.86

Types of membership functions for different optimisation methods were compared in the process of generating a system having a lattice partitioning algorithm and the following network parameters:

- number of training epochs — 100;
- number of member functions for each input — 3;
- error — 0;
- optimisation method — hybrid or backpropagation method.

According to the results provided in Tabl. 7, the smallest RMSE error for the ANFIS network designated for wind load free results, corresponds to the use of the product of two sigmoidal membership functions. For the ANFIS network, which generates a forecast taking into account the wind load, the smallest RMSE error, as it can be seen from Tabl. 8, corresponds to the application of the generalised bell-shaped membership function.

The results obtained are compared with the results obtained during system generation through subtractive clustering using the mining method. The following parameters were used to construct ANFIS networks using the sub-clustering method:

- vector of radii — 0.5;
- suppression coefficient — 1.25;
- acceptance coefficient — 0.5;
- rejection coefficient — 0.15;
- number of training epochs — 100.

The results, presented in Tabl. 9 and 10, demonstrate the following conclusions:

- The ANFIS network (1) designated for forecasting heat flows regardless of wind loads and (2) built using the sub-clustering method, is optimal (hybrid optimisation method);
- The ANFIS network (1) designated for forecasting heat flows with account taken of wind loads and (2) built using the sub-clustering method, is optimal (hybrid optimisation method).

Indeed, various types of membership functions, optimisation methods and system generation methods were compared, and it was discovered that it is optimal to use subcluster and hybrid optimisation methods, which provide lowest sample error values for ANFIS networks, that forecast heat flows with account/with no account taken of the wind load.

The developed ANFIS networks were used to create a set of rules to determine the dependence between heat flows inside tanks, having protective walls, and environmental factors. ANFIS networks are designed to create a predictive scenario for fire development in the main tank for tanks having protective walls.

The analysis shows that wind speed and tank location can rise the temperature of the air, the tank wall and

petrol. Therefore, despite the complexity of the analysis, consideration of all these factors allows forecasting a safe distance from a burning tank.

There is a difference between research results and experimental data. The reason for this may be that fire flares depend on other factors apart from wind speed, distance and angle, which were not included in the simulation model. In addition, time series may contain noise associated with unrecorded factor fluctuations.

Consequently, the following conclusion can be made: the ANFIS network built using the sub-clustering method is optimal (the optimisation method is hybrid).

Conclusion

In the research, the authors considered a fire development scenario inside the main tank having a protective wall, if the tank is the part of the tank farm.

The plan and the course of the field experiments are described in detail in this work (see Fig. 3–9). As a result of the experiment, the experimental data were collected (see Fig. 10 and 11) by SBG01 heat flow sensors.

Based on the experimental data, training and test samples were generated (see Tabl. 3–6) and dependences between the heat flow and the external environment were determined by means of ANFIS artificial neural networks.

Types of membership functions were compared to select an optimal function for ANFIS networks (wind load versus no wind load). It was found out that if the hybrid optimisation method is used, the product of two sigmoidal membership functions is the optimal type of the membership function for the ANFIS network constructed regardless of wind load (RMSE = 8.72 for the training sample, RMSE = 8.67 for the test sample). For the ANFIS network, that takes account of the wind load, the hybrid optimisation method provides the best results if the generalised bell-shaped membership function is used (RMSE = 7.07 for the training package, RMSE = 7.02 for the test package).

Table 9. ANFIS error values (regardless of the wind load) depending on the optimisation method applied to training and test samples

Optimisation method	RMSE for the training package	RMSE for the test package
Hybrid method	8.33	8.28
Backpropagation	42.53	42.42

Table 10. ANFIS Error values (with account taken of the wind load) depending on the optimisation method applied to training and test samples

Optimisation method	RMSE for the training package	RMSE for the test package
Hybrid method	6.61	6.56
Backpropagation	9.01	8.96

The analysis of ANFIS networks built using the sub-clustering method is carried out. It was found out that the sub-clustering method (coupled with the hybrid optimization method) provides lowest errors in the samples designated for predicting the heat flow using the ANFIS network with account/with no account taken of the wind load. Indeed, for the ANFIS network that takes no account of the wind load,

RMSE = 8.33 for the training sample, RMSE = 8.28 for the test sample, and for the ANFIS network that takes account of the wind load, RMSE = 6.61 for the training sample, RMSE = 6.56 for the test sample.

Scientific research made it possible to develop a model for the operational forecasting of heat flows using elements of artificial intelligence (ANFIS networks). In the presented study, the authors placed special emphasis on identifying the dependence between the heat flow and the wind load. The results obtained in the course of the work will increase the efficiency of containment and elimination of fires, safety of fire facilities and personnel, and reduce social, economic and environmental damage. The model for the operational forecasting of heat flows that takes account of the influence of environmental factors, including wind loads, can be integrated into management decision support systems designated for making managerial decisions on the arrangement of personnel and equipment in modern tank farms.

REFERENCES

1. Krasnov A.V., Sadykova Z.Kh., Perezhogin D.Yu., Mukhin I.A. Statistics of emergency accidents in the refining and petrochemical industry in 2007-2016. *Oil and Gas Business*. 2017; 6:179-191. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30784379> (rus.).
2. Demekhin F.V., Tarantsev A.A., Belov D.I. On the problem of fire extinguishing in reservoirs having ring-type protective walls. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo Universiteta GPS MCHS Rossii*. 2013; 2:68-75. URL: <https://vestnik.igps.ru/wp-content/uploads/V52/13.pdf> (rus.).
3. Petrova N.V., Cheshko I.D., Galishev M.A. Analysis of the expert practice of fire research into oil storage facilities. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo Universiteta GPS MCHS Rossii*. 2016; 3:40-46. URL: <https://vestnik.igps.ru/wp-content/uploads/V83/7.pdf> (rus.).
4. Blinov V.I., Khudyakov G.N., Petrov I.I. *On the mechanism of extinguishing the combustion of oil products in tanks by mixing them with air*. Moscow, Information collection TsNIPO, 1958; 34-38. (rus.).
5. Petrov I.I., Reutt V.Ch. *Critical conditions for extinction of the flame of an oil product when it is stirred in a tank*. Moscow, Information collection TsNIPO, 1959; 58-61. (rus.).
6. Volkov O.M., Proskuryakov G.A. *Fire safety at the enterprises performing transportation and storage of oil and oil products*. Moscow, Nedra publ., 1981; 256. (rus.).
7. Abramov Yu.A., Basmanov A.E. Minimizing fire damage in tank farms. *Pozharovzryvobezopasnost/ Fire and Explosion Safety*. 2007; 4:59-65. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12512034>
8. Zabetakis M.G., Burgess D.S. *Research on hazards associated with production and handling of liquid hydrogen*. Bureau of Mines, Washington, D.C., 1961. DOI:10.2172/5206437
9. Markstein G.H., De Ris J. Wall-fire radiant emission. Part 1: Slot-burner flames, comparison with jet flames. *Symposium (International) on Combustion*. 1991; 23(1):1685-1692. DOI: 10.1016/S0082-0784(06)80443-1
10. Markstein G.H., De Ris J. Wall-fire radiant emission — Part 2: Radiation and heat transfer from porous-metal wall burner flames. *Symposium (International) on Combustion*. 1992; 24(1):1747-1752. DOI: 10.1016/S0082-0784(06)80204-3
11. Drysdale D. *An introduction to fire dynamic*. John Wiley & Sons, 2011; 512.
12. Babrauskas V. Estimating large pool fire burning rates. *Fire Technology*. 1983; 19(4):251-261. DOI: 10.1007/BF02380810
13. Munoz M., Arnaldos J., Casal J., Planas E. Analysis of the geometric and radiative characteristics of hydrocarbon pool fires. *Combustion and Flame*. 2004; 139(3):263-277. DOI: 10.1016/j.combust-flame.2004.09.001

14. Shvyrkov S.A., Vorobyev V.V., Ibatulin R.K. The danger of a cascading fire spreading in a tank farm with a wind effect. *Technology of Technosphere Safety*. 2017; 4(74):8. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2017-4/26-04-17.ttb.pdf> (rus.).
15. Rubtsov D.N., Shalymov M.S. About the spread of fire in a tank of the 'glass in the glass' type containing oil and oil products. *Technology of Technosphere Safety*. 2016; 3(67):8. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2016-3/23-03-16.ttb.pdf> (rus.).
16. Schälke S., Mishra K.B., Malow M., Berger A., Wehrstedt K.D., Schönbucher A. Mass burning rate of a large TBPB pool fire — experimental study and modeling. *Chemical Engineering Transactions*. 2013; 31:853-858. DOI: 10.3303/CET1331143
17. Shalymov M.S. Influence of thermal loads fire oil tanks on the body neighboring heated tank. *Technology of Technosphere Safety*. 2015; 2(60):8. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2015-2/16-02-15.ttb.pdf> (rus.).
18. Anwar Z., Afzal H., Bibi N., Abbas H., Mohsin A., Arif O. A hybrid-adaptive neuro-fuzzy inference system for multi-objective regression test suites optimization. *Neural Computing and Applications*. 2019; 31(11):7287-7301. DOI: 10.1007/s00521-018-3560-8
19. Zaichenko Yu.P., Sevaev F. The investigation of fuzzy neural network ANFIS in the problem of macroeconomic indexes forecasting. *System Research & Information Technologies*. 2005; 1:100-112. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/13765> (rus.).
20. Leite R.M., Centenob F.R. Effect of tank diameter on thermal behavior of gasoline and diesel storage tanks fires. *Journal of Hazardous Materials*. 2018; 342:544-552. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2017.08.052
21. Yun-Wei Zhanga, Zhao-Lin Gua, Zan-She Wanga, Chuck Wah Francis Yua. Revisit of wind flows between wind tunnels and real canyons – the viewpoint of Reynolds dynamic similarity. *Indoor and Built Environment*. 2013; 22(3):467-470. DOI: 10.1177/1420326X12489064

Received July 29, 2020; Received in revised form August 5, 2020;

Accepted August 18, 2020

Information about the authors

Tatiana S. STANKEVICH, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Technosphere Safety Department, Kaliningrad State Technical University (KSTU), Kaliningrad, Russian Federation; Master's Degree Student, National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russian Federation; ID RISC: 717673; ResearcherID: O-7418-2017; Scopus Author ID: 57214781783; ORCID: 0000-0002-8707-7187; e-mail: tatiana.stankevich@klgtu.ru

Dalibor BALNER, Ph.D., Engineer, Faculty of Safety Engineering, Department of Security Services, Ostrava Technical University, Ostrava, Czech Republic; Scopus Author ID: 57194767595; ORCID: 0000-0003-4071-1918; e-mail: dalibor.balner@vsb.cz

Martin TRCKA, Ph.D., Engineer, Faculty of Safety Engineering, Department of Fire Protection, Ostrava Technical University, Ostrava, Czech Republic; Scopus Author ID: 56330779100; ORCID: 000-0002-4574-229X; e-mail: martin.trcka@vsb.cz

Adam THOMITZEK, Ph.D., Engineer, Department of Fire Protection, Technical University of Ostrava, Ostrava, Czech Republic; Scopus Author ID: 56331461400; ORCID: 0000-0002-6697-8787; e-mail: adam.thomitze@vsb.cz