

Научная статья

УДК 622.276; DOI: 10.61260/1998-8990-2024-4-119-129

МОДЕЛЬ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ В НАДЗЕМНЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПОЖАРНЫХ РЕЗЕРВУАРАХ С ВНУТРЕННИМ ГАЗОХОДОМ

Крутолапов Александр Сергеевич;

✉ **Кузьмин Анатолий Алексеевич;**

Романов Николай Николаевич.

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

✉ kaa47@mail.ru

Аннотация. Предложена установка газохода, который проходит вертикальный резервуар снизу доверху и соединен с климатической системой объекта, что позволяет использовать остаточную тепловую энергию отходящего воздушного потока, тем самым предотвращая замерзание сохраняющегося запаса воды. Показано, что эффективная оптимизация предполагает использование результатов натурного или математического моделирования процессов теплообмена в резервуаре, а также внутри газохода, стенок резервуара и теплоизоляционных слоев. Область натурного и численного моделирования включала в себя две жидкости (воду внутри резервуара и воздух внутри газохода), внутреннюю стальную стенку и полиуретановый изоляционный материал, покрытый наружной защитной стальной оболочкой, а так же внешнее воздушное пространство. Численное решение было получено с использованием CFD кода ANES для всей области путем дискретизации управляющих уравнений с помощью методов конечных объемов. Предложенная численная модель может быть использована для детального описания тепловых явлений, происходящих внутри пожарного резервуара с внутренним газоходом, и прогнозирования тепловых и гидродинамических параметров исследуемой конструкции.

Ключевые слова: наружный пожарный резервуар, противопожарный запас воды, внутренний газоход, CFD, средства вычислительной гидродинамики

Для цитирования: Крутолапов А.С., Кузьмин А.А., Романов Н.Н. Модель свободной конвекции в надземных вертикальных пожарных резервуарах с внутренним газоходом // Проблемы управления рисками в техносфере. 2024. № 4 (72). С. 119–129. DOI: 10.61260/1998-8990-2024-4-119-129.

Scientific article

A MODEL OF FREE CONVECTION IN ABOVEGROUND VERTICAL FIRE TANKS WITH AN INTERNAL FLUE

Krutolapov Alexander S.;

✉ **Kuzmin Anatoliy A.;**

Romanov Nikolay N.

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

✉ kaa47@mail.ru

Abstract. It is proposed to install a flue that passes through a vertical reservoir from bottom to top and is connected to the facility's climate system, which allows the use of residual thermal energy of the outgoing airflow, which prevents freezing of the remaining water supply. It is shown that effective optimization involves the use of the results of full-scale or mathematical modeling of heat transfer processes in the tank, as well as inside the flue, tank walls and thermal insulation

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2024

layers. The field of full-scale and numerical modeling included two liquids (water inside the tank and air inside the flue), an internal steel wall and a polyurethane insulating material covered with an external protective steel shell, as well as an external airspace. The numerical solution was obtained using the CFD code ANES for the entire domain by discretizing the control equations using finite volume methods. The proposed numerical model can be used to describe in detail the thermal phenomena occurring inside a fire tank with an internal flue and predict the thermal and hydrodynamic parameters of the structure under study.

Keywords: outdoor fire tank, fire-fighting water supply, internal flue, CFD, computational fluid dynamics tools

For citation: Krutolapov A.S., Kuzmin A.A., Romanov N.N. A model of free convection in aboveground vertical fire tanks with an internal flue // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2024. № 4 (72). P. 119–129. DOI: 10.61260/1998-8990-2024-4-119-129.

Введение

Наружные пожарные резервуары являются важнейшей частью системы пожарной безопасности промышленных и административных объектов, торговых центров и гипермаркетов, а так же жилых зданий. Существующая традиция определяет пожарный резервуар как металлическую, железобетонную или стеклопластиковую конструкцию [1]. Такая конструкция предназначена исключительно для хранения противопожарного запаса воды [2].

Если существует потребность в значительном запасе воды, а производственные площади ограничены, наиболее распространенной конструкцией, применяемой на практике, являются резервуары вертикальные стальные (РВС), объем которых может достигать 2 000 м³. Однако такой большой объем не всегда бывает востребован. РВС значительного объема изображен на рис. 1.



Рис. 1. РВС объемом более 1 500 м³ для торгового комплекса в г. Пскове

Однако наиболее распространенными типами пожарных РВС принято считать емкости объемом до 500 м³ [3–5].

Для бесперебойной круглогодичной эксплуатации вертикального резервуара, изображенного на рис. 1, стальные стенки, дно и кровля снабжены теплоизоляцией. Также в таком РВС установлены два электрических нагревателя в нижней и верхней зоне для поддержания положительной температуры воды в зимнее время года. Более эффективным конструкторским решением является установка газохода, который проходит РВС снизу

доверху и соединен с климатической системой объекта, что позволяет использовать остаточную тепловую энергию отходящего воздушного потока. Однако чтобы повысить тепловую эффективность такой системы, ее конфигурация должна быть оптимизирована. Такая эффективная оптимизация предполагает использование результатов натурного или математического моделирования процессов теплообмена в резервуаре, а также внутри газохода, стенок резервуара и теплоизоляционных слоев.

Простейшим решением было бы использование одномерных моделей, которые вместе с результатами натуральных экспериментов позволили бы получить необходимые эмпирические параметры. Основными преимуществами одномерных моделей являются их простота программной реализации, а так же сокращение времени, затрачиваемого процессором на выполнение продолжительного моделирования, поэтому на их базе строятся коммерческие программные продукты, например TRNSYS [6]. В такого рода моделях величина температуры считается постоянной применительно к конкретной точке анализируемого объема жидкости [7, 8]. Результаты моделирования, полученные с использованием одномерных моделей, проанализированы в работах [7, 9, 10]. Однако если система дополняется новым элементом (например, газоходом внутри резервуара), одномерная модель становится неадекватной нестационарным процессам, характерным для работы РВС в условиях пожара.

Более детальное численное моделирование процессов теплопередачи и течения жидкости возможно на основе использования средств Computational Fluid Dynamics (CFD, вычислительной гидродинамики) [11]. Однако использование таких трехмерных инструментов, как ARC3D, OVERFLOW, CFL3D предполагает наличие высокопроизводительных вычислительных мощностей.

В литературе можно найти несколько работ, описывающих нестационарные процессы охлаждения или нагрева жидкости внутри корпуса РВС. Так, авторы [12] численно исследовали естественную конвекцию в вертикальном цилиндрическом корпусе, нагреваемом от боковой стенки постоянным тепловым потоком и при высоких числах Рэлея.

В работе [13] были представлены результаты экспериментального исследования и численного моделирования процесса охлаждения реального прототипа РВС. При этом были проанализированы переходные процессы, происходящие из-за теплообмена с окружающей средой, а так же изучено влияние соотношения сторон, объема и толщины изоляции на тепловые характеристики резервуара.

Относительно недавно авторы [14] провели масштабный анализ результатов численного моделирования процесса свободной конвекции жидкости, находящейся в вертикальном цилиндрическом резервуаре. Полученные зависимости, описываемые безразмерными параметрами, могут быть использованы применительно к задачам описания тепловых процессов внутри РВС. Однако использование полученных результатов исследования стандартных цилиндрических резервуаров на конфигурацию пожарного РВС с внутренним газоходом требует теоретического обоснования и экспериментального подтверждения.

Фактически, эта конфигурация была изучена только с помощью одномерных моделей [15], при этом тепловые и гидродинамические процессы в жидкости внутри резервуара и воздуха внутри газохода были смоделированы с помощью многоузлового подхода. Для взаимодействия обеих сред необходимо учитывать значения коэффициентов поверхностной теплоотдачи. Кроме того, получение реалистичных результатов требовало применения специальных вычислительных приемов (например, процедур, которые на каждом временном шаге проверяют распределение температур и, в случае обнаружения более горячих слоев воды под более холодными, искусственно перемешивают или меняют местами слои воды). В работе [15] показана необходимость применения подробных численных моделей для изучения теплового и гидродинамического поведения жидкости внутри РВС.

Целью данной работы является оценка применимости более доступного CFD кода ANES для численного моделирования нестационарной естественной конвекции пожарного РВС с внутренним газоходом, который может обеспечить положительную температуру хранимой воды в зимнее время года.

Экспериментальная установка

Натурный эксперимент проводился в вертикальном цилиндрическом резервуаре с внутренним газоходом. Схема модели РВС показана на рис. 2.

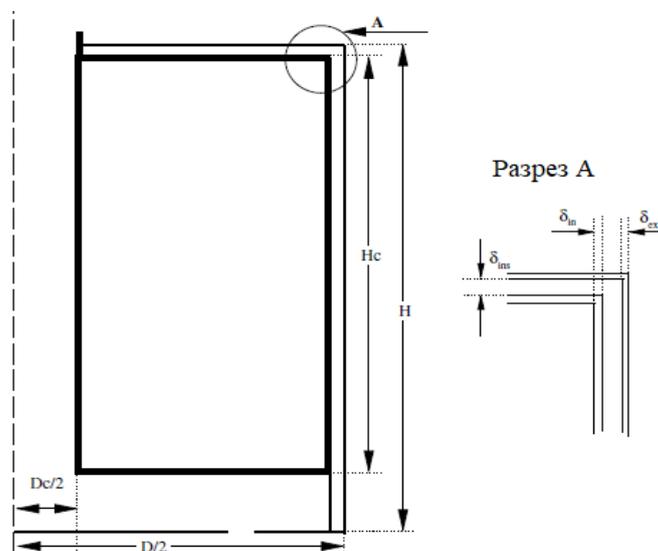


Рис. 2. Схема модели РВС с внутренним газоходом

Объем резервуара составляет 144 л при соотношении высоты и диаметра $H/D=2,24$ ($H = 1\,132$ мм, $D = 505$ мм). Цилиндрическая стенка установки содержит три слоя: внутренний слой из стального листа толщиной $d_{in}=3$ мм, теплоизоляционный слой полиуретана толщиной $d_{ins}=20$ мм и защитная стальная обшивка толщиной $d_{eux}=1$ мм. Воздуховодный канал диаметром $D_c=10$ мм проходит через резервуар снизу вверх ($H_c=932$ мм) и представляет собой разделительный слой теплопередачи между подаваемым снизу воздухом и водой в резервуаре. Выходные и входные магистрали для подачи воды расположены в верхней части резервуара. Холодная вода подается в нижнюю часть резервуара с помощью диффузора с линейной прорезью (рис. 3).

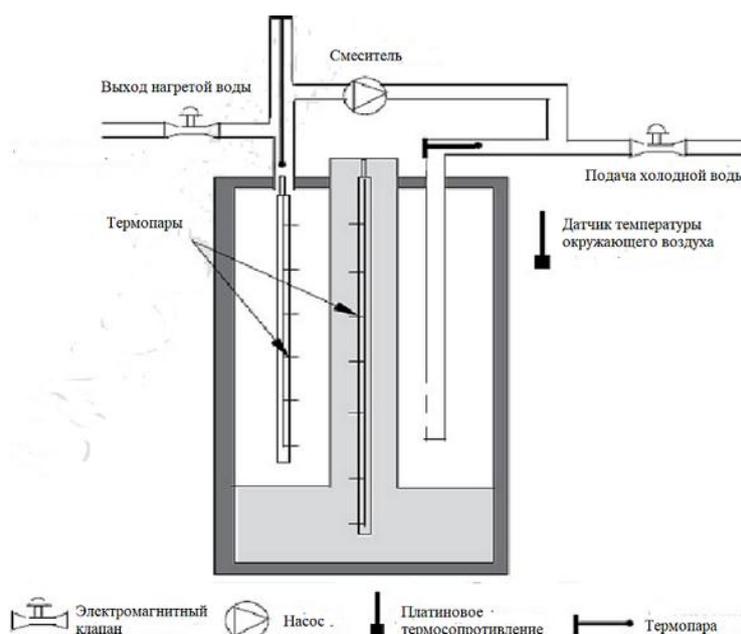


Рис. 3. Экспериментальная установка для исследования свободной конвекции в пожарных РВС с внутренним газоходом

В ходе натурального эксперимента проводились следующие измерения температуры: температура холодной воды, температура воды на входе и выходе, температура окружающей среды и температуры на разных уровнях в хранилище, в газоходе и в камере сгорания. Внутри резервуара на расстоянии 150 мм друг от друга были установлены шесть термопар для измерения температуры слоев нагреваемой воды. Еще пять термопар были установлены по центру газохода для измерения температуры подаваемого воздуха. В зависимости от диапазона измеряемых температур в РВС использовались преобразователи К-типа (хромель/алюмель), а для измерения температуры окружающей среды – платиновое термосопротивление РТ100.

Поскольку экспериментальные данные использовались для проверки результатов численного моделирования, было важно провести точные измерения температуры, для чего была проведена калибровка всех датчиков температуры. Во всех случаях было показано, что абсолютная ошибка в измерении температуры не превышала 0,1 °С.

Чтобы обеспечить равномерную температуру подогретой воды внутри модели РВС, был организован смесительный контур для циркуляции воды от верхней части резервуара к нижней. Если разница температур на входе и выходе составляет менее 1 °С в течение 15 мин, жидкость охлаждается в течение 90 ч, при этом происходит измерение температуры жидкости через каждые 30 мин во всех контрольных точках. Полученная в процессе измерения информация фиксировалась с помощью системы сбора данных HP Benchlink Data, блок регистрации которой был подключен к персональному компьютеру.

Натурные и численные модели

Область исследования включает в себя две жидкости (воду внутри РВС и воздух внутри газохода), внутреннюю стальную стенку и полиуретановый изоляционный материал, покрытый наружной защитной стальной оболочкой, а так же внешнее воздушное пространство, охлаждающее РВС.

Основные уравнения

Явления течения жидкости и теплопередачи в рассматриваемой задаче описываются уравнениями сохранения энергии и Навье – Стокса. При численном моделировании актуальных для практики пожарного дела задач важно определить, можно ли считать режим течения ламинарным или необходимо учитывать его турбулентность.

В работе [12] показано, что при непродолжительном подогреве жидкости за счет воздействия теплового потока на боковую стенку РВС числа Рэлея находятся в диапазоне от 10^{10} до 10^{15} . При этом ламинарный режим может быть достигнут до $Ra=10^{13}$, в то время как турбулентный поток следует ожидать при $Ra>5\cdot 10^{13}$. Поскольку в начале процесса достигается максимальное значение $Ra\approx 3,8\cdot 10^{12}$, а вода охлаждается и потери тепла в окружающую среду уменьшаются, что приводит к уменьшению числа Рэлея. Поэтому в дальнейшем предполагалось, что поток был ламинарным.

В ходе численного моделирования принимаются во внимание следующие допущения: исследуемые жидкости считаются ньютоновскими, их теплофизические свойства считаются постоянными. Параметры водной среды описываются в приближении Буссинеска: плотность воды изменяется незначительно, ее вязкая диссипация пренебрежимо мала и предполагается, что водная среда не излучает тепло. Будем считать, что плотность воды постоянна во всех членах определяющих уравнений кроме составляющей, соответствующей архимедовым силам и в которой плотность воды зависит от температуры линейно (фактически это разложение плотности в ряд Тейлора):

$$\rho \approx \rho_o + \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \cdot (T - T_{a,0}) = \rho_o \cdot \beta_T \cdot (T - T_{a,0}); \quad \beta_T = -\frac{1}{\rho} \cdot \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_T, \quad (1)$$

где T_{a0} – произвольный отсчет температуры; β_T – коэффициент термического расширения (знак минус в коэффициенте связан с тем, что плотность для подавляющего числа веществ падает с ростом температуры).

В соотношении (1) плотность ρ_0 и коэффициент термического расширения β_T считаются постоянными. Используя правую часть уравнения движения (1), соотношение для компоненты скорости потока в вертикальной плоскости U_y можно представить в виде:

$$-\frac{\partial P}{\partial y} - \rho \cdot g = -\frac{\partial P_d}{\partial y} + \rho_0 \cdot \beta_T \cdot g \cdot (T - T_{a,0}); \quad P_d = P + \rho_0 \cdot g \cdot y.$$

В этом соотношении появляется давление P_d , которое имеет очевидный физический смысл – это статическое давление за вычетом гидростатического столба. Если отсутствует движения среды, то статическое давление P линейно уменьшается с ростом координаты y , а давление P_d постоянно.

Таким образом, основные уравнения могут быть записаны следующим образом:

$$\nabla \cdot v = 0;$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v = -\frac{1}{\rho} \cdot \nabla p_d + \frac{1}{\rho} \cdot \nabla \tau - g \cdot \beta \cdot (T - T_{ref});$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v \cdot \nabla T = a \cdot \nabla^2 T,$$

где v – вектор скорости потока, м/с; t – время, с; τ – вектор тензора напряжений, кг·м/с²; P_d – напор в потоке жидкости, Па; g – ускорение свободного падения, м/с²; T – температура, К; T_{ref} – определяющая температура, К; a – коэффициент теплопроводности, м²/с.

Граничные и начальные условия

Учитывая симметрию поставленной задачи, область моделирования представляется осесимметричной. В уравнении энергетического баланса предполагается, что среднее значение коэффициента теплопередачи через крышу, дно и боковую стенку РВС оценивалось примерно $k \approx 10$ Вт/(м² К) и определено в процессе эксперимента, описанного в работе [16]. Изменения температуры жидкости не отслеживается при моделировании каждого временного шага, и это позволяет зафиксировать температуру окружающей среды в граничных условиях равной -10 °С на основе усредненных значений численного эксперимента.

Формулировка граничных условий теплообмена на входе и выходе газохода, несколько сложнее, предполагала, что воздух поступает в газоход с осевой скоростью, равной 0,01 м/с, а на выходе из газохода температурный градиент в осевом направлении равен нулю. Таким образом, предполагается, что вся кинематическая энергия поступающего воздушного потока преобразуется в тепло, в результате чего динамическое давление на выходе равно динамическому давлению окружающего воздуха:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{\text{вых}} = 0; \quad \left. P_d \right|_{\text{вых}} = 0.$$

Численное моделирование

Для верификации разработанного алгоритма выбрана задача моделирования процесса естественного охлаждения воды в РВС с внутренним газоходом, которая предполагает исследование наиболее неблагоприятного режима работы пожарного резервуара в случае аварийного отключения системы подогрева поступающего в газоход воздуха.

Численное решение было получено с использованием CFD кода ANES для всей области путем дискретизации управляющих уравнений с помощью методов конечных объемов, описанных С.В. Патанкармом. Код ANES предназначен для расчета двумерных полей, описывающих движение сплошной среды: давление p , компоненты вектора скорости U_x и U_y и температура T , что обусловлено симметричным профилем исследуемого пространства.

Теплофизические свойства теплопроводящих сред, используемые в ходе численного моделирования, представлены в таблице.

Таблица

Теплофизические свойства теплопроводящих сред

Параметр и его обозначение	Единица измерения	Среда			
		Вода	Воздух	Сталь	Тепло-изолятор
Плотность, ρ	кг/м ³	996,2	1,16	8030	70
Теплоемкость, C_p	Дж/(кг·К)	4164,4	1007	502	1045
Коэффициент теплопроводности, λ	Вт/(м·К)	0,615	0,0263	15,27	0,06
Коэффициент динамической вязкости, μ	Па·с	$8,07 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	–	–
Коэффициент объемного расширения, β	1/К	$2,76 \cdot 10^{-4}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$	–	–

Процесс решения подобной задачи состоит из трех этапов: формулирование теплофизических условий поставленной задачи, формирование математической модели в «обозначениях» применяемой версии CFD кода, собственно процесс счета. Использовалось полностью неявное временное дифференцирование первого порядка с использованием цилиндрических сеток в шахматном порядке. Диффузионные члены были вычислены с использованием схемы конечных разностей второго порядка, в то время как конвективные члены были аппроксимированы с помощью схемы высокого порядка с использованием метода отложенной коррекции.

В область моделирования входят две различные жидкости (вода, воздух) и два различных твердых материала (сталь, теплоизолятор), что затруднило выбор оптимальной продолжительности временного шага. Были использованы различные временные интервалы: 0,01 с, 0,1 с, 0,5 с, 1 с.

Для временного шага 1 с конвергенция процесса моделирования была нестабильной и в большинстве случаев происходила поэтапно, при этом критерии сходимости не выполнялись и после проведения 400 итераций. Для временного шага 0,5 с конвергенция была достигнута после проведения 100 итераций. Кроме того, после 1 000 с моделирования конвергенция процесса была утрачена. Для временных шагов 0,1 с и 0,01 с критерии сходимости выполнялись уже после 50 итерации, так что для моделирования с целью сокращения машинного времени был выбран временной шаг в 0,1 с.

Результаты исследования и их обсуждение

Графическая форма результатов численного и натурного моделирования процесса охлаждения воды в РВС представлена на рис. 4.

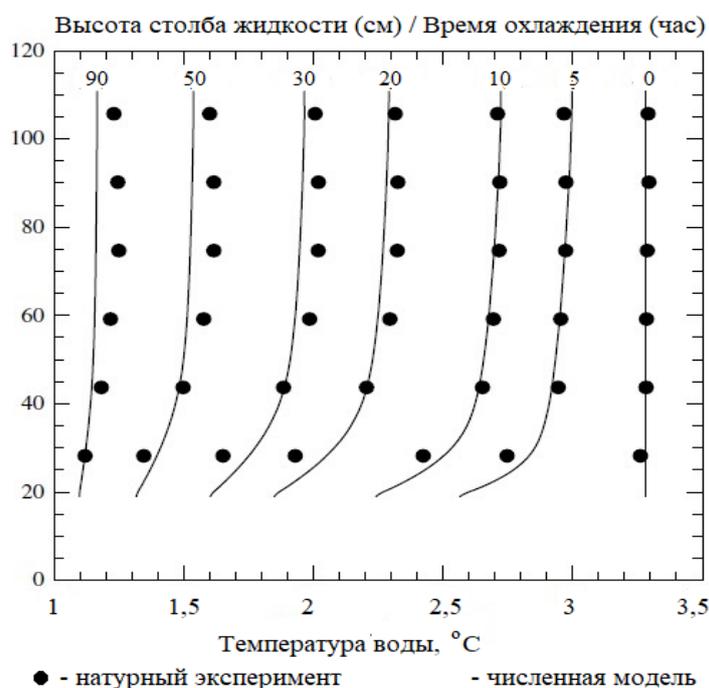


Рис. 4. Сравнение температур, полученных на экспериментальной установке и на основе численной модели для различных моментов процесса охлаждения

На дне резервуара наблюдается заметное увеличение теплового градиента в вертикальное направление и в процессе охлаждения воды наблюдается некоторое увеличение его значения с последующим уменьшением по мере приближения к 90 ч.

Экспериментально установлено, что квазистационарный режим движения, который сопровождается расслоением жидкости, наступает в первые часы процесса охлаждения. В этом случае можно утверждать, то в верхней половине резервуара развиваются конвективные процессы, а в нижней половине преобладают диффузионные эффекты, которые и вызывают тепловую стратификацию жидкости.

В целом температурные профили воды, находящейся в РВС и полученные экспериментальным путем и в ходе численного моделирования сопоставимы, но существуют незначительные расхождения особенно в нижней части резервуара. Эти расхождения могут быть связаны с различными факторами, такими как:

- предположение об осесимметричной форме температурного поля, которое не учитывает возможные отклонения в натурной модели;
- теплофизические свойства изоляционного слоя натурной модели РВС не являются однородными и изотропными;
- теплофизические свойства воды, воздуха, а так же изоляционного слоя и материала резервуара натурной модели РВС не вполне соответствуют теплофизическим свойствам, взятым из справочной литературы (табл.), которые были использованы в CFD коде ANES.

Заключение

Таким образом, можно сделать вывод о том, что предложенная численная модель, реализованная посредством CFD кода ANES, может быть использована для детального описания тепловых явлений, происходящих внутри пожарного РВС с внутренним газоходом, и прогнозирования тепловых и гидродинамических параметров исследуемой конструкции. Результаты, полученные в результате такого рода численного моделирования, могут быть использованы не только для оценки конкретного проекта пожарного РВС, но и для разработки конструктивных решений в повышении эффективности системы пожарной безопасности объектов.

Список источников

1. Зыков В.В., Гладких А.Н., Колпакова И.М. Применение пожарных резервуаров из стеклопластика // Актуальные вопросы пожарной безопасности. 2021. № 2 (8). С. 54–58. DOI: 10.37657/vniipro.avpb.2021.82.54.008. EDN WXUUOL.
2. Обзор основных изменений СП 8.13130.2020 «Системы противопожарной защиты. Наружное противопожарное водоснабжение. Требования пожарной безопасности» в редакции № 1 / В.В. Зыков [и др.] // Актуальные вопросы пожарной безопасности. 2023. № 4 (18). С. 34–43. DOI: 10.37657/vniipro.avpb.2023.55.92.004. EDN ZSWJMH.
3. Махов Д.В., Контарева В.Ю. Расчет пожарного запаса воды и подбор пожарного резервуара // Научные основы создания и реализации современных технологий здоровьесбережения: материалы VIII Междунар. науч.-практи. конф., посвящ. Году науки и технологий в Рос. Федерации. Волгоград: Общество с ограниченной ответственностью «СФЕРА», 2021. С. 459–464. EDN QHQSMN.
4. Таранцев А.А., Марухин П.Н., Петрова О.В. Математическая модель комбинированной гидравлической системы защиты резервуара // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России». 2017. № 4. С. 70–77. EDN YRHNQZ.
5. Андришкин А.Ю., Афанасьев Е.О., Кадочникова Е.Н. Обеспечение безопасности эксплуатации тепловых сетей // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России». 2019. № 4. С. 37–42. EDN VSOFIQ.
6. TRNSYS group, A Transient System Simulation Program TRNSYS, Solar Energy Laboratory. Madison: University of Wisconsin, 1994.
7. Kleinbach E.M., Beckman W.A., Klein S.A. Performance study of one-dimensional models for stratified thermal storage tanks // Solar Energy. 1993. № 50 (2). P. 155–166.
8. Duffie A., Beckman W.A. Solar Engineering of Thermal Processes. Second ed. New York: Wiley Inter Science, 1991.
9. Zurigat Yu.H., Ghajar A.J., Moretti P.M. Comparison study of one-dimensional models for stratified thermal storage tanks // Applied Energy. 1988. № 30. P. 99–111.
10. Alizadeh S. An experimental and numerical study of thermal stratification in a horizontal cylindrical solar storage tank // Solar Energy. 1999. № 66 (6). P. 409–421.
11. Методы и средства информационно-операционной поддержки теплотехнических расчетов в решении задач пожарной безопасности: монография / А.А. Кузьмин [и др.]. СПб.: С.-Петерб. ун-т ГПС МЧС России, 2023. 196 с. ISBN 978-5-907724-23-5. EDN FBYRNF.
12. Papanicolaou E., Belessiotis V. Transient natural convection in a cylindrical enclosure at high Rayleigh numbers // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2002. № 45 (7). P. 1425–1444.
13. Oliveski R.C., Krenzinger A., Vielmo H.A. Cooling of cylindrical tanks submitted to natural internal convection // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2003. № 46. P. 2015–2026.
14. Unsteady numerical simulation of the cooling process of vertical storage tanks under laminar natural convection / I. Rodriguez // International Journal of Thermal Sciences. 2019. № 48 (4). P. 708–721.
15. Hmouda C., Bouden. Etude Parametrique d'un Chauffe-eau Solaire Avec Appoint a` Gaz Integrer Dans le Ballon de Stockage en vue de l'optimisation de la Position du Bruleur // 12^emes Journes Internationales de Thermique JITH, 2005. Tanger Morocco, 2015.
16. Hmouda I., Bouden C. Parameters identification of a water storage tank fired by a gas heater and modelling of its thermal behavior // The Second International Conference on Advances Mechanical Engineering ICAME 2004. Tunisia: The Tunisian Scientific Society, 2004.

References

1. Zykov V.V., Gladkih A.N., Kolpakova I.M. *Primenenie pozharnyh rezervuarov iz stekloplastika* // Aktual'nye voprosy pozharnoj bezopasnosti. 2021. № 2 (8). S. 54–58. DOI: 10.37657/vniipo.avpb.2021.82.54.008. EDN WXUUOL.
2. *Obzor osnovnyh izmenenij SP 8.13130.2020 «Sistemy protivopozharnoj zashchity. Naruzhnoe protivopozharnoe vodosnabzhenie. Trebovaniya pozharnoj bezopasnosti» v redakcii № 1 / V.V. Zykov [i dr.]* // Aktual'nye voprosy pozharnoj bezopasnosti. 2023. № 4 (18). S. 34–43. DOI: 10.37657/vniipo.avpb.2023.55.92.004. EDN ZSWJMH.
3. Mahov D.V., Kontareva V.Yu. *Raschet pozharnogo zapasa vody i podbor pozharnogo rezervuara* // Nauchnye osnovy sozdaniya i realizacii sovremennyh tekhnologij zdorov'esberezheniya: materialy VIII Mezhdunar. nauch.-prakti. konf., posvyashch. Godu nauki i tekhnologij v Ros. Federacii. Volgograd: Obshchestvo s ogranichennoj otvetstvennost'yu «SFERA», 2021. S. 459–464. EDN QHQSMN.
4. Tarancev A.A., Maruhin P.N., Petrova O.V. *Matematicheskaya model' kombinirovannoj gidravlicheskoj sistemy zashchity rezervuara* // Nauch.-analit. zhurn. «Vestnik S.-Peterb. un-ta GPS MCHS Rossii». 2017. № 4. S. 70–77. EDN YRHNQZ.
5. Andryushkin A.Yu., Afanas'ev E.O., Kadochnikova E.N. *Obespechenie bezopasnosti ekspluatatsii teplovyh setej* // Nauch.-analit. zhurn. «Vestnik S.-Peterb. un-ta GPS MCHS Rossii». 2019. № 4. S. 37–42. EDN VSOFIQ.
6. TRNSYS group, *A Transient System Simulation Program TRNSYS*, Solar Energy Laboratory. Madison: University of Wisconsin, 1994.
7. Kleinbach E.M., Beckman W.A., Klein S.A. *Performance study of one-dimensional models for stratified thermal storage tanks* // Solar Energy. 1993. № 50 (2). P. 155–166.
8. Duffie A., Beckman W.A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. Second ed. New York: Wiley Inter Science, 1991.
9. Zurigat Yu.H., Ghajar A.J., Moretti P.M. *Comparison study of one-dimensional models for stratified thermal storage tanks* // Applied Energy. 1988. № 30. P. 99–111.
10. Alizadeh S. *An experimental and numerical study of thermal stratification in a horizontal cylindrical solar storage tank* // Solar Energy. 1999. № 66 (6). P. 409–421.
11. *Metody i sredstva informacionno-operacionnoj podderzhki teplotekhnicheskikh raschetov v reshenii zadach pozharnoj bezopasnosti: monografiya / A.A. Kuz'min [i dr.]*. SPb.: S.-Peterb. un-t GPS MCHS Rossii, 2023. 196 s. ISBN 978-5-907724-23-5. EDN FBYRNF.
12. Papanicolaou E., Belessiotis V. *Transient natural convection in a cylindrical enclosure at high Rayleigh numbers* // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2002. № 45 (7). P. 1425–1444.
13. Oliveski R.C., Krenzinger A., Vielmo H.A. *Cooling of cylindrical tanks submitted to natural internal convection* // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2003. № 46. P. 2015–2026.
14. *Unsteady numerical simulation of the cooling process of vertical storage tanks under laminar natural convection / I. Rodriguez* // International Journal of Thermal Sciences. 2019. № 48 (4). P. 708–721.
15. Hmouda, C. Bouden, *Etude Parametrique d'un Chauffe-eau Solaire Avec Appoint a` Gaz Integrer Dans le Ballon de Stockage en vue de l'optimisation de la Position du Bru^leur* // 12e`mes Journes Internationales de Thermique JITH, 2005. Tanger Morocco, 2015.
16. Hmouda I., Bouden C. *Parameters identification of a water storage tank fired by a gas heater and modelling of its thermal behavior* // The Second International Conference on Advances Mechanical Engineering ICAME 2004. Tunisia: The Tunisian Scientific Society, 2004.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 21.10.2024; одобрена после рецензирования: 01.11.2024;
принята к публикации: 10.11.2024

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 21.10.2024; approved after review: 01.12.2024;
accepted for publication: 10.11.2024

Информация об авторах:

Крутолапов Александр Сергеевич, профессор кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), доктор технических наук, доцент, e-mail: krutolapov75@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2081-6934>, SPIN-код: 7822-1555

Кузьмин Анатолий Алексеевич, доцент кафедры физико-технических основ обеспечения пожарной безопасности Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат педагогических наук, доцент, e-mail: kaa47@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0297-2984>, SPIN-код: 3604-7853

Романов Николай Николаевич, доцент кафедры физико-технических основ обеспечения пожарной безопасности Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат технических наук, доцент, e-mail: nik57nik@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8254-9424>, SPIN-код: 4828-4313

Information about the authors:

Krutolapov Alexander S., professor of the department of fire, emergency rescue equipment and automotive industry of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), doctor of technical sciences, associate professor, e-mail: krutolapov75@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2081-6934>, SPIN: 7822-1555

Kuzmin Anatoliy A., associate professor of the department of physical and technical fundamentals of fire safety of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), candidate of pedagogical sciences, associate professor, e-mail: kaa47@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0297-2984>, SPIN: 3604-7853

Romanov Nikolay N., associate professor of the department of physical and technical fundamentals of fire safety of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), candidate of technical sciences, associate professor, e-mail: nik57nik@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8254-9424>, SPIN: 4828-4313