

УДК: 614.84:678

DOI 10.48612/ntp/1hfg-hbht-m7ve

## **МЕТОДИКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ХРАНЕНИИ НЕФТЕПРОДУКТОВ В ПОЛИМЕРНЫХ ЭЛАСТИЧНЫХ РЕЗЕРВУАРАХ НА ОСНОВЕ РАСЧЁТА ВРЕМЕНИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ОБОЛОЧКИ И ОБОСНОВАНИЯ ПРОТИВОПОЖАРНЫХ РАЗРЫВОВ**

**Г. Х. САМИГУЛЛИН, А. Е. ЗАХАРОВ**

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России»,  
Российская Федерация, г. Санкт-Петербург  
E-mail: samigullin.gh@yandex.ru, frzakhsach@mail.ru

В статье рассмотрена проблема обеспечения пожарной безопасности при хранении нефтепродуктов в полимерных эластичных резервуарах. Показано, что при групповом размещении ПЭР пожар пролива одного резервуара может привести к тепловому воздействию на соседние резервуары, нагреву их оболочек и последующему распространению пожара.

Предложена методика обеспечения пожарной безопасности при хранении нефтепродуктов в ПЭР, основанная на расчёте времени воспламенения оболочки при тепловом воздействии пожара пролива и обосновании противопожарных разрывов между резервуарами. Методика учитывает параметры пожара пролива, расстояние до соседнего резервуара, теплофизические характеристики оболочки и возможность применения эластомерного защитного слоя, модифицированного астраленами.

В качестве экспериментальной базы использованы результаты термогравиметрических, механических и огневых испытаний исходного и модифицированного материалов. Установлено, что применение защитного слоя на основе эластомера с содержанием 10 % масс. астраленов повышает устойчивость материала к тепловому воздействию и увеличивает время до воспламенения оболочки. Разработанный алгоритм позволяет определять время достижения температуры воспламенения и минимальное безопасное расстояние между резервуарами. Предложенная методика может быть использована при проектировании объектов хранения нефтепродуктов в ПЭР и обосновании мероприятий по предотвращению эскалации пожара.

**Ключевые слова:** полимерный эластичный резервуар; ПЭР; нефтепродукты; пожар пролива; тепловой поток; прогрев оболочки; время воспламенения; противопожарные разрывы; эскалация пожара; защитное покрытие; астралены.

## **METHODOLOGY FOR ENSURING FIRE SAFETY DURING PETROLEUM PRODUCT STORAGE IN POLYMERIC ELASTIC RESERVOIRS BASED ON CALCULATING SHELL IGNITION TIME AND JUSTIFYING FIRE SEPARATION DISTANCES**

**G. Kh. SAMIGULLIN, A. E. ZAKHAROV**

Saint Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia,  
Russian Federation, Saint Petersburg,  
E-mail: samigullin.gh@yandex.ru, frzakhsach@mail.ru

The article addresses the problem of ensuring fire safety during the storage of petroleum products in polymeric elastic reservoirs (PERs). It is shown that, when PERs are arranged in groups, a pool fire resulting from the failure of one reservoir may cause thermal exposure to adjacent reservoirs, heating of their shells, and subsequent fire spread.

A fire safety methodology for petroleum product storage in PERs is proposed. The methodology is based on calculating the shell ignition time under thermal exposure from a pool fire and substantiating fire separation distances between reservoirs. The method takes into account pool fire parameters, the distance to an adjacent reservoir, the thermophysical properties of the shell, and the possibility of using an elastomeric protective layer modified with astralenes.

The experimental basis of the study includes the results of thermogravimetric, mechanical, and fire tests of both unmodified and modified materials. It was found that the application of an elastomeric protective layer containing 10 wt.% astralenes increases the material's resistance to thermal exposure and extends the

time to shell ignition. The developed calculation algorithm makes it possible to determine the time required to reach the shell ignition temperature and to establish the minimum safe distance between reservoirs. The proposed methodology can be applied in the design of petroleum product storage facilities using PERs and in the justification of measures aimed at preventing fire escalation.

**Keywords:** flexible polymer reservoir; PER; petroleum products; pool fire; heat flux; shell heating; ignition time; fire separation distances; fire escalation; protective coating; astralenes.

### Введение

Полимерные эластичные резервуары применяются для хранения и транспортирования нефтепродуктов благодаря малой массе, мобильности, технологичности монтажа, меньшей себестоимости изготовления и эксплуатации, а также устойчивости к воздействию коррозионно-активных сред. Такие резервуары могут использоваться при создании мобильных резервуарных парков, временных складов и объектов оперативного хранения моторных топлив [1].

Вместе с тем применение полимерных эластичных резервуаров (далее – ПЭР) сопровождается рядом пожарно-технических ограничений. В отличие от традиционных стальных резервуаров, оболочки ПЭР изготавливаются из полимерных материалов, которые при тепловом воздействии пожара пролива способны нагреваться, терять прочность, воспламеняться и приводить к разгерметизации резервуара [2, 3]. При групповом размещении ПЭР это создаёт опасность распространения пожара на соседние резервуары и последующего развития аварийной ситуации [3].

Наиболее опасным для рассматриваемых условий является сценарий пожара пролива [3], при котором после разгерметизации одного резервуара образуется горящий пролив нефтепродукта, создающий лучистое тепловое воздействие на соседние ПЭР. Если расстояние между резервуарами недостаточно, оболочка соседнего резервуара может за расчётное время достигнуть температуры воспламенения. В этом случае локальный пожар одного резервуара может перейти в сценарий с вовлечением соседних резервуаров, создавая возможность эскалации пожара на территории нефтебазы.

Существующие расчётные подходы позволяют определять параметры пожара пролива, оценивать тепловое излучение пламени и принимать решения по обеспечению пожарной безопасности объектов хранения нефтепродуктов [4, 5]. Однако применительно к ПЭР требуется дополнительный учёт особенностей полимерной оболочки: её теплофизических характеристик, малой тепловой инерции, температуры воспламенения, изменения свойств при нагреве, а также возможности применения модифицированного защитного слоя.

В работе рассматривается сценарий пожара пролива при разгерметизации одного ПЭР и тепловом воздействии на соседний резервуар. В качестве основного опасного фактора пожара учитывается лучистый тепловой поток.

В связи с этим актуальной является разработка методики, позволяющей связать параметры пожара пролива, свойства оболочки ПЭР и время её воспламенения с обоснованием противопожарных разрывов между резервуарами. Такая методика должна обеспечивать выбор инженерных решений по предотвращению эскалации пожара, включая увеличение расстояния между резервуарами и применение защитных покрытий.

Цель статьи – разработка методики обеспечения пожарной безопасности при хранении нефтепродуктов в ПЭР, основанной на расчёте времени воспламенения оболочки при тепловом воздействии пожара пролива и обосновании противопожарных разрывов между резервуарами.

Для достижения поставленной цели выполнены: обоснование расчётного сценария пожара пролива, определение экспериментальных характеристик материалов, разработка алгоритма расчёта времени воспламенения оболочки ПЭР и методики определения минимального безопасного расстояния между резервуарами.

Научная новизна работы заключается в разработке расчётной методики, связывающей параметры пожара пролива нефтепродукта, теплофизические характеристики оболочки ПЭР, наличие модифицированного эластомерного покрытия и время достижения температуры воспламенения с определением минимального безопасного расстояния между резервуарами.

### Материалы и методы исследования *Расчётный сценарий пожара пролива*

В качестве расчётного сценария рассматривается неблагоприятная аварийная ситуация, связанная с разгерметизацией одного полимерного эластичного резервуара, образованием пролива нефтепродукта и последующим воспламенением пролива [3]. В расчёте принимается вариант развития аварии, при

котором пожар пролива формирует лучистое тепловое воздействие на соседний ПЭР и может привести к прогреву его оболочки до температуры воспламенения. Такой сценарий принят как определяющий для оценки возможности вовлечения соседнего ПЭР в пожар.

Расчётная последовательность развития аварийной ситуации принимается следующей: разгерметизация одного ПЭР – образование пролива нефтепродукта – воспламенение пролива – тепловое воздействие на соседний

резервуар – прогрев полимерной оболочки – достижение температуры воспламенения оболочки – возможное вовлечение соседнего ПЭР в пожар. В рамках настоящей статьи под эскаляцией пожара понимается переход от локального пожара пролива одного резервуара к сценарию с вовлечением соседних резервуаров под действием теплового излучения [3].

Расчётная схема теплового воздействия пожара пролива на оболочку соседнего ПЭР представлена на рис. 1.

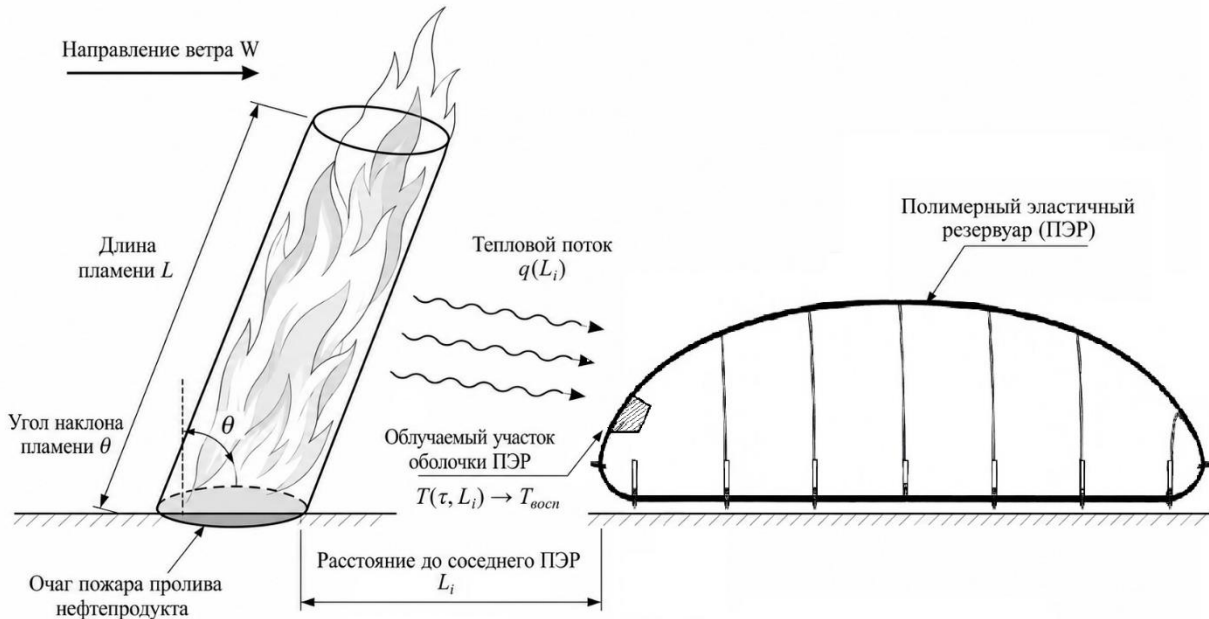


Рис. 1. Расчётная схема теплового воздействия пожара пролива на оболочку соседнего ПЭР

Для выбора наиболее неблагоприятного варианта предварительно оценивалось тепловое воздействие пожара пролива бензина [3, 4]. В качестве расчётного сценария рассматривается пожар пролива нефтепродукта, приводящий к тепловому воздействию на оболочку соседнего ПЭР. Целью расчёта является определение времени достижения температуры воспламенения оболочки в зависимости от расстояния между резервуарами и свойств защитного покрытия. Поэтому пожар пролива бензина принят в качестве неблагоприятного расчётного сценария для дальнейшего определения теплового воздействия на оболочку соседнего ПЭР.

В рамках рассматриваемого сценария основным опасным воздействием на соседний резервуар является лучистый тепловой поток от пламени пожара пролива [4, 5]. Его воздействие приводит к повышению температуры наружной поверхности оболочки ПЭР, последующему прогреву материала и возможному достижению температуры воспламенения. При этом опасность определяется не только величиной теплового потока, но и временем его

действия, теплофизическими свойствами оболочки, наличием защитного покрытия и расстоянием между резервуарами.

Критерием безопасности принимается условие, при котором за расчётное время теплового воздействия оболочка соседнего ПЭР не достигает температуры воспламенения. Если данное условие выполняется, расстояние между резервуарами рассматривается как достаточное для предотвращения вовлечения в пожар соседнего ПЭР. Если температура воспламенения достигается, возникает возможность эскаляции пожара, что требует увеличения противопожарного разрыва, применения модифицированного защитного покрытия либо совместного использования указанных мер.

Таким образом, расчётный сценарий пожара пролива является исходной основой для последующего построения методики. Он позволяет перейти от общей оценки пожарной опасности ПЭР к количественному определению теплового потока, времени воспламенения оболочки и минимального безопасного расстояния между резервуарами.

### **Экспериментальные характеристики материалов, используемые в расчёте**

В качестве исходных данных для расчётной методики использованы экспериментально определённые характеристики материала оболочки ПЭР и модифицированного эластомерного защитного слоя. Указанные характеристики необходимы для расчёта прогрева оболочки, определения времени достижения температуры воспламенения и обоснования минимального безопасного расстояния между резервуарами.

В качестве исходного варианта рассматривалась оболочка ПЭР на основе термопластичного полиуретана (ТПУ) [2, 6]. В качестве модифицированного варианта рассматривалась оболочка с защитным слоем на основе эластомера TIP TOP Solution MTR-NF REMA (далее эластомер REMA), модифицированного астраленами [9–11]. Модифицированный слой использовался для оценки влияния защитного покрытия на процесс прогрева оболочки и на время достижения температуры воспламенения.

В расчёте учитывались термические, механические и пожарно-технические характеристики материалов: температура начала термического разложения, остаточная масса после нагрева, предел прочности, модуль Юнга, время до воспламенения и температуру в момент воспламенения или окончания испытания.

Наиболее выраженный эффект в исследованном диапазоне концентраций получен при содержании астраленов 10 % масс. [9, 10]. При данной концентрации остаточная масса материала при 800 °С увеличилась с 3,3 до 29,7 %, предел прочности возрос в 2,8 раза, а модуль Юнга – в 3,2 раза [9]. Указанный состав принят в качестве модифицированного варианта для дальнейших расчётов.

Экспериментальные характеристики модифицированного эластомера REMA были получены в ходе проведённых термогравиметрических, механических и огневых испытаний [9-11]. Сводные экспериментальные характеристики исходной оболочки и модифицированного эластомерного слоя, используемые в расчётной методике, представлены в табл. 1.

**Таблица 1. Экспериментальные характеристики материалов, используемые в расчётной методике**

Показатель	Исходная оболочка ПЭР на основе ТПУ	Модельный эластомер REMA + 10 % масс. астраленов
Температура начала активной термодеструкции, °С	285,7	336
Температура максимальной скорости потери массы, °С	293,8 / 411,0	400
Время до воспламенения при огневом воздействии, с	210	не менее 420
Температура в момент воспламенения / окончания испытания, °С	240	более 285

Огневые испытания подтвердили различие поведения исходного и модифицированного вариантов при тепловом воздействии. Исходный образец ТПУ воспламенился через 210 с при температуре около 240 °С. Образец с покрытием на основе эластомера REMA, содержащего 10 % масс. астраленов, в пределах эксперимента не воспламенился: испытание было остановлено на 420-й секунде при температуре более 285°С [11].

Полученные характеристики используются в расчётной методике для задания теплофизических параметров оболочки и защитного слоя, определения критических условий вос-

пламенения и сопоставления исходного и модифицированного вариантов ПЭР.

### **Алгоритм расчёта времени воспламенения оболочки**

Для определения условий возможного вовлечения соседнего ПЭР в пожар разработан расчётный алгоритм оценки времени достижения температуры воспламенения полимерной оболочки при тепловом воздействии пожара пролива [12]. Алгоритм позволяет рассматривать два варианта: исходную оболочку ПЭР без дополнительной защиты и оболочку с модифицированным эластомерным защитным покрытием.

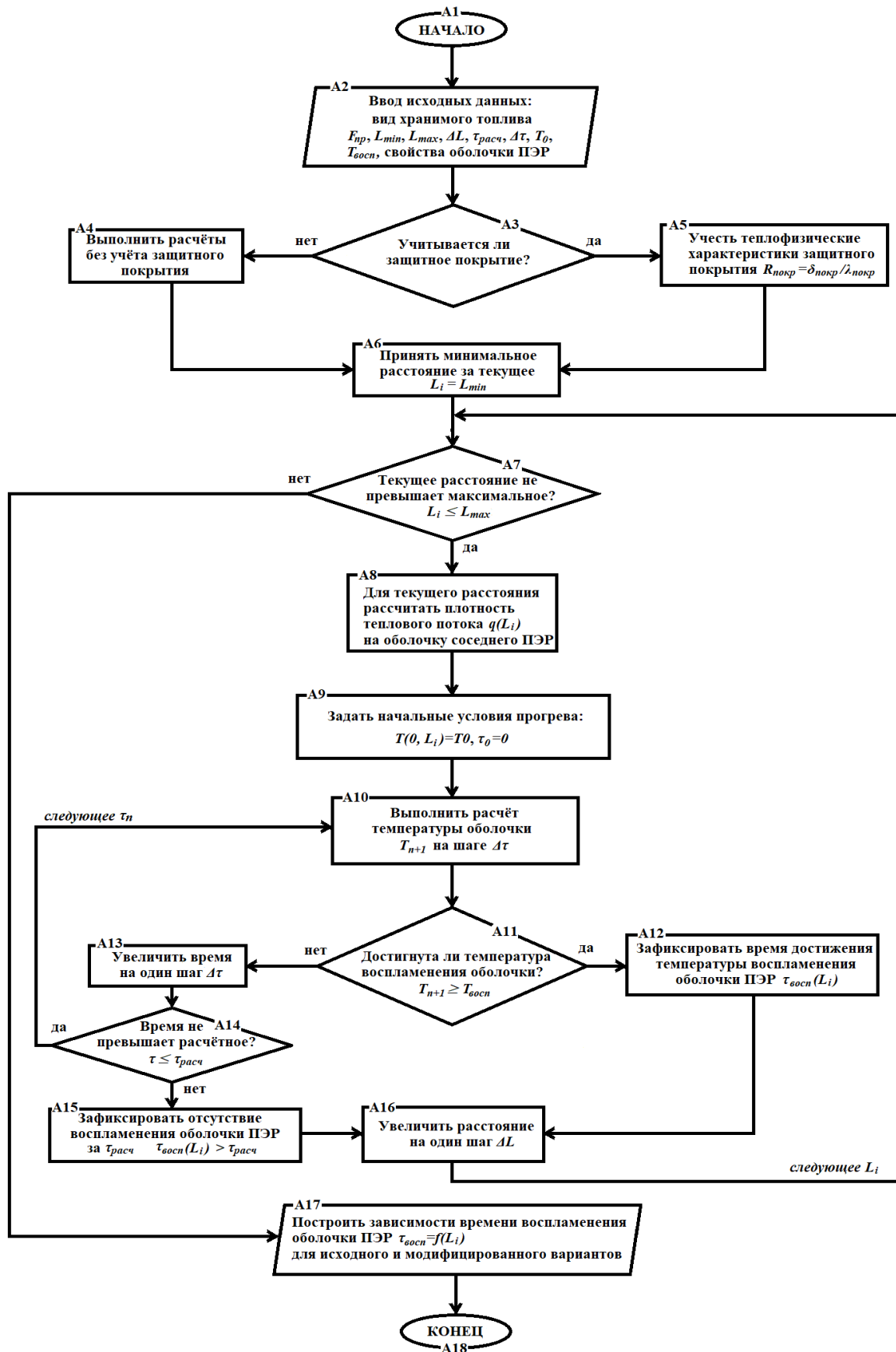


Рис. 2. Расчётный алгоритм определения времени воспламенения оболочки ПЭР при тепловом воздействии пожара пролива

Структура расчётного алгоритма представлена на рис. 2. Алгоритм включает пошаговый расчёт по расстоянию  $L_i$  и пошаговый расчёт по времени  $\tau_n$ . Для каждого значения расстояния рассчитывается плотность теплового потока  $q(L_i)$ , после чего выполняется расчёт температуры оболочки до достижения температуры воспламенения либо до окончания расчётного времени  $\tau_{расч}$ .

На рис. 2 в блоках А1–А2 задаются исходные данные: вид топлива, площадь пролива  $F_{пр}$ , диапазон расстояний  $L_{min}–L_{max}$ , шаг по расстоянию  $\Delta L$ , расчётная продолжительность теплового воздействия  $\tau_{расч}$ , шаг по времени  $\Delta t$ , начальная температура  $T_0$ , температура воспламенения  $T_{восп}$  и свойства оболочки ПЭР. В блоках А3–А5 выбирается расчётный вариант: без защитного покрытия или с учётом модифицированного защитного слоя. В блоках А6–А17 реализуется расчёт для заданного диапазона расстояний и формируется зависимость  $T_{восп}=f(L_i)$ . Тепловое сопротивление защитного покрытия определяется по выражению:

$$R_{покр} = \frac{\delta_{покр}}{\lambda_{покр}}, \quad (1)$$

где  $R_{покр}$  – тепловое сопротивление покрытия,  $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ ;  $\delta_{покр}$  – толщина покрытия, м;  $\lambda_{покр}$  – коэффициент теплопроводности покрытия,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

На следующем этапе рассчитывается плотность лучистого теплового потока от пожара пролива, воздействующего на оболочку соседнего резервуара [4, 5, 12]:

$$q(L_i) = E_f \cdot \psi(L_i) \cdot \varphi, \quad (2)$$

где  $q(L_i)$  – плотность лучистого теплового потока на расстоянии  $L_i$ ,  $\text{кВт}/\text{м}^2$ ;  $E_f$  – среднеповерхностная интенсивность теплового излучения пламени,  $\text{кВт}/\text{м}^2$ ;  $\psi(L_i)$  – угловой коэффициент облучённости оболочки ПЭР;  $\varphi$  – коэффициент пропускания атмосферы [4, 5, 12].

Для учёта различий между исходной оболочкой и модифицированным защитным покрытием в расчёт вводится эффективная степень черноты облучаемой поверхности. В исходном варианте она принимается для поверхности полимерной оболочки, в модифицированном варианте – для наружной поверхности защитного покрытия.

На последнем этапе определяется прогрев оболочки во времени [12]. Для этого используется нестационарный тепловой баланс, учитывающий поступающий тепловой поток, теплоотдачу от наружной поверхности в окружающую среду и теплоотвод внутрь резервуара к нефтепродукту. Для инженерной оценки

прогрева оболочки используется сосредоточенная тепловая модель [12], в которой температура рассматриваемого участка оболочки принимается усреднённой по толщине. Такое допущение позволяет связать поступающий тепловой поток, теплоёмкость материала, толщину оболочки и теплоотвод к окружающей среде и нефтепродукту:

$$c \cdot \rho \cdot \delta \cdot \frac{dT}{d\tau} = q_{воспр}(L_i) - \left( \alpha_k + \frac{\lambda_f}{\delta_f} \right) \cdot (T - T_0), \quad (3)$$

где  $c$  – теплоёмкость материала оболочки,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  $\rho$  – плотность материала оболочки,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\delta$  – толщина оболочки, м;  $T$  – температура оболочки,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\tau$  – время теплового воздействия, с;  $q_{воспр}(L_i)$  – тепловой поток, воспринимаемый оболочкой на расстоянии  $L_i$ ,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;  $\alpha_k$  – коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности в окружающую среду,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $\lambda_f$  – коэффициент теплопроводности нефтепродукта,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;  $\delta_f$  – высота заполнения резервуара нефтепродуктом, м;  $T_0$  – температура окружающей среды,  $^{\circ}\text{C}$ .

Для численной реализации расчёта уравнение записывается в пошаговой форме:

$$T_{n+1} = T_n + \frac{\Delta\tau}{c \cdot \rho \cdot \delta} \cdot \left[ q_{воспр}(L_i) - \left( \alpha_k + \frac{\lambda_f}{\delta_f} \right) \cdot (T_n - T_0) \right], \quad (4)$$

где  $T_n$  – температура оболочки на текущем временном шаге,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{n+1}$  – температура оболочки на следующем временном шаге,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\Delta\tau$  – шаг расчёта по времени, с.

На пятом этапе для каждого расчётного расстояния выполняется проверка условия достижения температуры воспламенения оболочки. Если температура оболочки достигает или превышает температуру воспламенения, фиксируется соответствующее время:

$$\tau_{восп}(L_i) = \min\{\tau_n: T(\tau_n, L_i) \geq T_{восп}\}, \quad (5)$$

где  $\tau_{восп}(L_i)$  – время достижения температуры воспламенения оболочки на расстоянии  $L_i$ , с;  $T_{восп}$  – температура воспламенения материала оболочки,  $^{\circ}\text{C}$ .

Если за расчётную продолжительность теплового воздействия температура оболочки не достигает температуры воспламенения, принимается условие:

$$\tau_{восп}(L_i) > \tau_{расч} \quad (6)$$

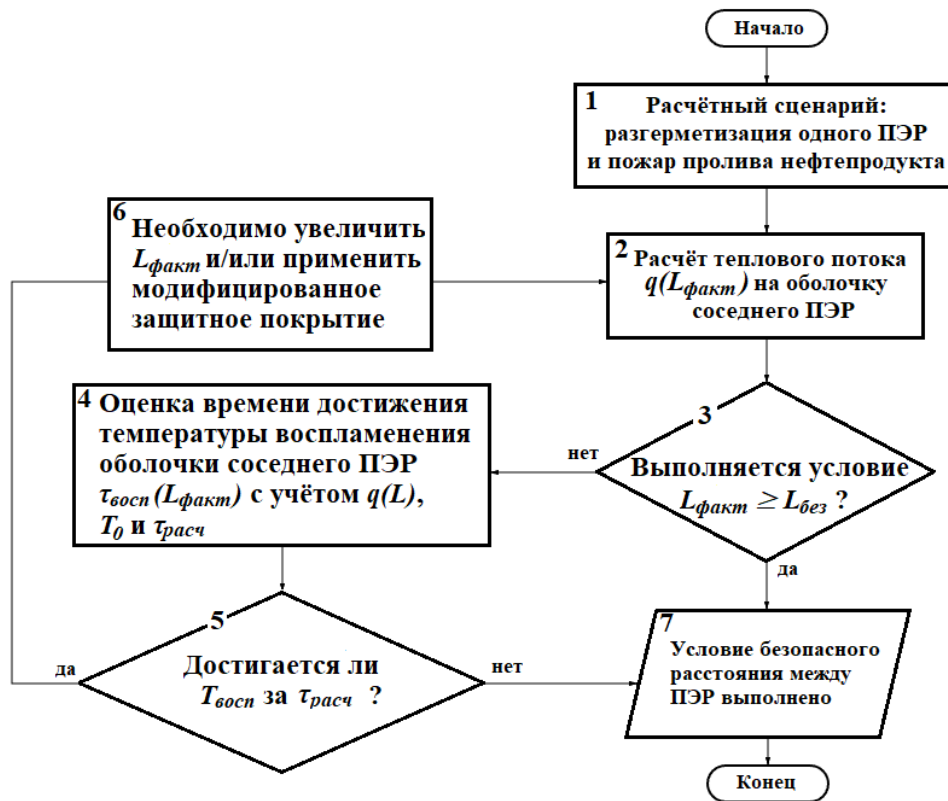
где  $\tau_{расч}$  – расчётная продолжительность теплового воздействия, с.

Таким образом, результатом работы алгоритма является зависимость времени достижения температуры воспламенения оболочки от расстояния до очага пожара пролива. Эта зависимость используется далее для оценки достаточности фактического расстояния между

резервуарами и последующего обоснования противопожарных разрывов.

**Методика обоснования противопожарных разрывов**

Разработанный алгоритм расчёта времени воспламенения оболочки ПЭР используется как расчётная основа методики обоснования противопожарных разрывов между резервуарами [12]. Методика предназначена для оценки достаточности фактического расстояния между ПЭР при пожаре пролива и выбора инженерных мер, направленных на предотвращение вовлечения соседних резервуаров в пожар. Общая схема методики обоснования противопожарных разрывов и выбора мер защиты представлена на рис. 3.



**Рис. 3.** Методика обоснования противопожарных разрывов и выбора мер защиты при хранении моторных топлив в ПЭР [12]

На рис. 3 блок 1 задаёт расчётный сценарий пожара пролива. В блоке 2 определяется тепловой поток на оболочку соседнего ПЭР. В блоке 3 проверяется выполнение условия  $L_{факт} \geq L_{без}$ . Если условие выполняется, методика завершается выводом о достаточности расстояния между резервуарами. Если условие не выполняется, в блоке 4 проводится оценка времени достижения температуры воспламенения

оболочки соседнего ПЭР  $\tau_{восп}(L_{факт})$  с учётом  $q(L)$ ,  $T_0$  и  $\tau_{расч}$ .

В блоке 5 проверяется достижение температуры воспламенения за расчётное время. При положительном результате в блоке 6 принимается решение об увеличении расстояния между ПЭР и/или применении модифицированного защитного покрытия, после чего расчёт повторяется.

На первом этапе задаётся расчётный сценарий аварии: разгерметизация одного ПЭР, образование пролива нефтепродукта, воспламенение пролива и тепловое воздействие на соседний резервуар. В качестве основного опасного фактора рассматривается лучистый тепловой поток от пламени пожара пролива.

На втором этапе задаются исходные данные для расчёта: вид нефтепродукта, площадь пролива, расстояние между резервуарами, температура окружающей среды, продолжительность теплового воздействия, свойства материала оболочки, температура воспламенения, а также наличие или отсутствие модифицированного защитного покрытия. Для варианта с защитным покрытием дополнительно учитываются его толщина, коэффициент теплопроводности и эффективная степень черноты наружной поверхности.

На третьем этапе для каждого рассматриваемого расстояния определяется плотность теплового потока, воздействующего на оболочку соседнего ПЭР. Далее рассчитывается изменение температуры оболочки во времени и определяется момент достижения температуры воспламенения. В результате для каждого расстояния  $L_i$  формируется значение времени воспламенения  $\tau_{восп}(L_i)$ .

Критерием достаточности расстояния принимается условие, при котором время достижения температуры воспламенения оболочки превышает расчётную продолжительность теплового воздействия:

$$\tau_{восп}(L_{факт}) > \tau_{расч} \quad (7)$$

где  $\tau_{восп}(L_{факт})$  – время достижения температуры воспламенения оболочки при фактическом расстоянии между резервуарами, с;  
 $L_{факт}$  – фактическое расстояние между очагом пожара пролива и соседним ПЭР, м;  
 $\tau_{расч}$  – расчётная продолжительность теплового воздействия, с.

Если данное условие выполняется, фактическое расстояние между резервуарами считается достаточным для предотвращения вовлечения соседнего ПЭР в пожар. Если условие не выполняется, то существует риск достижения оболочки температуры воспламенения в пределах расчётного времени воздействия, что указывает на возможность эскалации пожара.

Минимальное безопасное расстояние определяется как наименьшее из рассматриваемых расстояний [12], при котором температура оболочки не достигает температуры воспламенения за расчётное время теплового воздействия:

$$L_{без} = \min\{L_i: \tau_{восп}(L_i) > \tau_{расч}\}, \quad (8)$$

где  $L_{без}$  – минимальное безопасное расстояние между резервуарами, м;  $L_i$  – рассматриваемое расстояние между очагом пожара пролива и соседним ПЭР, м;  $\tau_{восп}(L_i)$  – время достижения температуры воспламенения оболочки при расстоянии  $L_i$ , с.

Проверка фактического размещения резервуаров выполняется по условию:

$$L_{факт} \geq L_{без} \quad (9)$$

Если  $L_{факт} \geq L_{без}$ , размещение резервуаров принимается допустимым по условию предотвращения воспламенения оболочки соседнего ПЭР. Если  $L_{факт} < L_{без}$ , расстояние между резервуарами считается недостаточным, и требуется принятие дополнительных мер пожарной безопасности.

В качестве таких мер методика предусматривает два основных варианта. Первый вариант – увеличение противопожарного разрыва между резервуарами до значения, при котором выполняется условие безопасности. Второй вариант – применение модифицированного защитного покрытия, повышающего устойчивость оболочки к тепловому воздействию и увеличивающего время до достижения температуры воспламенения. В практических условиях возможно совместное применение указанных мер: корректировка расстояния между ПЭР и использование защитного покрытия на основе эластомерного материала, модифицированного астраленами.

Расчёт выполняется отдельно для исходной оболочки и для оболочки с модифицированным защитным слоем. Сопоставление двух вариантов позволяет определить, как изменение пожарно-технических и теплофизических характеристик материала влияет на время воспламенения и требуемую величину противопожарного разрыва. За счёт этого методика позволяет перейти от лабораторно установленных характеристик материала к инженерному решению по безопасному размещению резервуаров.

Таким образом, методика обоснования противопожарных разрывов между ПЭР основана на последовательной связи: пожар пролива – тепловой поток – прогрев оболочки – время воспламенения – безопасное расстояние – выбор меры защиты. Такой подход позволяет оценивать условия предотвращения эскалации пожара при групповом размещении ПЭР и использовать расчётные результаты при проектировании объектов хранения нефтепродуктов. Для демонстрации работоспособности предложенной методики выполнен расчёт времени

воспламенения оболочки ПЭР для сценария пожара пролива бензина площадью 1000 м<sup>2</sup> при температуре окружающей среды 20 °С [3, 4, 12]. Расчёт выполнен в диапазоне расстояний от 5 до 50 м с шагом 5 м для исходного и модифицированного вариантов оболочки.

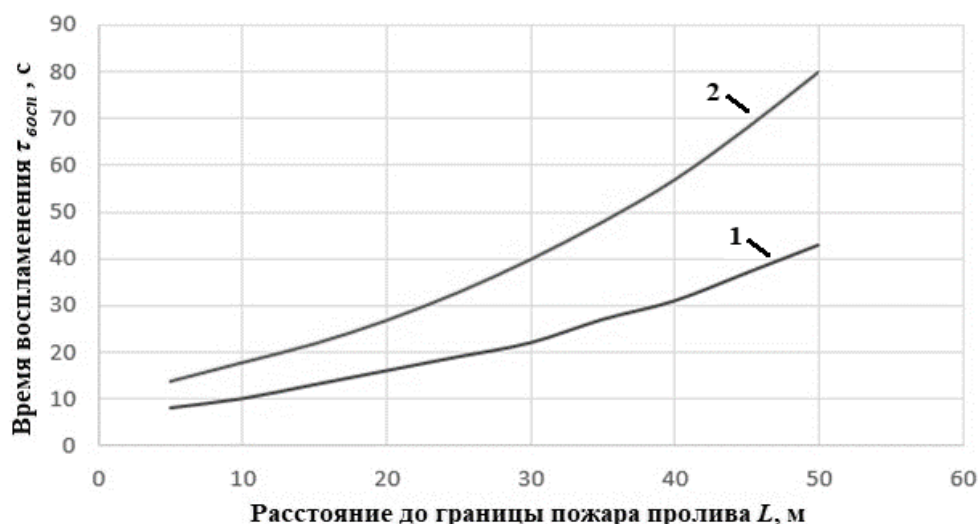
**Результаты и обсуждение.**  
**Сравнение исходного**  
**и модифицированного варианта**

Сравнение исходного и модифицированного варианта выполнялось для оценки

влияния защитного эластомерного слоя, модифицированного астраленами, на устойчивость оболочки ПЭР к тепловому воздействию пожара пролива. В качестве исходного варианта рассматривалась оболочка ПЭР на основе ТПУ без дополнительной защиты. В качестве модифицированного варианта рассматривалась оболочка с нанесённым защитным слоем на основе эластомера REMA, содержащего 10 % масс. астраленов.

**Таблица 2. Результаты расчёта времени воспламенения оболочки ПЭР при различных расстояниях от границы пожара пролива**

<b>L</b> Расстояние до границы пожара пролива, м.	<b>q</b> Тепловой поток, кВт/м <sup>2</sup>	<b>τ<sub>восп</sub></b> (без защиты), Исходный, с.	<b>τ<sub>восп</sub></b> (с защитой), Модифицированный, с.
5,0	96,8	8,0	14,0
10,0	75,9	10,0	18,0
15,0	61,5	13,0	22,0
20,0	50,7	16,0	27,0
25,0	42,3	19,0	33,0
30,0	35,7	22,0	40,0
35,0	30,3	27,0	48,0
40,0	26,0	31,0	57,0
45,0	22,5	37,0	68,0
50,0	19,6	43,0	80,0



**Рис. 4.** Зависимость времени воспламенения оболочки ПЭР от расстояния до границы пожара пролива: линия 1 – исходная оболочка, линия 2 – оболочка с модифицированным защитным покрытием

Полученные расчётные данные позволяют оценить влияние расстояния между резервуарами и применения модифицированного защитного покрытия на время достижения температуры воспламенения оболочки ПЭР.

Расчёт выполнен для сценария пожара пролива бензина площадью 1000 м<sup>2</sup> при температуре окружающей среды 20 °С. Диапазон расстояний от границы пролива до соседнего резервуара составил от 5 до 50 м с шагом 5 м.

Результаты расчёта представлены в табл. 2 и на рис. 4. Установлено, что с увеличением расстояния от очага пожара плотность падающего теплового потока закономерно снижается с 96,8 до 19,6 кВт/м<sup>2</sup>. Одновременно наблюдается увеличение времени достижения температуры воспламенения оболочки как для исходного варианта, так и для варианта с защитным покрытием.

Для исходной оболочки время воспламенения увеличивается с 8 до 43 с при изменении расстояния от 5 до 50 м. Для модифицированного варианта аналогичный показатель возрастает с 14 до 80 с. Таким образом, применение защитного покрытия обеспечивает увеличение времени воспламенения в 1,75-1,9 раза во всём рассматриваемом диапазоне расстояний.

Анализ полученных зависимостей показывает, что по мере увеличения расстояния между резервуарами абсолютный выигрыш по времени воспламенения возрастает. Если на расстоянии 5 м дополнительный резерв времени составляет 6 с, то на расстоянии 50 м он достигает 37 с. Это связано со снижением плотности теплового потока и более выраженным влиянием теплоизоляционных свойств защитного слоя на процесс прогрева оболочки.

Представленные зависимости могут использоваться для определения минимального безопасного расстояния между резервуарами по условию  $\tau_{восп}(L_i) > \tau_{расч}$ . При заданной продолжительности теплового воздействия значение  $L_{без}$  определяется как минимальное расстояние, при котором температура оболочки не достигает температуры воспламенения в течение расчётного времени.

При  $\tau_{расч}=60$  с для исходной оболочки минимальное безопасное расстояние в рассмотренном диапазоне 5–50 м не достигается, поскольку даже при  $L=50$  м время воспламенения составляет  $\tau_{восп}=43$  с, что меньше расчётной продолжительности теплового воздействия. Для модифицированного варианта условие  $\tau_{восп} > \tau_{расч}$  выполняется при расстоянии не менее 45 м: при  $L=40$  м  $\tau_{восп}=57$  с, а при  $L=45$  м  $\tau_{восп}=68$  с. Следовательно, для заданных исходных условий минимальное безопасное расстояние для оболочки с модифицированным защитным покрытием составляет  $L_{без}=45$  м.

Для исходного варианта требуется либо увеличение расстояния более 50 м, либо применение дополнительных мер защиты, поскольку в заданном диапазоне расстояний условие безопасности не выполняется.

Полученные результаты подтверждают возможность использования расчётной зависимости  $\tau_{восп}=f(L)$ , получаемой в соответствии с алгоритмом, представленным на рис. 2 [12], для

обоснования минимально допустимых расстояний между резервуарами. При заданной продолжительности теплового воздействия можно определить расстояние, при котором температура оболочки не достигает температуры воспламенения, либо оценить необходимость применения модифицированного защитного покрытия для предотвращения эскалации пожара.

При одинаковом тепловом воздействии от пожара пролива исходная оболочка быстрее достигает критического состояния, тогда как защитный слой замедляет прогрев основной полимерной оболочки. Это связано с дополнительным тепловым сопротивлением покрытия, изменением излучательных свойств поверхности и образованием углеродистого остатка, выполняющего барьерную функцию [7–10].

Использование указанных зависимостей в рамках методики, представленной на рис. 3, позволяет определять безопасные расстояния между резервуарами и оценивать эффективность применения защитного покрытия на стадии проектирования.

Таким образом, сопоставление исходного и модифицированного варианта показывает, что применение защитного слоя с астраленами повышает устойчивость оболочки ПЭР к тепловому воздействию пожара пролива [9–11], увеличивает время до воспламенения оболочки и создаёт расчётное основание для обоснования безопасных расстояний между резервуарами.

### Заключение

В результате исследования разработана методика обеспечения пожарной безопасности при хранении нефтепродуктов в полимерных эластичных резервуарах, основанная на последовательной оценке теплового воздействия пожара пролива, прогрева оболочки, времени достижения температуры воспламенения и минимального безопасного расстояния между резервуарами. В качестве критерия безопасности принято условие, при котором время достижения температуры воспламенения оболочки соседнего ПЭР превышает расчётную продолжительность теплового воздействия.

Показано, что определяющим фактором возможной эскалации пожара при групповом размещении ПЭР является лучистый тепловой поток от пожара пролива, вызывающий прогрев полимерной оболочки соседнего резервуара. Использование расчётной зависимости  $\tau_{восп} = f(L)$  позволяет оценивать достаточность фактического расстояния между резервуарами и определять необходимость дополнительных мер защиты.

Установлено, что применение эластомерного защитного слоя REMA, модифи-

цированного 10 % масс. астраленов, повышает устойчивость оболочки ПЭР к тепловому воздействию и увеличивает время до воспламенения по сравнению с исходным материалом [9–11]. Полученные экспериментальные характеристики использованы в расчётном алгоритме, позволяющем перейти от лабораторных данных к инженерному обоснованию противопожарных разрывов. Так, при  $\tau_{расч}=60$  с для рассмотренных исходных условий минимальное безопасное расстояние для оболочки с модифицированным защитным покрытием сос-

тавило  $L_{без}=45$  м, тогда как для исходной оболочки в диапазоне 5–50 м условие безопасности не выполняется.

Полученные результаты могут использоваться при проектировании объектов хранения нефтепродуктов, выборе компоновки резервуарного парка и обосновании применения модифицированных защитных покрытий в качестве технического решения по предотвращению эскалации пожара при групповом размещении ПЭР.

### Список литературы

1. Барышев И. Г. Полимерные эластичные резервуары – опыт применения // Экспозиция Нефть Газ. 2013. № 7 (32). С. 86–89.

2. Нестеров С. В., Бакирова И. Н., Самуилов Я. Д. Термическая и термоокислительная деструкция полиуретанов: механизмы протекания, факторы влияния и основные методы повышения термической стабильности. Обзор по материалам отечественных и зарубежных публикаций // Вестник Казанского технологического университета. 2011. № 14. С. 10–23.

3. Самигуллин Г. Х., Захаров А. Е. Оценка возможности эскалации пожара при хранении моторных топлив в полимерных эластичных резервуарах // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. 2024. № 1. С. 1–12.

4. Wang W., Tao G., Zhang L. Comparative and analysis study of pool fire radiant heat models under different view factor calculations. *Emergency Management Science and Technology*, 2024, vol. 4, article e003. DOI: 10.48130/emst-0024-0005.

5. Modest M. F. Radiative Heat Transfer. 3rd ed. Oxford: Academic Press, 2013. 904 p.

6. Ширяев Е. В., Шабунин С. А., Швырков С. А. Оценка пожарной опасности эластичных резервуаров на основе термогравиметрического анализа // Пожаровзрывобезопасность. 2024. Т. 33, № 3. С. 37–46.

7. Flame retarding performance of elastic nanocomposites: A review / P. S. Khobragade, D. P. Hansora, J. B. Naik [et al.]. *Polymer Degradation and Stability*, 2016, vol. 130, pp. 194–244. DOI: 10.1016/j.polyimdegradstab.2016.06.001.

8. Nanocarbon-Based Flame Retardant Polymer Nanocomposites / Y. Yang, J. L. Díaz Palencia, N. Wang [et al.]. *Molecules*, 2021, vol. 26, issue 15, article 4670. DOI: 10.3390/molecules26154670.

9. Самигуллин Г. Х., Захаров А. Е. Снижение пожарной опасности при хранении

нефтепродуктов в полимерных эластичных резервуарах, модифицированных нанокремнеземными компонентами // Проблемы управления рисками в техносфере. 2023. № 2 (66). С. 148–158.

10. Захаров А. Е. Термогравиметрический анализ наномодифицированного материала для внешнего огнезащитного слоя оболочек полимерных эластичных резервуаров // Современные проблемы гражданской защиты. 2025. № 4 (57). С. 19–28.

11. Самигуллин Г. Х., Захаров А. Е., Гончаров Г. И. Повышение термостойкости внешнего слоя полимерных эластичных резервуаров путём нанесения модифицированных нанокремнеземных компонентов // Актуальные проблемы пожарной безопасности: материалы XXXVI Международной научно-практической конференции, посвященной 375-й годовщине образования пожарной охраны России. М.: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2024. С. 511–516.

12. Захаров А. Е. Алгоритм расчёта критического времени прогрева оболочки полимерного эластичного резервуара при пожаре пролива с учётом огнезащиты // Естественные науки и пожаробезопасность: проблемы и перспективы исследований: сборник материалов III Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 60-летию Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России. Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2026. С. 514–519.

### References

1. Baryshev I. G. Polimernye elastichnye rezervuary – opyt primeneniya [Polymeric elastic reservoirs: application experience]. *Ekspozitsiya Neft Gaz*, 2013, no. 7(32), pp. 86–89.

2. Nesterov S. V., Bakirova I. N., Samuilov Ya. D. Termicheskaya i termookislitel'naya destruktziya poliuretanov: mekhanizmy protekaniya, faktory vliyaniya i osnovnye metody povysheniya termicheskoy stabilnosti. *Obzor po*

materialam otechestvennykh i zarubezhnykh publikatsiy [Thermal and thermo-oxidative degradation of polyurethanes: mechanisms, influencing factors and main methods for improving thermal stability. A review of Russian and foreign publications]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2011, issue 14, pp. 10–23.

3. Samigullin G. Kh., Zakharov A. E. Otsenka vozmozhnosti eskalatsii pozhara pri khraneniі motornykh topliv v polimernykh elastichnykh rezervuarakh [Assessment of the possibility of fire escalation during motor fuel storage in polymeric elastic reservoirs]. *Vestnik Sankt-Peterburskogo universiteta GPS MChS Rossii*, 2024, issue 1, pp. 1–12. DOI: 10.61260/2218-13X-2024-1-1-12.

4. Wang W., Tao G., Zhang L. Comparative and analysis study of pool fire radiant heat models under different view factor calculations. *Emergency Management Science and Technology*, 2024, vol. 4, article e003. DOI: 10.48130/emst-0024-0005.

5. Modest M. F. Radiative Heat Transfer. 3rd ed. Oxford: Academic Press, 2013. 904 p.

6. Shiryayev E. V., Shabunin S. A., Shvyrkov S. A. Otsenka pozharnoy opasnosti elastichnykh rezervuarov na osnove termogravimetricheskogo analiza [Assessment of fire hazard of elastic reservoirs based on thermogravimetric analysis]. *Pozharovzryvobezopasnost*, 2024, vol. 33, issue 3, pp. 37–46.

7. Flame retarding performance of elastomeric nanocomposites: A review / P. S. Khobragade, D. P. Hansora, J. B. Naik [et al.]. *Polymer Degradation and Stability*, 2016, vol. 130, pp. 194–244. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2016.06.001.

8. Nanocarbon-Based Flame Retardant Polymer Nanocomposites / Y. Yang, J. L. Díaz Palencia, N. Wang [et al.]. *Molecules*, 2021, vol. 26, issue 15, article 4670. DOI: 10.3390/molecules26154670.

9. Samigullin G. Kh., Zakharov A. E. Snizhenie pozharnoy opasnosti pri khraneniі

nefteproduktov v polimernykh elastichnykh rezervuarakh, modifitsirovannykh nanouglerodnymi komponentami [Reduction of fire hazard during petroleum product storage in polymeric elastic reservoirs modified with nanocarbon components]. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere*, 2023, vol. 2 (66), pp. 148–158.

10. Zakharov A. E. Termogravimetricheskii analiz nanomodifitsirovannogo materiala dlya vneshnego ognезashchitnogo sloya obolochek polimernykh elastichnykh rezervuarov [Thermogravimetric analysis of a nanomodified material for the external fire-protective layer of polymeric elastic reservoir shells]. *Sovremennye problemy grazhdanskoй zashchity*, 2025, vol. 4 (57), pp. 19–28.

11. Samigullin G. Kh., Zakharov A. E., Goncharov G. I. Povyshenie termostoykosti vneshnego sloya polimernykh elastichnykh rezervuarov putem naneseniya modifitsirovannykh nanouglerodnykh komponentov [Increasing the thermal resistance of the external layer of polymeric elastic reservoirs by applying modified nanocarbon components]. *Aktualnye problemy pozharnoy bezopasnosti: materialy XXXVI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 375-y godovshchine obrazovaniya pozharnoy okhrany Rossii*. Moscow: FGBU VNIPO MChS Rossii, 2024, pp. 511–516.

12. Zakharov A. E. Algoritm rascheta kriticheskogo vremeni progreva oblochki polimernogo elastichnogo rezervuara pri pozhare proliva s uchetom ognезashchity [Algorithm for calculating the critical heating time of a polymeric elastic reservoir shell under pool fire exposure with account for fire protection]. *Estestvennye nauki i pozharobezopasnost: problemy i perspektivy issledovaniy: sbornik materialov III Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 60-letiyu Ivanovskoy pozharno-spatatelnoy akademii GPS MChS Rossii*. Ivanovo: Ivanovskaya pozharno-spatatel'naya akademiya GPS MChS Rossii, 2026, pp. 514–519.

*Самигуллин Гафур Халафович*

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России»,

Российская Федерация, г. Санкт-Петербург

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры физико-химических основ процессов горения и тушения

E-mail: samigullin.gh@yandex.ru

*Samigullin Gafur Khalafovich*

FSBEI HE «Saint Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia»,

Russian Federation, Saint Petersburg

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Physical and Chemical Fundamentals of Combustion and Fire Suppression Processes

E-mail: samigullin.gh@yandex.ru

*Захаров Александр Евгеньевич*

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России»,

Российская Федерация, г. Санкт-Петербург

старший преподаватель кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств

E-mail: frzakhsach@mail.ru

*Zakharov Aleksandr Evgenievich*

FSBEI HE «Saint Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia»,

Russian Federation, Saint Petersburg

Senior Lecturer, Department of Fire Safety of Technological Processes and Productions

E-mail: frzakhsach@mail.ru