

Расчет фактического предела огнестойкости ограждающей стены с волноотражающим козырьком группы мазутных резервуаров

Сергей Александрович Швырков, Ян Игоревич Юрьев ✉,
Анатолий Павлович Петров, Владимир Петрович Назаров

Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Согласно ГОСТ Р 53324–2009 для полного удержания разливающегося потока жидкости при разрушении резервуара может устанавливаться ограждающая стена с волноотражающим козырьком, которая должна быть сплошной по периметру, выполняться из негорючих материалов и иметь предел огнестойкости не менее E 150. Как правило, для строительства таких преград используют разновидности тяжелого бетона. Однако фактический предел огнестойкости конструкции зависит как от ее геометрических параметров, так и от теплотехнических характеристик и прочностных свойств применяемого вида бетона в условиях длительного воздействия углеводородного режима пожара. Работа посвящена расчетной оценке фактического предела огнестойкости ограждающей стены с волноотражающим козырьком из тяжелого бетона для группы резервуаров, входящих в состав мазутного хозяйства теплоэлектроцентрали.

Методика расчета и полученные результаты. Используя результаты исследований по обоснованию углеводородного режима пожара пролива горючей жидкости при разрушении резервуара, эмпирические зависимости для определения теплотехнических параметров тяжелого бетона, а также экспериментальные данные по изменению прочности бетона на сжатие при температурах до 1200 °С, выполнен расчет фактического предела огнестойкости ограждающей стены с волноотражающим козырьком для группы мазутных резервуаров. Результаты расчетов показали, что принятая проектом конструкция преграды способна сохранять устойчивость более 10 ч. При этом несущая способность стены более чем в 11 раз превышает изгибающий момент от нормативной нагрузки, то есть огнестойкость преграды не менее RE 600, что в 4 раза превышает нормативный показатель для таких типов ограждений.

Выводы. Для расчета фактического предела огнестойкости ограждающих стен резервуарных парков хранения нефти и нефтепродуктов может быть использован общий алгоритм расчета, приведенный в СП 468.1325800.2019, при этом в качестве исходных данных рекомендуются к использованию результаты указанных выше теоретических и экспериментальных исследований.

Ключевые слова: резервуарный парк; углеводородный пожар; тяжелый бетон; преграда; несущая способность; целостность

Для цитирования: Швырков С.А., Юрьев Я.И., Петров А.П., Назаров В.П. Расчет фактического предела огнестойкости ограждающей стены с волноотражающим козырьком группы мазутных резервуаров // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 6. С. 73–86. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.06.73-86

✉ Юрьев Ян Игоревич, e-mail: magistr-87@list.ru

The analysis of the fire resistance limit of an enclosing wall with a wave-resisting visor as the protection for a group of fuel oil tanks

Sergey A. Shvyrkov, Yan I. Yuryev ✉, Anatoliy P. Petrov, Vladimir P. Nazarov

The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. An enclosing wall with a wave-resisting visor may be installed to resist the flow of a liquid spill during a tank collapse in accordance with GOST R 53324-2009. This wall should be continuous along the perimeter; it must be made of incombustible materials and have the fire-resistance limit of not less than E 150.

As a rule, varieties of heavy concretes are used to construct these walls. However, the actual fire-resistance limit of a structure depends on both its geometric parameters, thermal characteristics and strength properties of concrete used in the case of the long-term exposure to the hydrocarbon fire regime. The work addresses the assessment of the actual fire resistance limit of an enclosing wall with a wave-resisting visor made of heavy concrete designed as the protection for a group of tanks at fuel oil facilities of a thermal power plant.

Calculation methodology and results. The calculation of the actual fire resistance limit of an enclosing wall with a wave-resisting visor, designated for a group of fuel oil tanks was performed. The co-authors used the results of studies on the substantiation of a hydrocarbon fire resulting from a flammable liquid spill and a tank failure, empirical dependences for determining the thermal engineering parameters of heavy concrete, as well as experimental data on a change in the compressive strength of concrete at temperatures up to 1,200 °C. The calculation results show that this wall structure can maintain stability for more than 10 hours. Note that the load-bearing capacity of the wall is more than 11 times greater than the bending moment triggered by the standard load. Indeed, the fire resistance of the wall is not less than RE 600. It exceeds the normative values for these types of walls by a factor of four.

Conclusions. A common algorithm can be used to calculate the actual fire-resistance limit of enclosing walls of oil and petroleum product tank storage facilities, set by Construction Regulations 468.1325800.2019. At the same time, the results of the above theoretical and experimental studies are recommended for use as the initial data.

Keywords: tank farm; hydrocarbon fire; heavy concrete; barrier; bearing capacity; integrity

For citation: Shvyrkov S.A., Yuryev Ya.I., Petrov A.P., Nazarov V.P. The analysis of the fire resistance limit of an enclosing wall with a wave-resisting visor as the protection for a group of fuel oil tanks. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2021; 30(6):73-86. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.06.73-86 (rus).

✉ Yan Igorevich Yuryev, e-mail: magistr-87@list.ru

Введение

В последнее десятилетие развитие транспортной системы в столице проводится активными темпами. Существенно увеличилась дорожная сеть, выросла протяженность линий московского метро, построены новые хорды и рокады. Однако интенсификация дорожного строительства в городских условиях осложняет обеспечение пожарной безопасности как строящихся, так и рядом расположенных объектов. При этом наиболее часто возникают вопросы, связанные с сокращением противопожарных разрывов между указанными объектами защиты, что требует разработки дополнительных компенсирующих мероприятий. Так, в частности, при строительстве Северо-Восточной хорды (СВХ) возникла проблема сближения ряда транспортных развязок эстакадного типа с вертикальными стальными резервуарами (РВС) теплоэлектроцентрали ТЭЦ-11, предназначенными для хранения мазута и подготовки его к сжиганию [1].

Важно отметить, что резервуарные парки относятся к объектам повышенной пожаровзрывоопасности, что обусловлено, в первую очередь, высокой вероятностью выхода горючей жидкости при аварии или пожаре РВС. При этом аварии РВС в населенных пунктах или при их расположении вблизи акваторий всегда приводят к значительному ущербу и часто сопровождаются травмами, а порой, и гибелью людей, если заранее не предусмотрены адекватные опасности защитные мероприятия [2–4]. В качестве подтверждения можно привести негативные последствия разрушения РВС с дизельным топливом на ТЭЦ в г. Норильске, сопровождавшиеся

объявлением чрезвычайной ситуации и приведшие к ущербу в более чем 100 млрд руб. [5].

Таким образом, в связи с возникшими частичными сокращениями противопожарных разрывов от рассматриваемых резервуаров ТЭЦ-11 до проектируемых участков автомагистрали специалистами Академии ГПС МЧС России предложено в качестве компенсирующего мероприятия взамен земляного обвалования группы резервуаров обустроить монолитную железобетонную ограждающую стену с волноотражающим козырьком.

В соответствии с требованиями ГОСТ Р 53324–2009 «Ограждения резервуаров. Требования пожарной безопасности»¹ такая преграда должна рассчитываться на гидродинамическое давление потока жидкости, быть замкнутой и иметь предел огнестойкости не меньше E 150. Известно, что под пределом огнестойкости строительной конструкции понимается промежуток времени от начала огневого испытания при стандартном температурном режиме пожара до наступления одного из нормированных для данной конструкции предельных состояний по огнестойкости. В связи с этим, возникает вопрос о корректности применения для определения предела огнестойкости рассматриваемой конструкции преграды стандартного метода испытаний, так как температурный режим пожара пролива горючей жидкости при разрушении РВС имеет ряд существенных отличий от стандартного температурного режима пожара. В частности, среднеповерхностная температура пламени боль-

¹ ГОСТ Р 53324–2009. Ограждения резервуаров. Требования пожарной безопасности: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 18 февраля 2009 г. № 100-ст.

шинства горючих жидкостей — 1200 °С, быстрый рост температуры пожара за счет сгорания значительного количества нагрузки и поддержание ее до полного выгорания разлитой горючей жидкости, пожар в границах ограждения с постоянным и неограниченным доступом кислорода, непосредственное воздействие пламени пожара на преграду [6]. При этом важно указать, что в мировой практике нашли широкое применение температурные режимы пожаров, существенно отличающиеся от стандартного температурного режима пожара [7–17].

В связи с вышесказанным, для расчетного определения фактического предела огнестойкости предложенной конструкции преграды, что и являлось целью настоящей статьи, ранее были выполнены комплексные исследования, в результате которых определены теплотехнические и прочностные характеристики рассматриваемых видов бетона в условиях воздействия «реального» пожара, характерного для горения горючей жидкости при разрушении РВС [6, 18–20].

Используя указанные результаты исследований для достижения поставленной в настоящей статье цели, решались следующие задачи:

- выполнение расчета огнестойкости ограждения по потере целостности;
- выполнение расчета огнестойкости ограждения по несущей способности;
- получение зависимости несущей способности ограждающей стены и изгибающего момента от различной продолжительности воздействия углеводородного режима пожара;
- сравнение полученного значения фактического предела огнестойкости ограждающей стены с волноотражающим козырьком с нормативным значением для ограждений резервуарных парков.

Расчетные методы и результаты решений

Геометрические размеры ограждения в зависимости от длины вылета волноотражающего козырька рассчитывались по методу, приведенному в приложении А ГОСТ Р 53324–2009, а параметры его устойчивости к воздействию потока жидкости на основе численного решения уравнений гидродинамики, постановка задач и частные случаи которых рассмотрены в [4].

Для определения фактического предела огнестойкости ограждения применялась методика, изложенная в СП 468.1325800.2019 «Бетонные и железобетонные конструкции. Правила обеспечения огнестойкости и огнесохранности»², с учетом резуль-

татов ранее выполненных исследований [4, 6, 18–20], включающих:

- обоснование углеводородного режима пожара (УРП) пролива топлива при квазимгновенном разрушении резервуара;
- нахождение соотношений для оценки теплотехнических параметров тяжелого бетона с наполнителем из гранитной крошки, торкрет-бетона и фиброторкрет-бетона со стальной фиброй в условиях УРП;
- получение опытных данных по кубической и призмочной прочности исследуемых образцов бетона в условиях УРП;
- построение графических зависимостей для оценки температуры в слое конструкции ограждения различной толщины при одностороннем воздействии УРП до 10 ч.

На рис. 1 показано техническое решение защитного ограждения.

Принятые допущения:

1) толщина стены по всей высоте принята по наименьшему проектному значению, равному 1000 мм;

2) при оценке огнестойкости не учитывалось воздействие на стену гидростатического давления от разлившегося в границах ограждения мазута на высоте 2,02 м при разрушении РВС № 1, поскольку в соответствии с данными, представленными в [21], это давление ($P_{ст} = 0,196 \cdot 10^5$ Па) в шесть раз меньше гидродинамического давления мазута ($P_{гд} = 1,254 \cdot 10^5$ Па), действующего на этой высоте на стену при полном разрушении указанного резервуара:

- площадь внутри обвалования группы резервуаров: $S_{об} = 12\,582,04$ м²;
- высота стенки РВС № 1–3: $H_{ст,р1} = H_{ст,р2} = H_{ст,р3} = 17,88$ м;
- диаметр РВС № 1–3: $D_{р1} = D_{р2} = 39,9$ м; $D_{р3} = 28,5$ м;
- максимальный уровень мазута в РВС № 1–3: $H_{жр1} = H_{жр2} = H_{жр3} = 17,25$ м;
- площадь зеркала поверхности мазута в РВС № 1–3: $S_{р1} = S_{р2} = 1249,73$ м²; $S_{р3} = 637,62$ м²;
- объем мазута в РВС № 1–3: $V_{р1} = V_{р2} = 21\,557,81$ м³; $V_{р3} = 10\,998,88$ м³;
- плотность мазута: $\rho_m = 960$ кг/м³;
- площадь разлива мазута в обваловании: $S_p = S_{об} - S_{р2} - S_{р3} = 10\,694,69$ м²;
- максимальный уровень мазута, разлившегося при разрушении РВС № 1: $H_{ж\,max} = V_{р1}/S_p = 2,02$ м.

Расчет огнестойкости ограждения по потере целостности

В СП 468.1325800.2019, а также в [22] указано, что при пожаре в железобетонных конструкци-

² Бетонные и железобетонные конструкции. Правила обеспечения огнестойкости и огнесохранности (СП 468.1325800.2019) : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 10 декабря 2019 г. № 790/пр и введен в действие с 11 июня 2020 г.

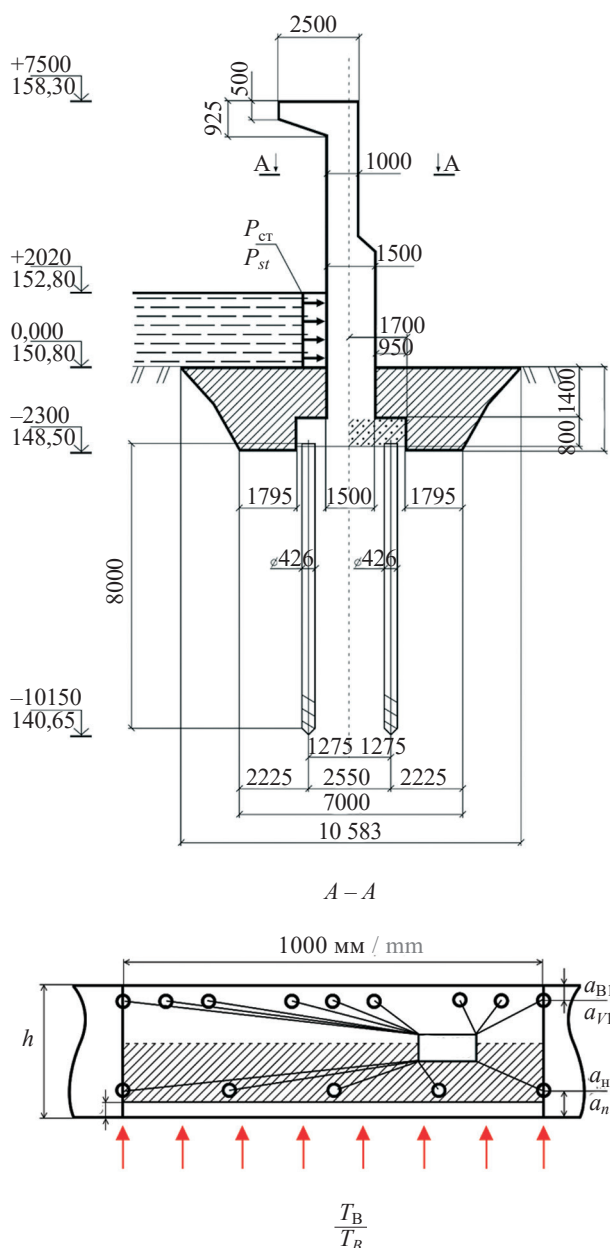


Рис. 1. Техническое решение защитной стены

Fig. 1. Technical solution for a protective wall

ях, влажность которых превышает 3,5 %, возможно взрывообразное разрушение бетона. Как правило, через 5...20 мин после начала пожара в таких конструкциях образуются сквозные отверстия или трещины, которые сопровождаются отколами бетона от нагреваемой поверхности. Причина этого явления заключается в образовании трещин в структуре бетона и их переход в неравновесное спонтанное развитие под воздействием внешней нагрузки и неравномерного нагрева и фильтрации пара по толщине сечения элемента.

Для оценки возможности разрушения бетона при пожаре используется критерий хрупкого разрушения F , вычисляемый по формуле, приведенной

в СП 468.1325800.2019, входящие в которую параметры даны в табл. 1:

$$F = \frac{aa_{bt}E_{bt}\rho W_3}{K_1^1 \lambda n}. \quad (1)$$

При значениях $F > 4$ хрупкое разрушение бетона при пожаре возможно, при этом предел огнестойкости по потере целостности не будет превышать Е 15.

Известно, что максимальный процент влажности бетон имеет при эксплуатации во влажных условиях, а также в ближайшие 3-4 недели после изготовления из него строительной конструкции. Используя формулу (1), определим критерий F для рассматриваемой конструкции ограждения в первый месяц влажного твердения бетона при относительной влажности воздуха более 73 %.

В соответствии с СП 468.1325800.2019 для бетона с соотношением Вода/Цемент $\geq 0,4$: $n = \text{Цемент}(\text{Вода/Цемент} - 0,2) \cdot 10^{-3}$ (табл. 2).

Объемная эксплуатационная влажность бетона при принятых условиях определяется по формуле:

$$W_3 = W_b \rho 10^{-3}, \quad (2)$$

где W_b — равновесная влажность бетона, принимаемая по СП 468.1325800.2019; для рассматриваемого случая численное значение $W_3 = 0,065$. Тогда

$$F = \frac{1,16 \cdot 10^{-2} \cdot 8,25 \cdot 10^{-6} \cdot 2,16 \cdot 10^{-4} \cdot 2220 \cdot 0,065}{0,58 \cdot 0,94 \cdot 0,105} = 5,21.$$

Вследствие того, что расчетное значение критерия $F > 4$, сделан вывод о возможном хрупком разрушении бетона в конструкции ограждающей стены в течение первых 20 мин ее прогрева на пожаре. Кроме этого, в СП 468.1325800.2019 указано, что в строительных конструкциях толщиной не менее 200 мм может произойти отбойка бетонных кусков до 100 мм, что сопровождается снижением толщины конструкции. Данное явление может иметь место и в рассматриваемой конструкции ограждающей стены с минимальным проектным сечением 1000 мм. Поэтому в дальнейшем оценка огнестойкости рассматриваемого ограждения с учетом снижения его толщины на 100 мм должна выполняться по потере несущей способности вследствие того, что сначала наступает предел огнестойкости по R, а затем по E.

Расчет огнестойкости ограждения по несущей способности

В расчете параметры волноотражающего козырька были неизменными. Данные для расчета приведены в табл. 3.

Таблица 1. Параметры для определения критерия хрупкого разрушения

Table 1. Parameters for the Criterion of Brittle Fracture

Параметр Parameter	Обозначение, размерность Symbol, dimension	Значение Value
Плотность сухого бетона Density of dry concrete	ρ , кг/м ³ ρ , kg/m ³	2220,0
Объемная эксплуатационная влажность бетона Volumetric operating humidity of concrete	W_3 , м ³ /м ³ W_v , m ³ /m ³	0,065
Коэффициент псевдоинтенсивности напряжений бетона Coefficients of pseudo-intensity of concrete stresses	K_I^1 , МН·м ^{-3/2} K_I^1 , MN·m ^{-3/2}	$0,58 \cdot 10^3$
Пористость бетона Concrete porosity	N	0,105
Коэффициент теплопроводности бетона при температуре 250 °С Coefficient of thermal conductivity of concrete at a temperature of 250 °C	λ , Вт/(м·°С) λ , W/(m·°C)	0,94
Модуль упругости бетона Modulus of elasticity of concrete	E_{bt} , МН/м ² E_{bt} , MN/m ²	$21,6 \cdot 10^3$
Коэффициент температурной деформации Temperature deformation coefficient	α_{bt} , °С ⁻¹ α_{bt} , °C ⁻¹	$8,25 \cdot 10^{-6}$
Коэффициент пропорциональности Coefficient of proportionality	a , Вт·м ^{-3/2} ·кг a , W·m ^{-3/2} ·kg	$1,16 \cdot 10^{-2}$

Таблица 2. Параметры бетонной смеси

Table 2. Concrete mixture parameters

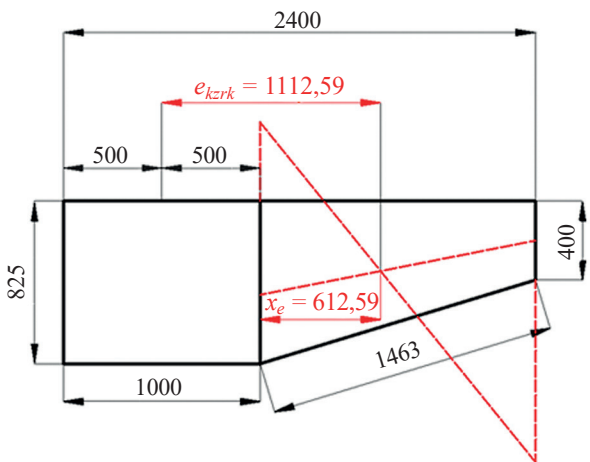
Плотность бетона, кг/м ³ Concrete density, kg/m ³		Состав бетонной смеси, кг/м ³ Concrete mixture composition, kg/m ³					Вода/Цемент Water/Cement	Класс бетона Class concrete	Щебень, % Crushed stone %
Сухого Dry	Естественной влажности Natural humidity	Песок Sand	Цемент Cement	Вода Water	Щебень Crushed stone	Микро-кремнезем Microsilica			
2220	2370	700	400	185	1030	55	0,46	B40	0,43

Таблица 3. Параметры волноотражающего козырька

Table 3. Oscillating visor parameters

Параметр Parameter	Обозначение, размерность Symbol, dimension	Значение Value
Высота стены от поверхности жидкости до козырька Height of the wall from the liquid surface to the visor	h^l , м h^l , m	0,9
Ширина расчетного участка стены Width of calculated wall section	Δb , м Δb , m	1,0
Высота стены (до козырька) Height of wall (to visor)	h , м h , m	4,48
Высота стены с козырьком выше поверхности жидкости Height of the visor wall above the liquid surface	H , м H , m	5,48
Ширина участка стены (при расчете e_{kzrk} принято $d = 1,0$ м) Width of wall section ($d = 1.0$ m was assumed for e_{kzrk} calculation)	d , м d , m	0,9

Параметр Parameter	Обозначение, размерность Symbol, dimension	Значение Value
Армирование стены Wall reinforcement		
Расстояние от оси арматуры до края необогреваемой части стены The distance from the reinforcement rod axis to the edge of the unheated part of the wall	$a_{в1}$, мм a_{v1} , mm	90,0
Количество арматуры в верхней части Number of reinforcement rods in the upper part	$N_{в}$, шт. N_v , pcs.	9
Расстояние от оси арматуры до края обогреваемой части стены The distance from the axis of reinforcement rods to the edge of the heated part of the wall	$a_{н1}$, мм a_{n1} , mm	90,0
Количество арматуры в одном ряду в нижней части The number of reinforcement rods in one row in the bottom part	$N_{н}$, шт. N_n , pcs.	5
Диаметр стержней верхней арматуры The diameter of upper reinforcement rods	$d_{в}$, мм d_v , mm	28,0
Диаметр стержней нижней арматуры The diameter of bottom reinforcement rods	$d_{н}$, мм d_n , mm	28,0
Плотность бетона Concrete density	ρ_t , кг/м ³ ρ_t , kg/m ³	2370,0
Начальная температура Initial temperature	$T_{и}$, °C T_n , °C	20,0
Расчетная длина козырька Estimated length of the visor	L_{kzrk} , м L_{kzrk} , m	2,4
Расчетная толщина козырька стены Estimated thickness of the wall visor	B_{kzrk} , м B_{kzrk} , m	0,4
Давление от веса стенки: $P_{g, stnk} = \Delta b h h' 10 \rho_t$ Pressure from the weight of the wall: $P_{g, stnk} = \Delta b h h' 10 \rho_t$	$P_{g, stnk}$, Н $P_{g, stnk}$, N	95 558,4
Высота козырька Visor height	H_{kzrk} , м H_{kzrk} , m	0,825
Давление от козырька Pressure from the visor	$P_{g, kzrk}$, Н $P_{g, kzrk}$, N	21 774,38
Давление от стены Pressure from the wall	$P_{g, total}$, Н $P_{g, total}$, N	117 332,775
Эксцентриситет приложения нагрузки от веса козырька: $e_{kzrk} = x_e + \left(\frac{d \cdot 1000}{2} \right)$ Eccentricity of the load application from the weight of the visor: $e_{kzrk} = x_v + \left(\frac{d \cdot 1,000}{2} \right)$	e_{kzrk} , мм e_{kzrk} , mm	1112,59
Расстояние от центра тяжести козырька до стенки The distance from the centre of gravity of the visor to the wall	x_e , мм x_v , mm	612,59

Параметр Parameter	Обозначение, размерность Symbol, dimension	Значение Value
 <p>Расчетная схема центра тяжести волноотражающего козырька ограждающей стены The design scheme of the centre of gravity of the wave-resisting visor of the enclosing wall</p>		
Изгибающий момент от веса козырька: $M_{kzrk} = P_{g,kzrk} e_{kzrk}$ The bending moment from the weight of the visor: $M_{kzrk} = P_{g,kzrk} e_{kzrk}$	M_{kzrk} , кНм M_{kzrk} , kNm	24,23
Модуль упругости арматуры (холодной) Modulus of elasticity of the reinforcement (cold)	E_s , МПа E_s , MPa	$2 \cdot 10^5$
Заполнитель Filler	Гранитная крошка Granite particles	
Предел прочности бетона Limit strength of concrete	R_{bn} , МПа R_{bn} , MPa	29,0
Модуль упругости (начального) бетона Modulus of elasticity of concrete (initial)	E_b , МПа E_b , MPa	$36 \cdot 10^3$
Влажность бетона Concrete humidity	W_6 , % W_c , %	3,0
Предел прочности арматуры Limit strength of reinforcement	R_{sn} , МПа R_{sn} , MPa	500,0
Коэффициент заделки опор [23] Pillar embedding coefficient [23]	a	2,0
	α	0,85
Действующая нагрузка: $N_n = P_{g,tot} \cdot 10^{-3}$ Operating load: $N_n = P_{g,tot} \cdot 10^{-3}$	N_n , кН N_n , kN	117,33
Высота конструкции (принято $l_0 = H\mu$) Construction height (accepted $l_0 = H\mu$)	l_0 , м l_0 , m	10,96
Коэффициент расчетной длины Design length coefficient	μ	2,0
Параметры в зависимостях: Parameters in dependencies: $A_{sn1} = N_n \pi \frac{d_n^2}{4}$ $A_{sb} = N_b \pi \frac{d_b^2}{4}$	мм ² mm ²	3078,8
	мм ² mm ²	5541,8
Время прогрева Warm-up time	T , мин T , min	150

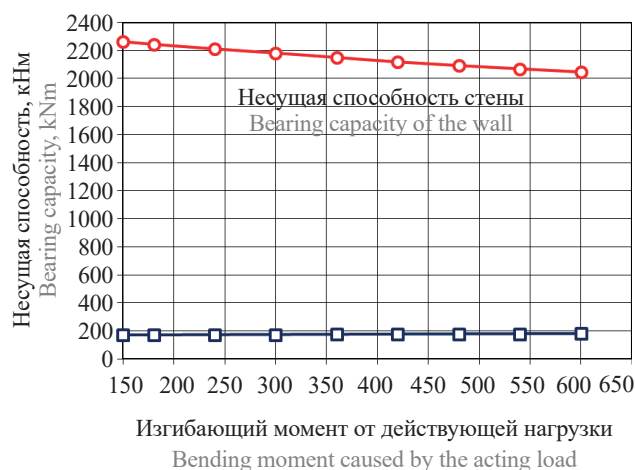


Рис. 2. Несущая способность и изгибающий момент ограждающей стены в зависимости от продолжительности огневого воздействия при пожаре разлива мазута (толщина стены — 900 мм, диаметр арматуры А500 — 28 мм)

Fig. 2. The bearing capacity and bending moment in an enclosing wall as a function of the time of fire exposure in case of a fuel oil spill fire (wall thickness — 900 mm, rebar diameter A500 — 28 mm)

Таблица 4. Решения теплотехнической и прочностной задач
Table 4. Solutions of heat and strength problems

Параметр Parameter	Обозначение, размерность Symbol, dimension	Значение Value
Теплотехническая задача Thermal engineering task		
Теплофизические характеристики бетона при температуре Thermophysical characteristics of concrete at temperature	$T, ^\circ\text{C}$	450,0
Коэффициент теплопроводности, определяемый по [21] Thermal conductivity coefficient determined by [21]	$\lambda_{tem}, \text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ $\lambda_{tem}, \text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$	0,885
Приведенный коэффициент температуропроводности: $a_{red} = \frac{\lambda_{tem}}{(c_{tem} + 50W)\rho_0}$ The reduced thermal conductivity coefficient: $a_{red} = \frac{\lambda_{tem}}{(c_{tem} + 50W)\rho_0}$	$a_{red}, \text{мм}^2/\text{с}$ $a_{red}, \text{mm}^2/\text{s}$	0,28
Коэффициент фиктивного слоя бетона [23] The coefficient of the fictitious concrete layer [23]	$K_b, \text{с}^{1/2}$ $K_b, \text{s}^{1/2}$	36,32
Удельная теплоемкость Specific heat capacity	$c_{tem}, \text{Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$ $c_{tem}, \text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$	1292,02
Параметр $2\sqrt{a_{red}\tau}$ Parameter $2\sqrt{a_{red}\tau}$	мм mm	99,76
Толщина фиктивного слоя бетона: $K_b\sqrt{a_{red}}$ Thickness of fictitious concrete layer: $K_b\sqrt{a_{red}}$	мм mm	19,10
Ожидаемая температура прогрева бетона Anticipated temperature of concrete heating	$t_{bcr}, ^\circ\text{C}$	500,0

Несущая способность конструкции определяется на основе теплотехнической и прочностной задач, решения которых приведены в табл. 4.

В результате выполненных расчетов получены зависимости несущей способности ограждающей стены и изгибающего момента от различной продолжительности огневого воздействия, общий вид которых показан на рис. 2.

Общий вид преграды в резервуарном парке ТЭЦ-11 на стадии строительства представлен на рис. 3.



Рис. 3. Общий вид ограждения со стороны ПВС № 3

Fig. 3. General view of the enclosure as viewed from Vertical steel tank 3

Параметр Parameter	Обозначение, размерность Symbol, dimension	Значение Value
Температура арматуры на уровне a_b The reinforcement temperature at level a_v	$t_{s2}, ^\circ\text{C}$	20,0
Температура арматуры на уровне a_n The reinforcement temperature at level a_n	$t_{s1}, ^\circ\text{C}$	1250,0
Обогреваемая температура бетона на поверхности Heated concrete surface temperature	$t_{b_hot}, ^\circ\text{C}$	1250,0
Необогреваемая температура бетона на поверхности Unheated concrete surface temperature	$t_{b_cold}, ^\circ\text{C}$	20,0
Усредненная температура бетона: $t_{btem} = \frac{t_{b_cold} + t_{b_hot}}{2}$ Averaged concrete temperature: $t_{btem} = \frac{t_{b_cold} + t_{b_hot}}{2}$	$t_{btem}, ^\circ\text{C}$	635,0
Толщина ненесущего слоя бетона Thickness of non-load-bearing concrete layer	$\delta, \text{мм}$ δ, mm	66,96
Критическая температура прогрева бетона Critical heating temperature of concrete	$t_{bcr}, ^\circ\text{C}$	500,0
Прочностная задача (арматура А500 на уровне a_b) Strength task (reinforcement A500 at a_v level)		
Коэффициент снижения модуля упругости бетона необогреваемой поверхности Coefficient of reduction of the modulus of elasticity of concrete of the unheated surface	β_{bt}	0,165
Коэффициент снижения прочности А500 A500 Strength reduction coefficient	γ_2	1,0
Коэффициент снижения модуля упругости А500 Coefficient of reduction of modulus of elasticity А500	β_{s2}	1,0
Коэффициент температурного расширения бетона Coefficient of thermal expansion of concrete	$\alpha_{bt}, 1/^\circ\text{C}$	$9 \cdot 10^{-6}$
Предел прочности А500 при пожаре: $R_{su2} = \gamma_2 R_{sn}$ A500 strength limit in case of fire: $R_{su2} = \gamma_2 R_{sn}$	$R_{su2}, \text{МПа}$ R_{su2}, MPa	500,0
Параметры приведенного сечения стены Parameters of the reduced wall section		
$h_{0t} = 1000d - a_b - \delta$ $h_{0t} = 1,000d - a_v - \delta$	$h_{0t}, \text{мм}$ h_{0t}, mm	833,04
Гибкость элемента: $\lambda = l_0/h_t$ Element flexibility: $\lambda = l_0/h_t$	λ	13,16
$h_0 = 1000d - a_b$ $h_0 = 1,000d - a_v$	$h_0, \text{мм}$ h_0, mm	900,0
$M_{11} = M_{kzrk}$	кНм kNm	24,23
$M_1 = M_{11}$	кНм kNm	24,23
$b_t = \Delta b$	$b_t, \text{мм}$ b_t, mm	1000,0

Параметр Parameter	Обозначение, размерность Symbol, dimension	Значение Value
$h_t = 1000d - \delta$	h_t , мм h_t , mm	833,04
Коэффициент продольного изгиба: $\varphi_1 = 1 + M_{11}/M_1$ Longitudinal bending coefficient: $\varphi_1 = 1 + M_{11}/M_1$	φ_1	2,0
Эксцентриситет: $e_0 = 1000M_{11}/N_n$ Eccentricity: $e_0 = 1,000M_{11}/N_n$	e_0 , мм e_0 , mm	206,47
$\delta_e = \max\left(\frac{e_0}{h_t}; 0,15\right)$	δ_e , мм δ_e , mm	0,25
$\mu\alpha = \frac{A_{sy1}E_s + A_{sb}E_s\beta_{s2}}{b_t h_t E_b \beta_{bt}}$	$\mu\alpha$	0,35
Жесткость сечения: $D = E_b \beta_{bt} b_t h_t^3 \left(\frac{0,0125}{\varphi_1(0,3 + \delta_e)} + 0,175\mu\alpha \left(\frac{h_{0t} - a_d}{h_t} \right)^2 \right)$ Section rigidity: $D = E_b \beta_{bt} b_t h_t^3 \left(\frac{0,0125}{\varphi_1(0,3 + \delta_e)} + 0,175\mu\alpha \left(\frac{h_{0t} - a_d}{h_t} \right)^2 \right)$	D , Н·мм ² D , N·mm ²	$2,48 \cdot 10^{14}$
Критическая сила: $N_{cr} = \frac{\pi^2 D}{1000(1000l_0)^2}$ Critical force: $N_{cr} = \frac{\pi^2 D}{1,000(1,000l_0)^2}$	N_{cr} , кН N_{cr} , kN	20 421,83
$\eta = 1/(1 - N_n/N_{cr})$	η	1,0057
Прогиб стены: $e_t = a(\alpha_{s1}t_{s1} - \alpha_{bt}t_{b_cold}) \frac{(l_0 1000)^2}{8h_{0t}}$, где $a = 2$ — коэффициент заделки Wall deflection: $e_t = a(\alpha_{s1}t_{s1} - \alpha_{bt}t_{b_cold}) \frac{(l_0 1,000)^2}{8h_{0t}}$, where $a = 2$ — embedding factor	e_t , мм e_t , mm	793,35
Эксцентриситет: $e = e_0\eta + 0,5(h_0 - a_{n1}) + e_t$ Eccentricity: $e = e_0\eta + 0,5(h_0 - a_{n1}) + e_t$	e , мм e , mm	1451,02
Момент от нагрузки (продолжительность 150 мин): $M_n = N_n \cdot e/1000$ Momentum caused by the load (duration 150 min): $M_n = N_n \cdot e/1,000$	M_n , кНм M_n , kNm	170,25
Предполагаем: (x) — высота сжатой зоны меньше предельного значения, тогда: We assume: (x) — the height of the compressed zone is less than the limit value, then:		
Высота сжатой зоны: $x = \frac{N_n \cdot 10^3 + R_{su2}A_{sv} - R_{su1}A_{sn1}}{R_{bn}b}$ Height of the compressed zone: $x = \frac{N_n \cdot 10^3 + R_{su2}A_{sv} - R_{su1}A_{sn1}}{R_{bn}b}$	x , мм x , mm	99,59

Параметр Parameter	Обозначение, размерность Symbol, dimension	Значение Value
$\xi = x/h_{0t} = 0,119$; $\xi_{R2} = 0,49$ — относительная высота сжатой зоны $\xi = x/h_{0t} = 0,119$; $\xi_{R2} = 0,49$ — relative height of the compressed zone		
Так как условие $\xi < \xi_{R2}$ выполняется, пересчитывать x не требуется, предположение верно Since the condition $\xi < \xi_{R2}$ is satisfied, it is not necessary to recalculate x , the assumption is correct		
Несущая способность стены при продолжительности пожара 150 мин: $M = (R_{bn} b_t x (h_{0t} - 0,5x) + R_{sn} \gamma_1 A_{sn1} (h_{0t} - a_{n1})) \cdot 10^{-6}$ The bearing capacity of the wall during the fire is 150 min: $M = (R_{bn} b_t x (h_{0t} - 0,5x) + R_{sn} \gamma_1 A_{sn1} (h_{0t} - a_{n1})) \cdot 10^{-6}$	M , кНм M , kNm	2262,17
Действующая нагрузка Operating load	M_n , кНм M_n , kNm	170,25

Выводы

В статье, используя результаты ранее выполненных исследований по определению теплотехнических параметров и прочностных характеристик различных видов бетонов в условиях углеводородного режима пожара, представлены итоги расчета фактического предела огнестойкости ограждающей стены с волноотражающим козырьком для группы мазутных резервуаров

ТЭЦ-11 г. Москвы. Расчеты показали, что принятая проектом конструкция ограждающей стены способна сохранять конструктивную целостность и функциональное назначение при длительном воздействии пожара пролива мазута, то есть огнестойкость рассматриваемой преграды составляет не менее RE 600, что в 4 раза превышает нормируемое значение для ограждений резервуарных парков (не менее E 150).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Назаров В.П., Брушлинский Н.Н., Швырков С.А., Горячев С.А., Сучков В.П., Чирко А.С. Обеспечение пожарной безопасности объектов городской застройки при развитии транспортной инфраструктуры в области допустимого риска // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2009. № 1. С. 20–31.
2. Зарипова А.Р., Ганиева А.А., Колесник А.А. Анализ проблем прогнозирования разливов нефтепродуктов в резервуарных парках // Нефтегазовое дело. 2017. Т. 15. № 2. С. 192–196.
3. Владимиров В.А. Разливы нефти: причины, масштабы, последствия // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. 2014. Т. 4. № 1. С. 217–229. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21490612>
4. Швырков С.А. Пожарный риск при квазимгновенном разрушении нефтяного резервуара : монография. М. : Академия ГПС МЧС России, 2015. 289 с.
5. Зайцев А.М., Тульская С.Г., Скляр К.А. Причины и последствия аварии на складе ГСМ ТЭЦ 3 города Норильска // Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации. 2021. № 3 (24). С. 38–42.
6. Юрьев Я.И. Огнестойкость монолитных железобетонных ограждающих стен резервуарных парков : дис. ... канд. техн. наук. М., 2018. 152 с.
7. Stucchi R., Amberg F.A. A practical approach for tunnel fire verification // Structural Engineering International. 2020. No. 4. Vol. 30. Pp. 515–529. DOI: 10.1080/10168664.2020.1772697
8. Yan Zhi-guo, Shen Yi, Zhu He-hua, Li Xiao-jun, Lu Yong. Experimental investigation of reinforced concrete and hybrid fibre reinforced concrete shield tunnel segments subjected to elevated temperature // Fire Safety Journal. 2015. Vol. 71. Pp. 86–99. DOI: 10.1016/j.firesaf.2014.11.009
9. Yi Na-Hyun, Choi Seung-Jai, Lee Sang-Won, Kim Jang-Ho Jay. Failure behavior of unbonded bi-directional prestressed concrete panels under RABT fire loading // Fire Safety Journal. 2015. Vol. 71. Pp. 123–133. DOI: 10.1016/j.firesaf.2014.11.010
10. Ingason Haukur, Zhen Li Ying, Lönnermark A. Runehamar tunnel fire tests // Fire Safety Journal. 2015. Vol. 71. Pp. 134–149. DOI: 10.1016/j.firesaf.2014.11.015

11. Khan A.A., Usmani A., Torero J.L. Evolution of fire models for estimating structural fire-resistance // *Fire Safety Journal*. 2021. Vol. 124. P. 103367. DOI: 10.1016/j.firesaf.2021.103367
12. Chudyba K. Bezpieczeństwo pożarowe konstrukcji z betonu według eurokodów (norm PN-EN) // *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza*. 2016. Vol. 41. Issue 1. Pp. 85–96. DOI: 10.12845/bitp.41.1.2016.9
13. Doherty P., Ali F., Nadjai A., Choi S. Explosive spalling of concrete columns with steel and polypropylene fibres subjected to severe fire // *Journal of Structural Fire Engineering*. 2012. Vol. 3. No. 1. Pp. 95–104. DOI: 10.1260/2040-2317.3.1.95
14. Siemon M., Zehfuß J. Behavior of structural tunnel elements exposed to fire and mechanical loading // *Journal of Structural Fire Engineering*. 2018. Vol. 9. No. 2. Pp. 138–146. DOI: 10.1108/JSFE-01-2017-0020
15. Shirsath S.K., Yaragal S.C. Performance of hybrid fibre-reinforced concretes at elevated temperatures // *Journal of Structural Fire Engineering*. 2017. Vol. 8. No. 1. Pp. 73–83. DOI: 10.1108/JSFE-01-2017-0007
16. Abdi Moghadam M., Izadifard R.A. Effects of steel and glass fibers on mechanical and durability properties of concrete exposed to high temperatures // *Fire Safety Journal*. 2020. Vol. 113. P. 102978. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.102978
17. Paik J.K., Czujko J. Assessment of hydrocarbon explosion and fire risks in offshore installations: Recent advances and future trends // *IES Journal Part A: Civil and Structural Engineering*. 2016. Vol. 4. Pp. 167–179. DOI: 10.1080/19373260.2011.593345
18. Швырков С.А., Юрьев Я.И. Температурный режим пожара для определения предела огнестойкости ограждающих стен нефтяных резервуаров // *Технологии техносферной безопасности*. 2016. № 4. С. 50–56. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2016-4/20-04-16.ttb.pdf>
19. Швырков С.А., Петров А.П., Назаров В.П., Юрьев Я.И. Теплотехнические свойства бетона, торкрет-бетона и торкрет-фибробетона в условиях углеводородного пожара // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2016. Т. 25. № 12. С. 5–12. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.12.5-12
20. Швырков С.А., Юрьев Я.И., Приступлюк Д.Н. Результаты экспериментальных исследований прочностных характеристик различных типов бетона в условиях углеводородного пожара // *Технологии техносферной безопасности*. 2017. № 1. 6 с. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2017-1/16-01-17.ttb.pdf>
21. Крутов А.М. Экспериментально-расчетное определение основных параметров защитной стены для ограждения резервуарного парка мазутного хозяйства ТЭЦ-11, предназначенного для удержания потока мазута (волны прорыва), образующегося при квазимгновенном разрушении наибольшего резервуара группы (РВС-20000), в составе противопожарной защиты объекта, расположенного по адресу: г. Москва, участок 4-го транспортного кольца, ш. Энтузиастов – Измайловское ш., ул. Перовская, д.1А : отчет о НИР. Сергиев-Посад : ЗАО «Теплоогнезащита», 2007. 90 с.
22. Ройтман В.М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий. М. : Ассоциация «Пожарная безопасность и наука», 2001. 382 с.
23. Бубнов В.М., Карпов А.С. Огнестойкость железобетонных конструкций : учеб. пособие. М. : Академия ГПС МЧС России, 2009. 76 с.

REFERENCES

1. Nazarov V.P., Brushlinskij N.N., Shvyrkov S.A., Goryachev S.A., Suchkov V.P., Chirko A.S. Ensuring of fire safety of urban construction objects under the development of transport infrastructure in the domain of permissible risk. *Environmental protection in the oil and gas complex*. 2009; 1:20-31. (rus).
2. Zaripova A.R., Ganieva A.A., Kolesnik A.A. Analysis of prognostic problems of petroleum spreads in tank parks. *Petroleum Engineering*. 2017; 15(2):192-196. (rus).
3. Vladimirov V.A. Oil spills: causes, magnitude, consequences. *Civil Protection Strategy: Problems and Research*. 2014; 4(1):217-229. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21490-612> (rus).
4. Shvyrkov S.A. *Fire risk in case of quasi-instantaneous destruction of an oil tank : monograph*. Moscow, Academy of the state fire Service of emercom of Russia Publ., 2015; 289. (rus).

5. Zaytsev A.M., Tul'skaya S.G., Sklyarov K.A. Causes and consequences of the accident at the fuel and lubricants warehouse at CHPP 3 of the city of Norilsk. *Urban planning. Infrastructure. Communications*. 2021; 3(24):38-42. (rus).
6. Yur'yev Ya.I. *Fire and industrial safety (construction industry)*. Moscow, 2018; 152. (rus).
7. Stucchi R., Amberg F.A. A practical approach for tunnel fire verification. *Structural Engineering International*. 2020; 30(4):515-529. DOI: 10.1080/10168664.2020.1772697
8. Yan Zhi-guo, Shen Yi, Zhu He-hua, Li Xiao-jun, Lu Yong. Experimental investigation of reinforced concrete and hybrid fibre reinforced concrete shield tunnel segments subjected to elevated temperature. *Fire Safety Journal*. 2015; 71:86-99. DOI: 10.1016/j.firesaf.2014.11.009
9. Yi Na-Hyun, Choi Seung-Jai, Lee Sang-Won, Kim Jang-Ho Jay. Failure behavior of unbonded bi-directional prestressed concrete panels under RABT fire loading. *Fire Safety Journal*. 2015; 71:123-133. DOI: 10.1016/j.firesaf.2014.11.010
10. Ingason Haukur, Zhen Li Ying, Lönnemark A. Runehamar tunnel fire tests. *Fire Safety Journal*. 2015; 71:134-149. DOI: 10.1016/j.firesaf.2014.11.015
11. Khan A.A., Usmani A., Torero J.L. Evolution of fire models for estimating structural fire-resistance. *Fire Safety Journal*. 2021; 124:103367. DOI: 10.1016/j.firesaf.2021.103367
12. Chudyba K. Bezpieczeństwo pożarowe konstrukcji z betonu według eurokodów (norm PN-EN). *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza*. 2016; 41(1):85-96. DOI: 10.12845/bitp.41.1.2016.9 (pol).
13. Doherty P., Ali F., Nadjai A., Choi S. Choi Explosive spalling of concrete columns with steel and polypropylene fibres subjected to severe fire. *Journal of Structural Fire Engineering*. 2012; 3(1):95-104. DOI: 10.1260/2040-2317.3.1.95
14. Siemon M., Zehfuß J. Behavior of structural tunnel elements exposed to fire and mechanical loading. *Journal of Structural Fire Engineering*. 2018; 9(2):138-146. DOI: 10.1108/JSFE-01-2017-0020
15. Shirsath S.K., Yaragal S.C. Performance of hybrid fibre-reinforced concretes at elevated temperatures. *Journal of Structural Fire Engineering*. 2017; 8(1):73-83. DOI: 10.1108/JSFE-01-2017-0007
16. Abdi Moghadam Mehrdad, Ramezan Ali Izadifard. Effects of steel and glass fibers on mechanical and durability properties of concrete exposed to high temperatures. *Fire Safety Journal*. 2020; 113:102978. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.102978
17. Paik J.K., Czujko J. Assessment of hydrocarbon explosion and fire risks in offshore installations: Recent advances and future trends. *IES Journal Part A: Civil and Structural Engineering*. 2016; 4:167-179. DOI: 10.1080/19373260.2011.593345
18. Shvyrvkov S.A., Yuryev Ya.I. The temperature of the fire to determine the limit of fire resistance of enclosing walls of oil tanks. *Tekhnologii tekhnosfernoi bezopasnosti: internet-zhurnal*. 2016; 4:50-56. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2016-4/20-04-16.ttb.pdf> (accessed July 07, 2021). (rus).
19. Shvyrvkov S.A., Petrov A.P., Nazarov V.P., Yuryev Ya.I. Thermophysical characteristic of concrete, shotcrete and fiber-reinforced shotcrete in conditions of hydrocarbon fire. *Pozharovzryvobezopasnost /Fire and Explosion Safety*. 2016; 25(12):5-12. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.12.5-12 (rus).
20. Shvyrvkov S.A., Yuryev Ya.I., Pristupyuk D.N. The results of experimental research of strength characteristics of various types of concrete in condition of hydrocarbon fire. *Technology of Technosphere Safety*. 2017; 1(71). URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2017-1/16-01-17.ttb.pdf> (accessed July 07, 2021). (rus).
21. Krutov A.M. *Experimental and computational determination of the main parameters of the protective wall for fencing the tank farm of the fuel oil facility at CHPP-11, designed to contain the flow of fuel oil (breakthrough waves) formed during the quasiinstantaneous destruction of the largest reservoir of the group (RVS-20000), as part of the fire protection of the facility located at : Moscow, section of the 4th transport ring, sh. Enthusiasts — Izmailovskoe highway, st. Perovskaya, 1A : research report*. Sergiev Posad, ZAO "Teploognezashchita", 2007; 90. (rus).
22. Roytman V.M. *Engineering solutions for assessing the fire resistance of designed and reconstructed buildings*. Moscow, Association "Fire Safety and Science", 2001; 382. (rus).
23. Bubnov V.M., Karpov A.S. *Fire resistance of reinforced concrete structures : training manual*. Moscow, Academy of the state Fire Service of Emercom of Russia Publ., 2009; 76. (rus).

Поступила 08.07.2021, после доработки 13.10.2021;

принята к публикации 25.10.2021

Received July 8, 2021; Received in revised form October 13, 2021;

Accepted October 25, 2021

Информация об авторах

ШВЫРКОВ Сергей Александрович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры пожарной безопасности технологических процессов в составе Учебно-научного комплекса пожарной безопасности объектов защиты, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галущкина, 4; РИНЦ ID: 765228; ORCID: 0000-0001-7449-8794; e-mail: magistr-87@list.ru;

ЮРЬЕВ Ян Игоревич, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры пожарной безопасности технологических процессов в составе Учебно-научного комплекса пожарной безопасности объектов защиты, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галущкина, 4; РИНЦ ID: 765228; ORCID: 0000-0003-1429-679X; e-mail: magistr-87@list.ru;

ПЕТРОВ Анатолий Павлович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры пожарной безопасности технологических процессов в составе Учебно-научного комплекса пожарной безопасности объектов защиты, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галущкина, 4; РИНЦ ID: 765316; ORCID: 0000-0002-7757-1771; e-mail: setyn@list.ru;

НАЗАРОВ Владимир Петрович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры пожарной безопасности технологических процессов в составе Учебно-научного комплекса пожарной безопасности объектов защиты, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галущкина, 4; РИНЦ ID: 764644; ORCID: 0000-0001-8579-4062; e-mail: nazarovvp@bk.ru

Вклад авторов

Швырков С.А. — научное руководство; концепция исследования; написание исходного текста; итоговые выводы.

Юрьев Я.И. — участие в разработке алгоритма вычислений; сбор материала, обработка материала, итоговые выводы.

Петров А.П. — научное редактирование текста; обобщение результатов; доработка текста; итоговые выводы.

Назаров В.П. — научное редактирование текста; обобщение результатов; доработка текста; итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Sergey A. SHVYRKOV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of Department of Fire Safety of Technological Processes as part of the Educational and Scientific Complex of Fire Safety of Protection Objects, The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 479363; ORCID: 0000-0001-7449-8794; e-mail: pbtp@mail.ru

Yan I. YURYEV, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of Department of Fire Safety of Technological Processes as part of the Educational and Scientific Complex of Fire Safety of Protection Objects, The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 765228; ORCID: 0000-0003-1429-679X; e-mail: magistr-87@list.ru

Anatoliy P. PETROV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Fire Safety of Technological Processes as part of the Educational and Scientific Complex of Fire Safety of Protection Objects, The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 765316; ORCID: 0000-0002-7757-1771; e-mail: setyn@list.ru

Vladimir P. NAZAROV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Fire Safety of Technological Processes as part of the Educational and Scientific Complex of Fire Safety of Protection Objects, The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 764644; ORCID: 0000-0001-8579-4062; e-mail: nazarovvp@bk.ru

Contribution of the authors

Sergey A. Shvyrkov — scientific guidance; research concept; writing the source text; final conclusions.

Yan I. Yuryev — participation in the development of the calculation algorithm; material collection, material processing, final conclusions.

Anatoliy P. Petrov — scientific editing of the text; generalization of the results; revision of the text; final conclusions.

Vladimir P. Nazarov — scientific editing of the text; generalization of the results; revision of the text; final conclusions.

The authors declare no conflicts of interests.