

---

---

# ПОЖАРНАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

---

---

Научная статья

УДК 622.276; DOI: 10.61260/2218-13X-2023-4-1-15

## **ИНСТРУМЕНТАРИЙ ОПЕРАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ В ОЦЕНКЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ПОЖАРЕ В ЗДАНИИ УВЕЛИЧЕННОЙ ОКОННОЙ ПРОЕМНОСТИ**

✉ Кузьмин Анатолий Алексеевич;

Пермяков Алексей Александрович;

Романов Николай Николаевич.

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

✉ [kaa47@mail.ru](mailto:kaa47@mail.ru)

*Аннотация.* Показано, что задача учета воздействия теплового излучения пожара при определении безопасных расстояний размещения пожарной техники и выборе позиций личного состава в ходе разработки оперативных планов пожаротушения производственных зданий с повышенной оконной проемностью не в полной мере обеспечена функционалом существующих программных комплексов. Поскольку тепловое излучение как один из компонентов опасных факторов пожара проявляется лишь при достаточно длительном воздействии, в данной работе анализируются ветви дерева событий, связанные с процессом диффузионного горения на поверхности пролива горючей жидкости. Представлены алгоритмы модуля температурного режима пожара в помещении промышленного здания увеличенной оконной проемности на основе интегральной модели и модуля диаграммы направленности теплового излучения через оконные проемы. Результаты численного моделирования с использованием представленного программного продукта позволяют сделать вывод, что действие эффекта диафрагмирования теплового излучения оконными проемами ослабляется по мере удаления от фронта теплоизлучающей поверхности и становится ничтожным на расстояниях пять метров и более.

*Ключевые слова:* тепловое излучение пожара, безопасное расстояние, коэффициент облученности, оконная интегральная модель пожара, пожарная нагрузка

**Для цитирования:** Кузьмин А.А., Пермяков А.А., Романов Н.Н. Инструментарий операционной поддержки в оценке интенсивности теплового излучения при пожаре в здании увеличенной оконной проемности // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петербур. ун-та ГПС МЧС России». 2023. № 4. С. 1–15. DOI: 10.61260/2218-13X-2023-4-1-15.

Scientific article

## TOOLS FOR OPERATIONAL SUPPORT IN ASSESSING THE INTENSITY OF THERMAL RADIATION IN CASE OF A FIRE IN A BUILDING WITH AN ENLARGED WINDOW OPENING

✉ Kuzmin Anatoly A.;

Permyakov Aleksey A.;

Romanov Nikolay N.

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

✉ [kaa47@mail.ru](mailto:kaa47@mail.ru)

*Abstract.* It is shown that the task of taking into account the impact of thermal radiation from a fire for determining safe distances for situating fire engines and choosing positions for firefighters during developing operational fire extinguishing plans for industrial buildings with enlarged window openings is not fully supported by the functionality of existing software systems. Since thermal radiation as one of the components of dangerous fire factors valuable only with a sufficient exposure, we analyze events tree branches associated with the process of diffusion combustion on the surface of a flammable liquid spill. Algorithms of the fire temperature regime module in the room of an industrial building with an enlarged window opening are presented based on an integral model and the module of the directional pattern of thermal radiation through window openings. The results of numerical modeling using the presented software product allow us to conclude that the effect of thermal radiation diaphragmization by window openings weakens with distance from the front of the heat-emitting surface and becomes negligible at distances of five meters and more.

*Keywords:* thermal radiation of fire, safe distance, irradiation coefficient, window integral model of fire, fire load

**For citation:** Kuzmin A.A., Permyakov A.A., Romanov N.N. Tools for operational support in assessing the intensity of thermal radiation in case of a fire in a building with an enlarged window opening // Scientific and analytical journal «Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia». 2023. № 4. P. 1–15. DOI: 10.61260/2218-13X-2023-4-1-15.

### Введение

Крупные пожары, происходящие на объектах и сооружениях промышленного назначения, сопровождаются существенным материальным ущербом, который часто обусловлен рисками, связанными с быстрым развитием технологий, все больше использующих материалы с повышенной теплотой горения, прежде всего горючие и легковоспламеняющиеся жидкости (ГЖ и ЛВЖ). Интенсивное внедрение современных технологических решений часто повышает риски возникновения техногенных аварий, которые могут развиваться в техногенные катастрофы. Кроме того, высокая температура продуктов горения усложняет условия боевой работы личного состава подразделений федеральной противопожарной службы, что обуславливает актуальность совершенствования тактических приемов пожаротушения и разработку новых средств защиты личного состава и пожарной техники.

Существенная часть тепловой энергии, которая выделяется при сгорании пожарной нагрузки, трансформируется в излучение видимого и инфракрасного диапазона и является проявлением одного из наиболее опасных факторов пожара (ОФП). Тепловое излучение значительной интенсивности воздействуя на технологические установки, здания и сооружения, может вызвать дальнейшее распространение пожара, а также воздействовать на личный состав и используемую им пожарную технику. Эти обстоятельства ограничивают снизу дистанцию между пожарной техникой (например, цистерны или насоса) и фронтом

пламени. Эта дистанция, в свою очередь, ограничена сверху величиной компактной части струи, которая достигает 60 м, а при подаче пены или огнетушащего порошка – около 30÷35 м. В случае использования установок газовой пожаротушения максимальное расстояние между фронтом пожара и установкой не может быть более 10÷15 м. На таких расстояниях интенсивность теплового излучения фронта пожара может превышать тепловое излучение солнца в несколько десятков раз, что обуславливает, кроме того, и повышение температуры окружающей среды.

Известно, что при воздействии теплового излучения пожара на человеческий организм наблюдается существенное влияние на протекания биохимических процессов, изменения теплового и солевого баланса. Последствием такого воздействия могут быть сердечно-сосудистые нарушения, интенсивное потоотделение, ухудшение зрения [1, 2].

Величина интенсивности теплового излучения открытых поверхностей, если они нагреты до белого и красного свечения (факел пожара, раскаленный металл ограждающих конструкций и т.д.), на боевые позиции ствольщиков в случае их длительной (более 1 часа) работы, не может превышать  $140 \text{ Вт/м}^2$ , в этом случае облучение не должно воздействовать более чем на 25 % защищаемой поверхности.

К воздействию достаточно интенсивного теплового излучения не вся пожарная техника достаточно хорошо адаптирована, что может затруднить ее использование для целей пожаротушения.

В табл. 1 приводятся данные натурных экспериментов по воздействию теплового излучения пожара на кабину пожарного автомобиля [3].

Таблица 1

#### Воздействие теплового излучения

Интенсивность, $\text{кВт/м}^2$	Продолжительность воздействия, сек.	Результат воздействия теплового излучения
11	110÷125	Испарение и частичное обугливание лакокрасочного покрытия
25	70÷100	Разрушение остекления кабины
25	170÷190	Воспламенение паров лакокрасочного покрытия кабины

Это обуславливает необходимость учета воздействия теплового излучения пожара при определении безопасных расстояний размещения пожарной техники и выборе позиций личного состава в ходе разработки оперативных планов пожаротушения объекта.

В условиях открытых пожаров и пожаров в производственных помещениях, которые сопровождаются проливом ГЖ и ЛВЖ в работах [4–7], предлагаются методики, уменьшающие трудозатраты в оценке воздействия теплового излучения фронта пламени. Однако анализ функционала предлагаемых программных комплексов позволяет сделать вывод об их избыточности, что в значительной степени обуславливает их завышенную стоимость, в то время как решение некоторых задач не предусмотрено [8]. К таким задачам относится оценка воздействия теплового излучения фронта пламени из производственного здания повышенной оконной проемности.

Возможная планировка такого здания показана на рис. 1.

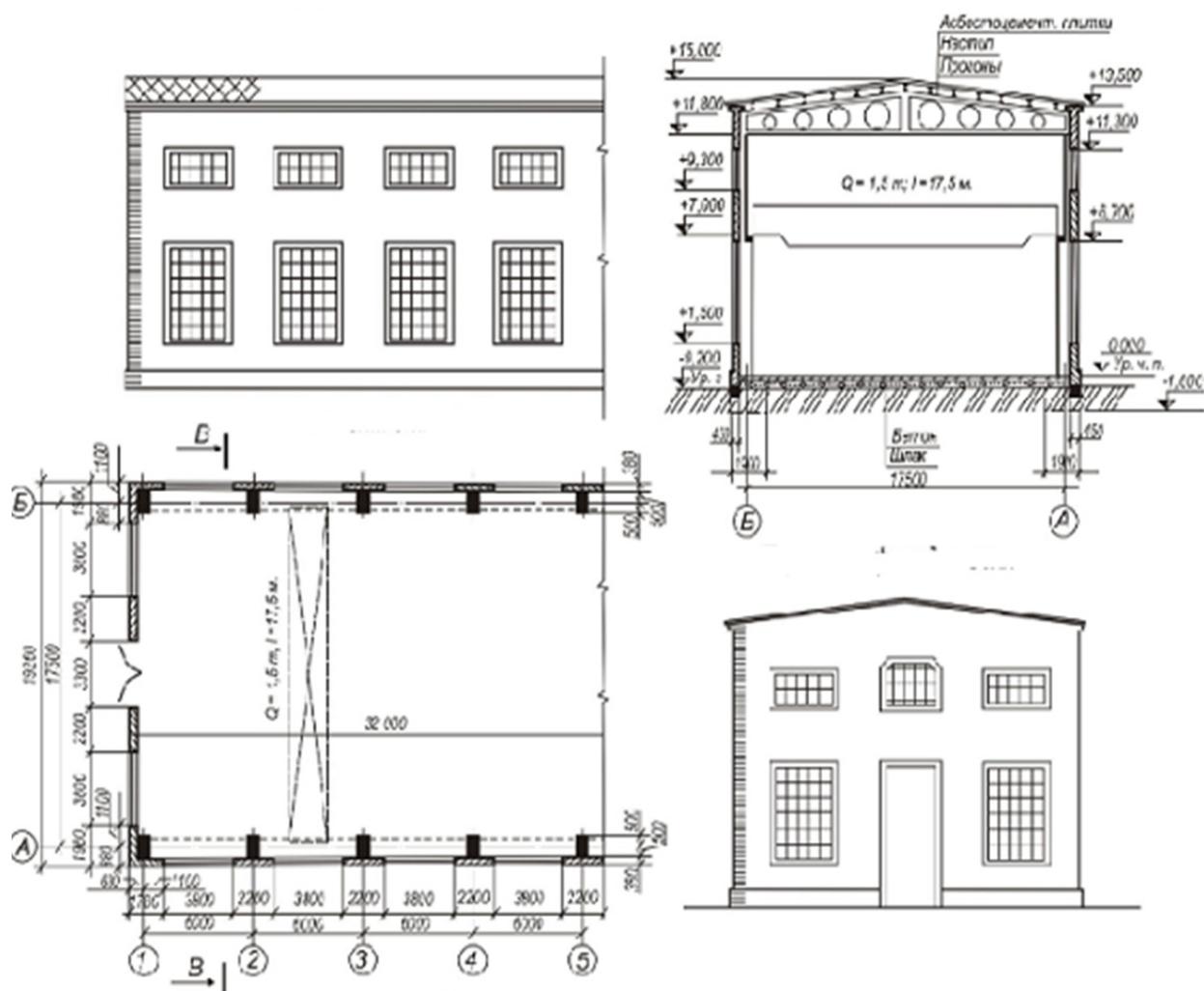


Рис. 1. Возможная планировка здания с повышенной оконной проемностью

### Методы исследования

Постановка задачи проводимого исследования предусматривает формирование алгоритма синтеза диаграммы направленности теплового излучения из здания с повышенной оконной проемности, в котором происходит горение пятна ГЖ или ЛВЖ.

«Дерево событий», описывающее совокупность возможных событий и их связей, показано на рис. 2.

Поскольку поражающее воздействие теплового излучения возникает при относительно значительной продолжительности, анализируется последовательность событий диффузионного горения ГЖ или ЛВЖ на поверхности пятна пролива.

Традиционные алгоритмы расчета параметров теплового излучения пожара при выбросе ГЖ или ЛВЖ основываются на условии, что образующееся пятно пролива жидкости площадью  $S$  имеет форму круга диаметром  $d_{эфф} = 2 \cdot R_o$  [9, 10]. Однако такая геометрия пролива характерна лишь при центральном расположении источника пролива, а если емкость или трубопровод расположен относительно недалеко от ограждающей конструкции, тогда пятно пролива приобретает форму усеченного круга (рис. 3 а и 3 б).



Рис. 2. Дерево событий, отображающее последовательность развития пожароопасной ситуаций при выбросе ГЖ или ЛВЖ с образованием пятна пролива (ПВС – пожаровоздушная смесь)

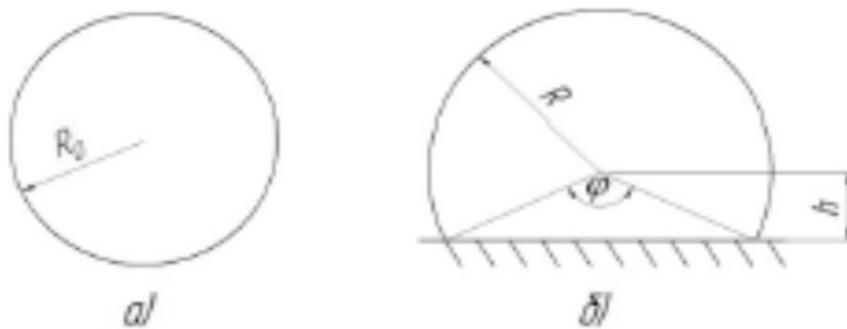


Рис. 3. Форма и размеры пятна разлива ГЖ или ЛВЖ:  
 а) круг – в случае отсутствия ограничений; б) усеченный круг в случае расположения ограждающей конструкции стены на расстоянии  $h$  от центра разлива

В предположении ограничения разлива ограждающей конструкцией в работе [11] представлена зависимость, которая связывает параметры теплового излучения для круговой формы пролива и пролива в форме усеченного круга:

$$q \cdot \left(\frac{h}{R_o}\right) = a \cdot \left(\frac{h}{R_o}\right)^2 + b \cdot \left(\frac{h}{R_o}\right) + c. \tag{1}$$

В эмпирической зависимости (1) значения коэффициентов  $a$  и  $b$  при проливе керосина или нефти приведены в табл. 2, а величина коэффициента  $c$  определяется дистанцией  $r$  между фронтом пламени горящей жидкости и тепловоспринимающей поверхностью. В силу нелинейной зависимости значения коэффициента  $c$  от формы пролива для интерполяции использовался метод Левенберга-Маркварда [12].

Таблица 2

Значения эмпирических коэффициентов  $a$ ,  $b$  и  $c$ 

Горящая жидкость	$a$ , кВт/м <sup>2</sup>	$b$ , кВт/м <sup>2</sup>	$c \cdot (r/R_0)$ , кВт/м <sup>2</sup>
Нефть	-24,11	15,30	$-6,92 \cdot (r/R_0) + 44,55$
Керосин	-19,02	5,38	$-9,62 \cdot (r/R_0) + 60,42$

Так учитывается фактор ассиметричности формы пятна пролива ГЖ и ЛВЖ, образующийся при ограничении процесса разлива взаиморасположением пятна и ограждающей конструкцией, отображенный на рис. 3 б.

Процесс испарения ГЖ или ЛВЖ с поверхности их разлива способствует образованию взрывоопасной концентрации ПВС, которая при наличии источника зажигания может привести к взрыву, следствием которого произойдет нарушение покрытия крыши и даже разрушение перекрытия. Учитывая разрушение значительной площади остекления в зданиях увеличенной оконной проемности, закрытое пространство трансформируется в открытое, тем самым формируется одно из необходимых условий развития пожара по сценарию «огненный шар» – ОШ.

Изучение хода реальных пожаров и аварий, описанных в работах [13–15], связанных с проливом ГЖ или ЛВЖ и последующим их горением условия развития пожара по сценарию ОШ, могут быть сформулированы следующим образом:

- для образования ОШ с пятна разлива ГЖ или ЛВЖ должно испариться значительная масса (более 1 000 кг), которая образует паровоздушное облако значительного объема;
- формирование ОШ, как правило, предваряется разгерметизацией производственного оборудования с полным разрушением технологических (магистральных) трубопроводов с обращением ГЖ или ЛВЖ;
- при выбросе турбулентного потока паракапельной смеси ГЖ или ЛВЖ в открытое пространство происходит формирование паровоздушного облака с последующим зажиганием такой смеси от внешнего источника.

Алгоритм расчета температурно-временной зависимости для пожара в производственном здании с повышенной оконной проемностью с использованием интегральной модели пожара представлен на рис. 4.

Условием реализации моделей, представленных в работах [13–15], является стехиометрическая концентрация ГЖ или ЛВЖ с кислородом воздуха, которая обеспечивает полное сгорание пролива, что способствует увеличению температуры на наружной поверхности ОШ от начальных значений до текущей температуры продуктов горения. При этом зависимостью температуры от координат на наружной поверхности ОШ пренебрегают. При оценке интенсивности теплового излучения с наружной поверхности ОШ исходят из того, что сумма его диаметра и высота над поверхностью соизмерима с высотой ограждающих конструкций, что предполагает диафрагмирование теплового излучения. Степень ослабления теплового излучения, а следовательно, и уровень воздействия теплового потока на личный состав и его пожарно-техническое вооружение, зависит от величины проемности производственного помещения и взаимного расположения ОШ, ограждающих конструкций и тепловоспринимающей поверхности.

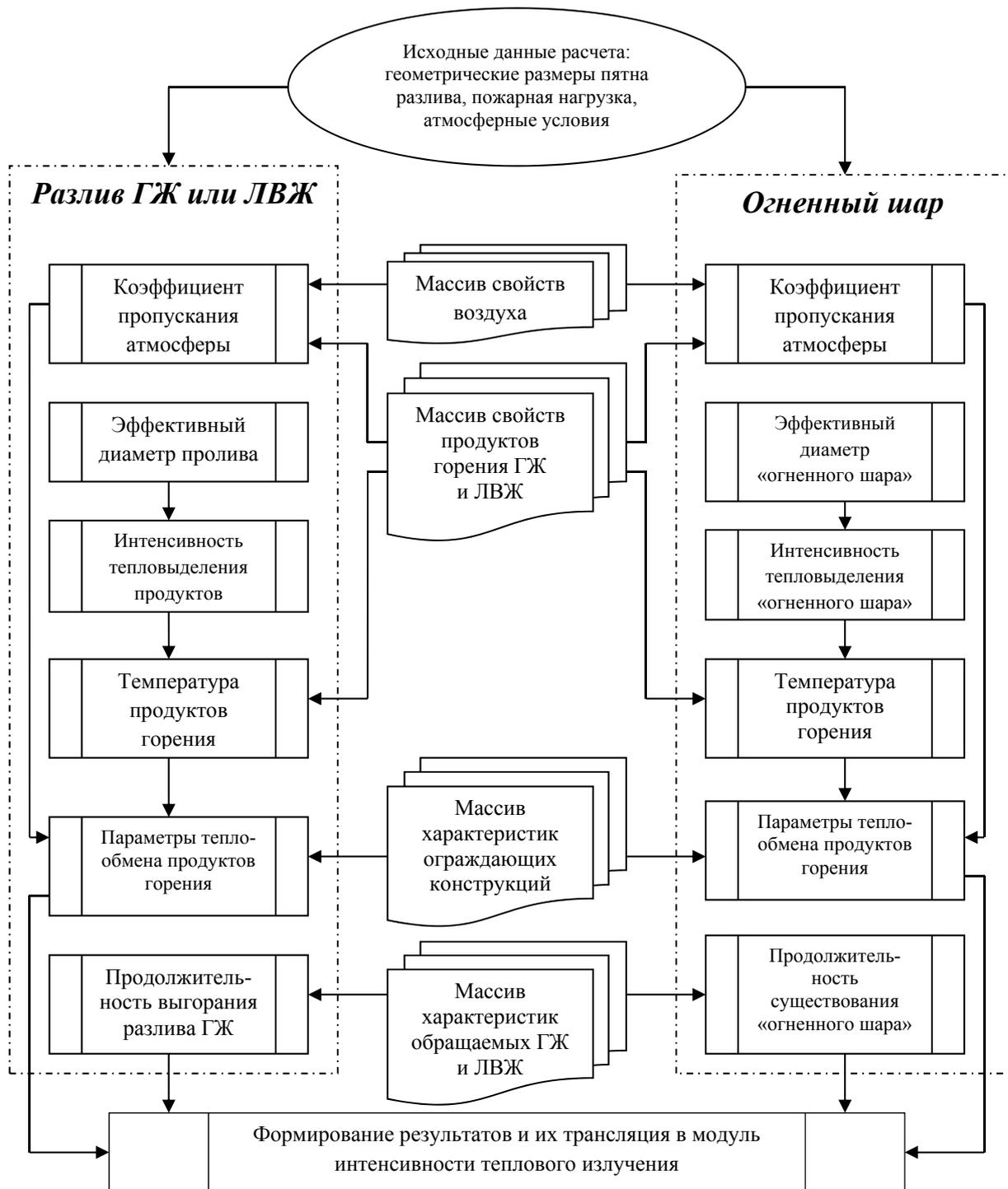


Рис. 4. Алгоритм расчета температурно-временной зависимости для пожара в ограждениях

Алгоритмы в оценке интенсивности теплового излучения открытых пожаров, в том числе и пожаров на наружных установках, регламентированы в действующих нормативных документах [9], однако их использование предусматривает определенные допущения:

- форма фронтальной излучающей поверхности может быть представлена в виде прямоугольника;

- величина площади этой поверхности не изменяется с изменением взаимного расположения излучающей и тепловоспринимающей поверхностей;

– у излучающих и тепловоспринимающих поверхностей нижние кромки располагаются на одном уровне.

Поскольку оконные проемы являются локализованными источниками излучения тепла, при этом параметры таких источников являются в значительной степени конгруэнтны, для нахождения значения интегрального углового коэффициента облученности  $\varphi_j$  в работе [16] предложена закономерность, иначе вполне применим принцип суперпозиции:

$$\varphi_j = (1 - \varepsilon_i) \cdot \varphi_{ik} + \sum_{j=1}^n (1 - \varepsilon_j) \cdot (1 - \varepsilon_i) \cdot \varphi_{ik} \cdot \varphi_{jk},$$

где  $\varphi_{ik}$ ,  $\varphi_{ij}$  – средние угловые коэффициенты облученности  $i$ -го источника на  $k$  и  $i$  поверхность на  $j$  соответственно;  $\varepsilon_i$  – степень черноты  $i$ -го источника;  $\varepsilon_j$  – степень черноты  $j$  поверхности.

На рис. 5 отображен случай, когда плоскость оконного проема, представляющая собой поверхность теплового излучения, располагается под углом  $\theta$  к тепловоспринимающей поверхности. Дальнейшие операции предполагают вычисление промежуточных величин  $a=h/L$  и  $b=w/L$ , где  $h$  и  $w$  – высота и ширина оконного проема соответственно, а  $L$  – дистанция между центрами теплоизлучающей и теплопоглощающей плоскостями.

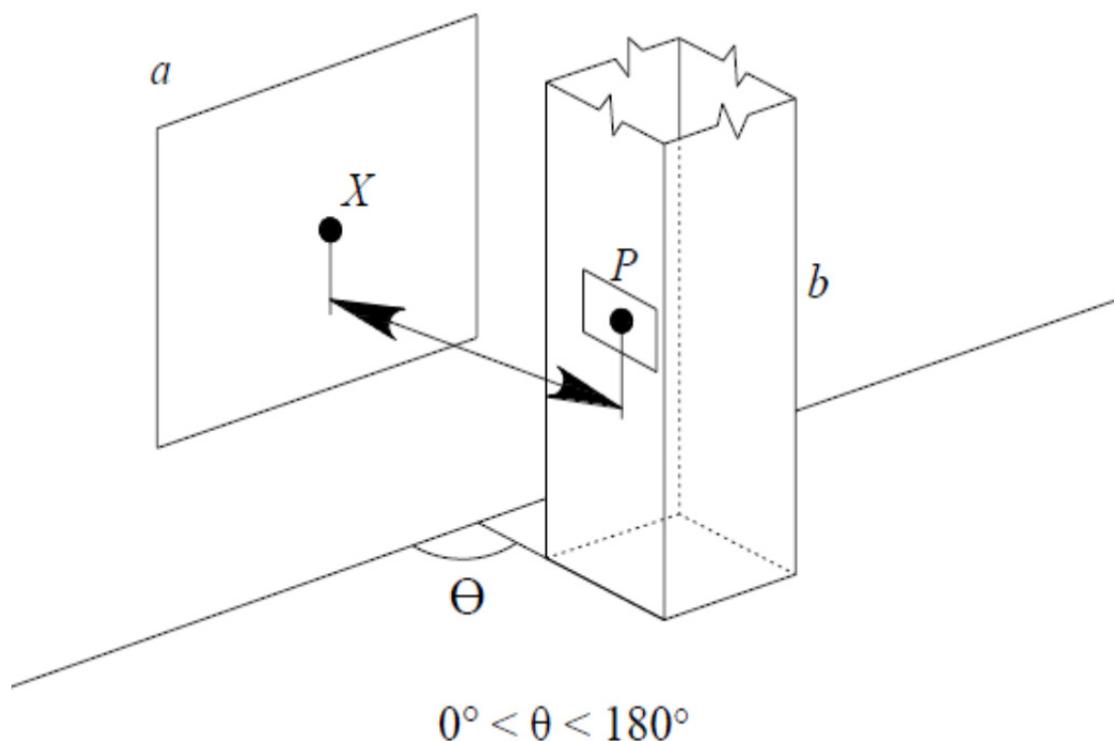


Рис. 5. Поверхность оконного проема и тепловоспринимающая поверхность находятся под углом  $\theta$

В работе [17] представлено уравнение, дающее возможность вычислить значение коэффициента облученности  $\varphi$  для произвольного расположения теплоизлучающей и теплопоглощающей поверхностей:

$$\varphi = \frac{1}{2\pi} \left[ \operatorname{arctg} a - \frac{1 - b \cdot \cos \Theta}{\sqrt{1 + b^2 - 2 \cdot b \cdot \cos \Theta}} \operatorname{arctg} \left( \frac{a}{\sqrt{1 + b^2 - 2 \cdot b \cdot \cos \Theta}} \right) \right] +$$

$$+ \frac{a \cdot \cos \Theta}{\sqrt{a^2 + \sin^2 \Theta}} \left[ \operatorname{arctg} \left( \frac{b - \cos \Theta}{\sqrt{a^2 + \sin^2 \Theta}} \right) + \operatorname{arctg} \left( \frac{\cos \Theta}{\sqrt{a^2 + \sin^2 \Theta}} \right) \right].$$

Учет эффекта диафрагмирования потока теплового излучения через оконные проемы, позволяющий увеличить точность расчета, требуется для пожаров в производственных зданиях, когда толщина их внешних стен может достигать значения в несколько десятков сантиметров. Влияние диафрагмирования потока теплового излучения заключается в поглощении и отражении внутренними поверхностями оконных проемов и характеризуется коэффициентом диафрагмирования  $\Phi$ , который численно равен отношению потока теплового излучения, падающего на внутреннюю поверхность оконного проема к потоку, выходящему через срез внешней поверхности. Эмпирическое уравнение позволяет вычислить коэффициент диафрагмирования оконным проемом прямоугольного сечения:

$$\Phi = \frac{1 + \varphi}{2} - \left( \frac{1 - \varphi}{6} \right)^4.$$

Интенсивность теплового излучения через прямоугольный оконный проем, если известна его высота, ширина и толщина ограждающей конструкции, может быть оценена при помощи номограмм [18]. Если на ограждающей конструкции расположено несколько оконных проемов, то процесс построения диаграммы направленности потоков теплового излучения, которую можно использовать для технического обоснования решений при разработке оперативных планов тушения пожара на промышленных зданиях повышенной оконной проемности, можно формализовать в виде алгоритма, представленного на рис. 6.

Для расширения возможности применения практическими работниками федеральной противопожарной службы программного комплекса для ввода исходных параметров и отображения результатов расчета был применен интерфейс электронной таблицы MS Excel, а расчетный модуль был реализован в виде макроса Visual Basic. Интерфейс процедуры ввода параметров пожарной нагрузки при решении задачи формирования диаграммы направленности теплового излучения пожара в промышленном здании увеличенной оконной проемности представлен на рис. 7. Программное исполнение информационного модуля было основано на решениях, представленных в работе [19].

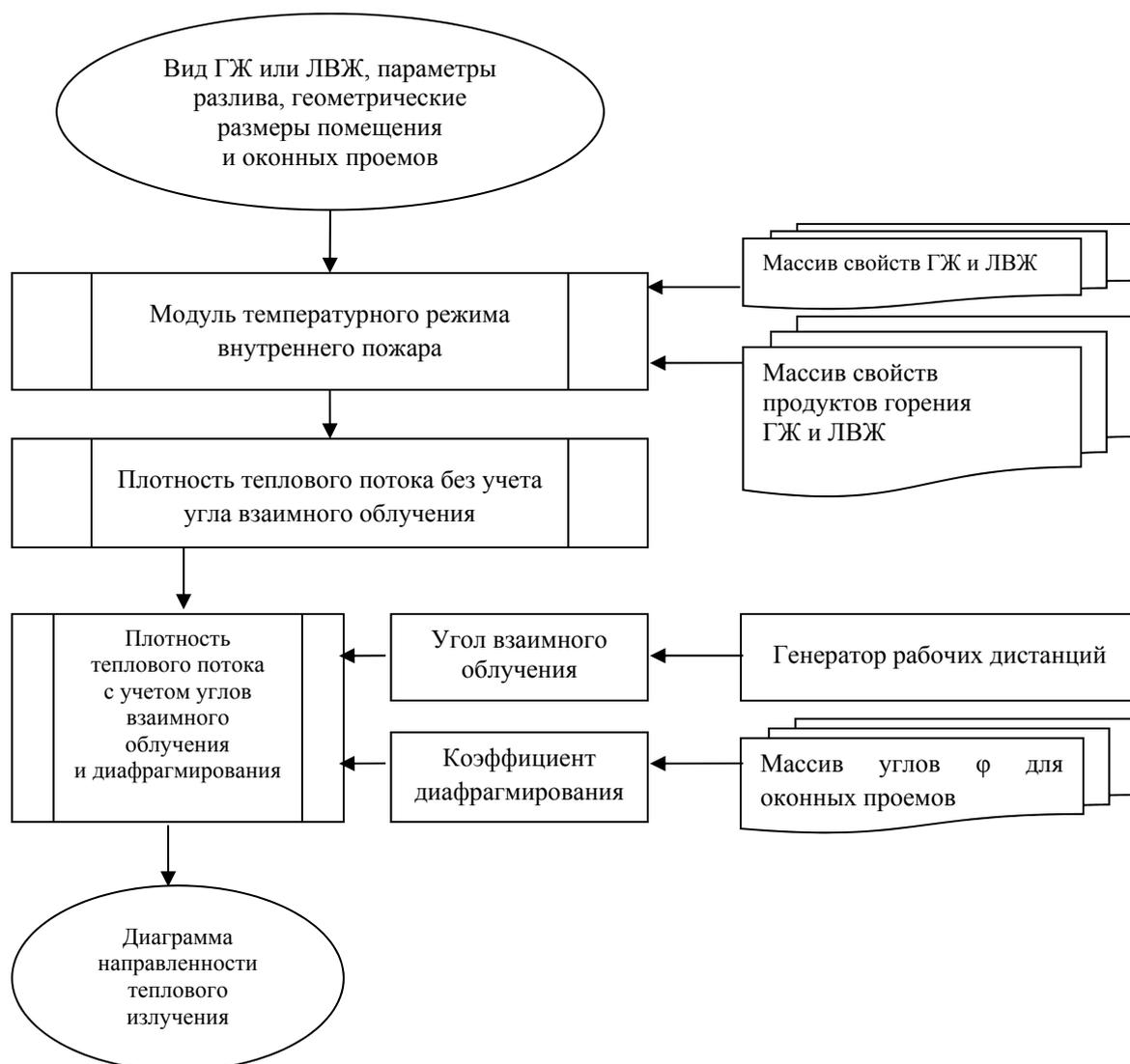


Рис. 6. Алгоритм расчета диаграммы направленности теплового излучения через проемы в ограждениях

**Параметры пожарной нагрузки**

	Вид горючего материала	Масса, кг	Низшая теплота сгорания $Q_n$ , Мдж/кг	Удельная скорость выгорания, кг/(м <sup>2</sup> ·с)
№1	Дизельное топливо; соляр	1600	45,4	0,042
№2	Каучук СКС	400	43,89	0,013
№3	Сырье и изделия из синтетического каучука	1000	43	0,011
№4				

**Примечание:** Необходимо ввести 2 параметра:  
 - наименование групп помещений или зон расположения пожарной нагрузки;  
 - плотность пожарной нагрузки.

**Выбор**

Рис. 7. Интерфейс ввода параметров пожарной нагрузки на основе базы данных функционально-однотипных помещений (СКС – синтетический каучук строительный; соляр – солярка)

### Результаты исследования и их обсуждение

В качестве модельной для верификации программного продукта была выбрана задача расчета интенсивности теплового излучения пожара в производственном здании, изображенном на рис. 1. Геометрические характеристики ограждающих конструкций и проемов в них производственного здания представлены в табл. 3. Высота нижней кромки нижнего ряда оконных проемов относительно поверхности земли равна 1 500 мм, а верхнего ряда оконных проемов соответственно 7 800 мм.

Таблица 3

#### Геометрические характеристики ограждающих конструкций

Элементы конструкции	Ширина, мм	Высота, мм	Толщина, мм	Число
Фронтальная стена	24000	11800	150	2
Боковая стена	17500	11800	150	2
Перекрытие	24000	19200	150	1
Окна нижнего ряда	3000	5500	150	4
Окна верхнего ряда	3000	2000	150	4
Дверные проемы	3300	7000	100	2

Примером сценария пожара принята ситуация, образовавшаяся в результате пролива 20 000 кг дизельного топлива с пятном площадью 40 м<sup>2</sup> без ограничения разлива боковой стеной. Кроме дизельного топлива в пожарную нагрузку входит также 10 000 кг каучука СКС и готовых резинотехнических изделий. Результаты численного моделирования температурного режима такого пожара представлены на рис. 8.

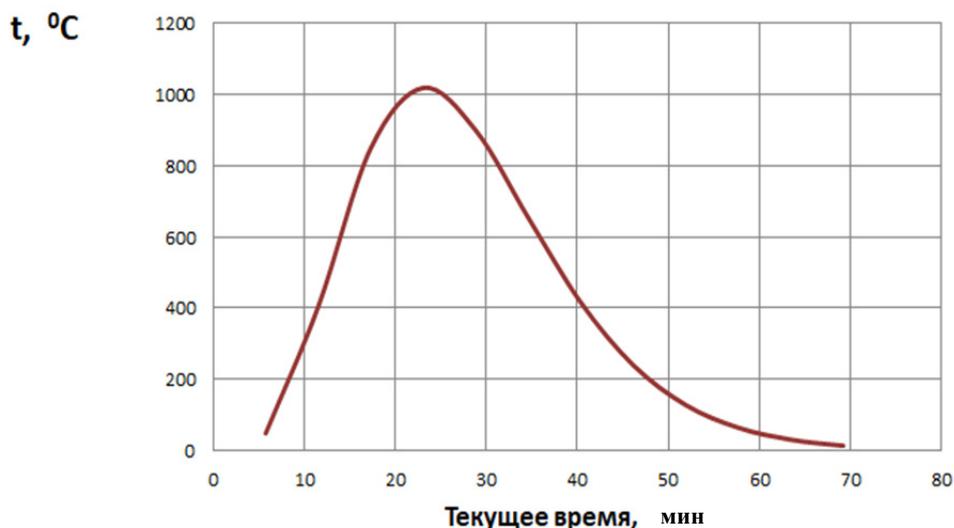


Рис. 8. Временная зависимость среднеобъемной температуры продуктов горения

Зависимость величины плотности потока теплового излучения по фронту здания для различных расстояний до излучающей поверхности применительно к максимальному значению температуры продуктов горения представлена на рис. 9.

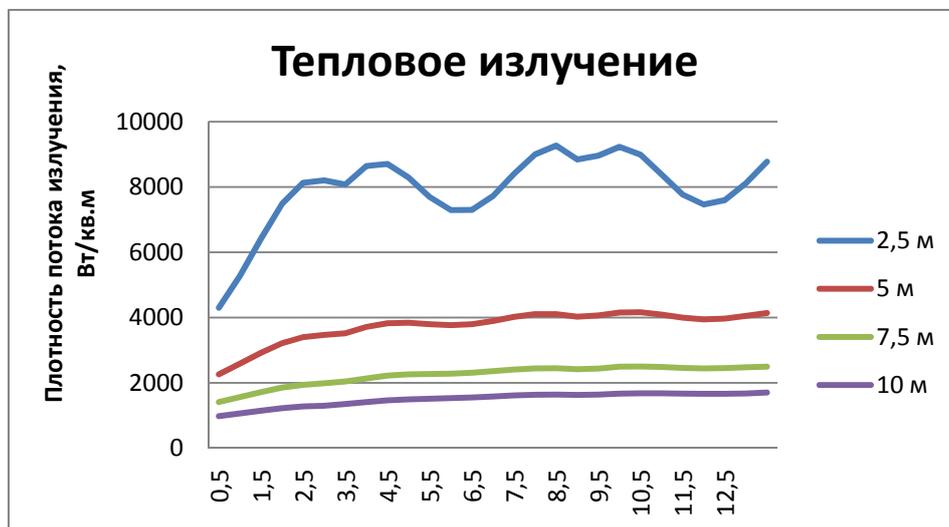


Рис. 9. Плотность потока теплового излучения через оконные проемы по фронту в зависимости от удаления до угла здания

Результаты численного моделирования с использованием представленного программного продукта позволяют сделать вывод, что действие эффекта диафрагмирования теплового излучения оконными проемами ослабляется по мере удаления от фронта теплоизлучающей поверхности и становится ничтожным на расстоянии пять метров и более.

## Заключение

Таким образом, разработанный программный комплекс является клиент-серверным Windows Forms приложением, которое позволяет выполнять расчет и оценку интенсивности излучения при внутреннем пожаре на промышленном объекте, является последствием аварийного разлива ГЖ или ЛВЖ. Представленный программный продукт позволяет дать численную оценку интенсивности теплового излучения на базе учета взаимного расположения теплоизлучающей и теплопоглощающей поверхностей, а также характеристик фронта пламени и горючих материалов, определяемых размещением оборудования внутри промышленного объекта и специфике конструктивно-планировочных решений промышленного здания. Также он позволяет оценить минимальное безопасное расстояние работы личного состава на пожаре и выбор позиций при расстановке пожарной техники. Существует возможность построения графической зависимости плотности теплового потока во времени и пространстве.

### Список источников

1. Глубина тушения пожара как основание для ресурсного обоснования сил и средств пожарных подразделений / А.Н. Денисов [и др.] // Интернет-журнал «Технологии техносферной безопасности». URL: <http://ipb.mos.ru/ttb> (дата обращения: 26.04.2022).
2. Лазаренков А.М., Иванов И.А., Садоха М.А. Исследование теплового фактора условий труда в литейном производстве // Литье и металлургия. 2022. № 2. С. 123–129. DOI: 10.21122/1683-6065-2022-2-123-129.
3. Мамаев В.В., Соколянский В. Анализ результатов экспериментальных исследований стойкости кабин пожарных автомобилей к внешним тепловым воздействиям // Вестник института гражданской защиты Донбасса. 2015. Вып. 2 (2). С. 16–25.
4. TOXI+Risk. URL: <https://toxi.ru/produkty/programmnyikompleks-toxirisk-5> (дата обращения: 26.04.2022).
5. Программный комплекс ПК «Русь» «Пожарная безопасность». URL: <https://reestr.minsvyaz.ru/reestr/100407/> (дата обращения: 20.02.2022).
6. ANSYS FLUENT Solver Modeling Guide. Release 14.0. Pennsylvania, Canonsburg, 2011. 594 p.
7. Мусин Р.А., Телегина М.В., Янников И.М. Программа для расчета интенсивности теплового излучения при пожарах, связанных с разливом легковоспламеняющихся и горючих жидкостей: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019616242. Дата регистр. 21 мая 2019 г.
8. Телегина М.В., Янников И.М. Реализация информационной системы расчета теплового излучения на пожарах // Интеллектуальные системы в производстве. 2019. Т. 17. № 4. С. 123–128.
9. НПБ 105-03. Нормы пожарной безопасности. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности. М.: МЧС России, 2003. 31 с.
10. Пособие по применению НПБ 105-95 «Определение категорий помещений и зданий по взрывоопасной и пожарной опасности» при рассмотрении проектно-сметной документации / Ю.Н. Шебеко [и др.]. М.: ВНИИПО МЧС России, 2014. 119 с.
11. Хасанов Р.М., Лиштаков А.А., Чистов Ю.С. Влияние разлива горючей жидкости, ограниченного стеной на интенсивность теплового излучения в зависимости от расстояния до очага пожара // Казань. Вестник технологического университета. 2017. Т. 20. № 16. С. 99–101.
12. Algorithms Lewenberg-Markward // Machine Learning. URL: <http://machinelearning.ru/wiki/index.php> (дата обращения: 26.11.2022).
13. High R.W. The Saturn fireball / R.W. High // Annals of the New York Academy of Science. 1968. Т. 152. № 1. С. 441–451.

14. Bader B.E., Donaldson A.B., Hardy H.C. Liquid-propellant rocket abort fire model // *Journal of Spacecraft and Rockets*. 1971. Т. 8. № 12. С. 1216–1219.
15. Hasegawa K., Sato K. Experimental investigation of the unconfined vapor-cloud explosions of hydrocarbons // *Technical memorandum of Fire Research Institute*. Japan: Fire Research Institute: Fire Agency. 1978. № 12.
16. Макаров А.Н. Законы теплообмена электрической дуги и факела в металлургических печах и энергетических установках: монография. Тверь: ТвГТУ, 2012. 164 с.
17. Гоман П.Н., Соболевская Е.С. Разработка программы расчета интенсивности теплового излучения на пожаре // Интернет-журнал «Технологии техносферной безопасности». URL: <http://ipb.mos.ru/ttb> (дата обращения: 26.11.2022).
18. Романенко П.Н., Бубырь Н.Ф., Башкирцев М.П. Теплопередача в пожарном деле. М.: ВИПТШ МВД СССР, 1969.
19. Романов Н.Н., Кузьмин А.А., Пермяков А.А. Справочно-вычислительный модуль – пожарная теплофизика: Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2020613155, 11.03.2020. Заявка № 2020612037 от 26.02.2020.

### References

1. Glubina tusheniya pozhara kak osnovanie dlya resursnogo obosnovaniya sil i sredstv pozharnyh podrazdelenij / A.N. Denisov [i dr.] // Интернет-журнал «Технологии техносферной безопасности». URL: <http://ipb.mos.ru/ttb> (дата обращения: 26.04.2022).
2. Lazarenkov A.M., Ivanov I.A., Sadoha M.A. Issledovanie teplovogo faktora uslovij truda v litejnom proizvodstve // *Lit'e i metallurgiya*. 2022. № 2. S. 123–129. DOI: 10.21122/1683-6065-2022-2-123-129.
3. Mamaev V.V., Sokolyanskij V. Analiz rezul'tatov eksperimental'nyh issledovanij stojkosti kabin pozharnyh avtomobilej k vneshnim teplovym vozdeystviyam // *Vestnik instituta grazhdanskoj zashchity Donbassa*. 2015. Vyp. 2 (2). S. 16–25.
4. TOXI+Risk. URL: <https://toxi.ru/produkty/programmnyikompleks-toxirisk-5> (дата обращения: 26.04.2022).
5. Programmnyj kompleks PK «Rus'» «Pozharnaya bezopasnost'». URL: <https://reestr.minsvyaz.ru/reestr/100407/> (дата обращения: 20.02.2022).
6. ANSYS FLUENT Solver Modeling Guide. Release 14.0. Pennsylvania, Canonsburg, 2011. 594 p.
7. Musin R.A., Telegina M.V., Yannikov I.M. Programma dlya rascheta intensivnosti teplovogo izlucheniya pri pozharah, svyazannyh s razlivom legkovosplamenyayushchihsya i goryuchih zhidkostej: Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM № 2019616242. Data registr. 21 maya 2019 g.
8. Telegina M.V., Yannikov I.M. Realizaciya informacionnoj sistemy rascheta teplovogo izlucheniya na pozharah // *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2019. Т. 17. № 4. S. 123–128.
9. NPB 105-03. Normy pozharnoj bezopasnosti. Opredelenie kategorij pomeshchenij, zdaniy i naruzhnyh ustanovok po vzryvopozharnoj i pozharnoj opasnosti. М.: MCHS Rossii, 2003. 31 s.
10. Posobie po primeneniyu NBP 105-95 «Opredelenie kategorij pomeshchenij i zdaniy po vzryvoopasnoj i pozharnoj opasnosti» pri rassmotrenii proektno-smetnoj dokumentacii / Yu.N. Shebeko [i dr.]. М.: VNIPO MCHS Rossii, 2014. 119 s.
11. Hasanov R.M., Lishtakov A.A., Chistov Yu.S. Vliyanie rozliva goryuchej zhidkosti, ograniченного stenoj na intensivnost' teplovogo izlucheniya v zavisimosti ot rasstoyaniya do ochaga pozhara // *Kazan'. Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*. 2017. Т. 20. № 16. S. 99–101.
12. Algorithms Lewenberg-Markward // *Machine Learning*. URL: <http://machinelearning.ru/wiki/index.php> (дата обращения: 26.11.2022).

13. High R.W. The Saturn fireball / R.W. High // Annals of the New York Academy of Science. 1968. Т. 152. № 1. S. 441–451.
14. Bader B.E., Donaldson A.B., Hardy H.C. Liquid-propellant rocket abort fire model // Journal of Spacecraft and Rockets. 1971. Т. 8. № 12. S. 1216–1219.
15. Hasegawa K., Sato K. Experimental investigation of the unconfined vapor-cloud explosions of hydrocarbons // Technical memorandum of Fire Research Institute. Japan: Fire Research Institute: Fire Agency. 1978. № 12.
16. Makarov A.N. Zakony teploobmena elektricheskoy dуги i fakela v metallurgicheskikh pechah i energeticheskikh ustanovkakh: monografiya. Tver': TvGTU, 2012. 164 s.
17. Goman P.N., Sobolevskaya E.S. Razrabotka programmy rascheta intensivnosti teplovogo izlucheniya na pozhare // Internet-zhurnal «Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti». URL: <http://ipb.mos.ru/ttb> (data obrashcheniya: 26.11.2022).
18. Romanenko P.N., Bubyr' N.F., Bashkircev M.P. Teploperedacha v pozharnom dele. M.: VIPTSH MVD SSSR, 1969.
19. Romanov N.N., Kuz'min A.A., Permyakov A.A. Spravochno-vychislitel'nyj modul' – pozharnaya teplofizika: Svidetel'stvo o registracii programmy dlya EVM RU 2020613155, 11.03.2020. Zayavka № 2020612037 ot 26.02.2020.

**Информация о статье:**

Статья поступила в редакцию: 20.09.2023; одобрена после рецензирования: 04.12.2023; принята к публикации: 05.12.2023

**Information about the article:**

The article was submitted to the editorial office: 20.09.2023; approved after review: 04.12.2023; accepted for publication: 05.12.2023

*Сведения об авторах:*

**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](mailto:kaa47@mail.ru), <http://orcid.org/0000-0002-0297-2984>, SPIN-код: 3604-7853

**Пермяков Алексей Александрович**, начальник кафедры физико-технических основ обеспечения пожарной безопасности Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат педагогических наук, доцент, <http://orcid.org/0000-0002-2081-6934>, SPIN-код: 5444-3350

**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](mailto:nik57nik@mail.ru), <http://orcid.org/0000-0001-8254-9424>, SPIN-код: 4828-4313

*Information about authors:*

**Kuzmin Anatoly A.**, associate professor of the department of physical and technical fundamentals of fire safety of the 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](mailto:kaa47@mail.ru), <http://orcid.org/0000-0002-0297-2984>, SPIN: 3604-7853

**Permyakov Alexey A.**, chief of the department of physical and technical fundamentals of fire safety at the Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), candidate of pedagogical sciences, associate professor, <http://orcid.org/0000-0002-2081-6934>, SPIN: 5444-3350

**Romanov Nikolay N.**, associate professor of the department of physical and technical fundamentals of fire safety of the 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](mailto:nik57nik@mail.ru), <http://orcid.org/0000-0001-8254-9424>, SPIN: 4828-4313