

# Об оценке эффективности спринклерной автоматической установки пожаротушения

© Л.Т. Танклевский<sup>1, 2</sup>, А.А. Таранцев<sup>2, 3</sup> ✉, О.А. Зыбина<sup>1</sup>, И.А. Бабилов<sup>1</sup>

- <sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29)
- <sup>2</sup> Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т, 149)
- <sup>3</sup> Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук (Россия, 199178, г. Санкт-Петербург, 12-я Линия Васильевского острова, 13)

## АННОТАЦИЯ

**Введение.** Ввиду случаев неэффективного срабатывания спринклерных автоматических установок пожаротушения (АУП), спроектированных в соответствии с действующими нормами, возникает необходимость решения трех задач: 1) выявления причин неэффективного срабатывания; 2) экспертизы смонтированных АУП на предмет успешного срабатывания при пожаре; 3) формулирования необходимых рекомендаций проектировщикам АУП. Эти задачи могут быть решены на основе разработанного Приложения В к новому СП 485.13130.2020.

**Верхняя критическая высота установки спринклеров.** На основе известных моделей развития пожара и динамики нагрева колбы спринклера АУП установлено, что существует предельная высота помещения, превышение которой не позволяет спринклерам активироваться своевременно. Это приводит к запаздыванию срабатывания АУП, вследствие чего площадь пожара превышает защищаемую спринклером площадь.

**Допустимая высота установки спринклеров.** Анализ сценариев пожара и полученные модели нагрева колбы позволяют с большей достоверностью определить возможность своевременного срабатывания АУП. Это, в свою очередь, позволяет решить три вышеперечисленные задачи.

**Активация спринклеров от дифференциального теплового извещателя.** В случае, когда для данного помещения установлено, что использование АУП с активацией спринклеров от теплового разрушения колбы неэффективно, рассмотрена возможность принудительной активации АУП от дифференциального теплового извещателя, реагирующего на скорость роста температуры в помещении. На основе полученных соотношений определена возможная высота помещений, защищаемых АУП с такими извещателями.

На примере выставочного зала показана возможность решения задач выявления причины неэффективного срабатывания АУП, экспертизы смонтированных АУП и рекомендаций проектировщикам.

**Выводы.** С использованием Приложения В к новому СП 485.13130.2020 и приведенных моделей становится возможным решить вышеперечисленные задачи.

**Ключевые слова:** пожар; ороситель; нагрев колбы спринклера; критическая высота; принудительная активация

**Для цитирования:** Танклевский Л.Т., Таранцев А.А., Зыбина О.А., Бабилов И.А. Об оценке эффективности спринклерной автоматической установки пожаротушения // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 1. С. 42–53. DOI: 10.22227/PVB.2021.30.01.42-53

✉ Таранцев Александр Алексеевич, e-mail: t\_\_54@mail.ru

## The efficiency assessment of an automatic sprinkler system

© Leonid T. Tanklevskiy<sup>1, 2</sup>, Alexander A. Tarantsev<sup>2, 3</sup> ✉, Olga A. Zyбина<sup>1</sup>, Igor A. Babikov<sup>1</sup>

- <sup>1</sup> Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University (Polytechnicheskaya St., 29, Saint Petersburg, 195251, Russian Federation)
- <sup>2</sup> Saint-Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation)
- <sup>3</sup> Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science (12-ya Liniya Vasil'evskogo ostrova, 13, Saint Petersburg, 199178, Russian Federation)

## ABSTRACT

**Introduction.** Cases of ineffective activation of automatic sprinkler fire-fighting systems (AFFS), designed pursuant to current standards, have made it necessary to address the following three issues: a) identification of reasons for ineffective activation; b) examination of AFFS systems to ensure their successful activation in case of fire; c) making a list of recommendations for AFFS designers. These issues can be resolved with reference to Appendix B to new SP (Construction Regulations) 485.13130.2020.

**Maximal critical height of sprinkler placement.** Models of fire development were used to design the roof height limit and the AFFS bulb heating time. If the ceiling height exceeds the limit value, sprinklers cannot be activated in a timely manner. This leads to delays in the AFFS activation, and, as a result, the fire area exceeds the one safeguarded by the sprinkler.

**Acceptable sprinkler height.** The analysis of fire scenarios and bulb heating models allows to more accurately project the feasibility of timely AFFS activation. This, in turn, allows to solve the three above listed problems.

**Using a differential heat detector to activate sprinklers.** If it is established that the use of the AFFS, activating sprinklers by means of thermal destruction of a bulb, is ineffective in a given room, the feasibility of forced AFFS activation using a differential heat detector responding to the temperature rise in a room may be considered. The ratios, thus obtained, are applied to identify the acceptable height of premises protected by the AFFS equipped with such detectors. Problem solutions, including the identification of the reason for the ineffective operation of the AFFS, examination of the AFFS in operation, and provision of recommendations to designers, are demonstrated using the exhibition hall as an example.

**Conclusions.** The above-mentioned problems are resolvable with the help of Appendix B to new Construction Regulations 485.13130.2020 and the above models.

**Keywords:** fire; sprinkler system; sprinkler bulb heating; critical height; forced activation

**For citation:** Tanklevskiy L.T., Tarantsev A.A., Zybina O.A., Babikov I.A. The efficiency assessment of an automatic sprinkler system. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(1):42-53. DOI: 10.22227/PVB.2021.30.01.42-53 (rus).

✉ Alexander Alexeevich Tarantsev, e-mail: t\_\_54@mail.ru

## Введение

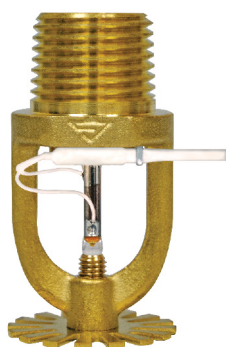
Автоматические установки пожаротушения (АУП)<sup>1</sup> являются важной составляющей систем противопожарной защиты объектов. Важное место среди них занимают спринклерные водяные АУП с активацией посредством теплового разрушения запирающей колбы<sup>2</sup> (рис. 1). Проектирование таких АУП предполагает установку спринклеров в припотолочной зоне защищаемого помещения при условии защиты площади  $S_{лик}$  каждым спринклером. Этим вопросам посвящены работы отечественных и зарубежных исследователей [1–18].

<sup>1</sup> СП 5.13130.2009. Системы противопожарной защиты (СППЗ). Установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования : утвержден и введен в действие Приказом МЧС России от 25 марта 2009 г. № 175.

<sup>2</sup> СТО 420541.00 (ВНПБ 40-16). Автоматические установки водяного пожаротушения АУП-Гепест. Проектирование : утвержден 16 марта 2015 г. председателем совета директоров группы компаний «Гепест» ; принят 1 марта 2016 г. ФГБУ ВНИИПО МЧС России.

Тем не менее эксплуатация и функциональное применение спринклерных АУП выявили следующую проблему: по данным ВНИИПО МЧС России до 30 % АУП в случае пожара либо не срабатывают, либо, сработав, не выполняют свои функции. Если первая часть проблемы может объясняться отказами компонентов АУП, то вторая представляет собой парадоксальную ситуацию. В самом деле, как устанавливается впоследствии, такие АУП исправны на момент пожара, спроектированы в соответствии с предъявляемыми требованиями<sup>1</sup>, качественно смонтированы и квалифицированно обслуживаются с необходимой периодичностью, срабатывают при пожаре, но пожар не могут ни потушить, ни даже локализовать, ради чего и создавались.

После анализа особенностей развития пожара [16–28] объяснение такому парадоксу нашел автор данной статьи. В самом деле, при большой высоте размещения спринклеров их запирающие термочувствительные колбы ввиду охлаждения конвек-



a



b

**Рис. 1.** Спринклерный ороситель «Аква-Гепест» с принудительным пуском (a) и АУП в действии (b)

**Fig. 1.** Aqua-Gefest sprinkler that has a forced activation system (a) and the sprinkler system in operation (b)

тивных продуктов горения не успевают прогреться до температуры активации  $T_{\text{насп}}$  на момент, когда вся защищаемая спринклером площадь  $S_{\text{лик}}$  будет полностью охвачена пламенем. Другими словами, при активации спринклера он подавит только часть площади пожара  $S_{\text{п}}$ , а на оставшейся части пожар будет развиваться, пока не сработает соседний спринклер, и т.д., и т.п., вплоть до включения всех спринклеров (так как срабатывание спринклеров будет запаздывать относительно роста площади пожара  $S_{\text{п}}$ ) или пока не придут пожарные<sup>3, 4</sup> и не ликвидируют пожар.

Таким образом, существует некоторая предельная высота защищаемого помещения, не оговоренная в нормативном документе<sup>1</sup>, выше которой установка спринклеров бессмысленна, — АУП будет срабатывать, но свою функцию не выполнит. Также важным является определение высоты установки спринклеров, когда очаг пожара может быть смещен относительно вертикальной оси спринклера вплоть до худшего случая, когда очаг окажется на равном удалении от нескольких ближайших спринклеров.

Для учета этих особенностей проектирования АУП было разработано Приложение В «Методика оценки возможности использования спринклерной АУП» к своду правил (СП)<sup>5</sup> (далее — Методика). Данная Методика может рассматриваться как рекомендательная и предназначена для решения следующих задач: выявление причины неэффективного срабатывания АУП; экспертиза действующей АУП

на предмет эффективности ее срабатывания при возможном пожаре и проектирование АУП.

Представляется необходимым дать некоторые пояснения и количественные оценки применительно к Приложению В к СП<sup>5</sup> (далее используются те же обозначения, что и в Приложении В).

### Верхняя критическая высота установки спринклера

Известно эмпирическое выражение для определения температуры продуктов горения  $T_{\text{г}}$  вблизи припотолочной зоны горизонтального перекрытия помещения высотой  $H$  (рис. 2), где могут устанавливаться спринклеры с колбовой активацией [2]:

$$T_{\text{г}} - T_0 = K_{\text{т}}(H, r)Q^{2/3}, \quad (1)$$

где  $T_0$  — начальная температура вблизи перекрытия, °C;

$Q$  — мощность тепловыделения пожарной нагрузки;

$r$  — проекционное расстояние от оси центра очага пожара до места установки спринклера (здесь и далее единицы измерения в СИ).

Коэффициент  $K_{\text{т}}(H, r)$  имеет вид:

$$K_{\text{т}}(H, r) = \begin{cases} \frac{16,9}{H^{5/3}} & \text{при } H > 5,577 r; \\ \frac{5,3742}{Hr^{2/3}} & \text{при } H \leq 5,577 r. \end{cases} \quad (2)$$

Преобразовав выражения (1) и (2) относительно  $H$  и положив  $\Delta T = T_{\text{г}} - T_0$ , получим выражение для критической высоты  $H_{\text{кр}}$ , выше которой температура  $T_{\text{г}}$  в припотолочной зоне не превысит величины  $T_0 + \Delta T$ :

$$H_{\text{кр}} = \min \left( \frac{5,4542Q^{0,4}}{\Delta T^{0,6}}, \frac{5,3742}{\Delta T} \left( \frac{Q}{r} \right)^{2/3} \right). \quad (3)$$

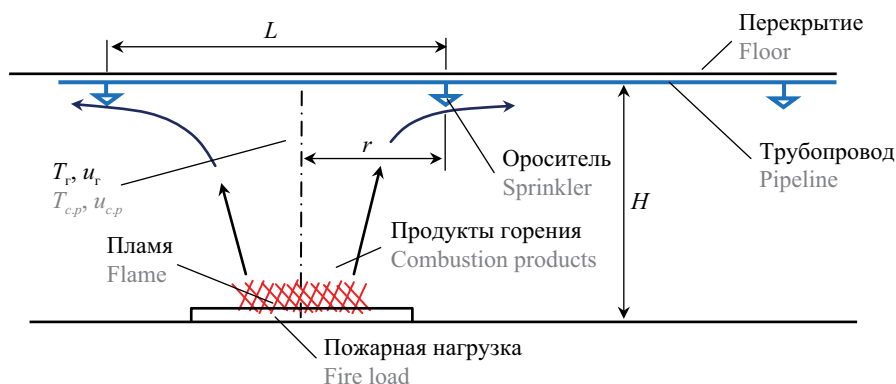


Рис. 2. Расчетная схема

Fig. 2. Design pattern

В случае пожара класса В<sup>3</sup> (пролив легковоспламеняющейся (ЛВЖ) или горючей (ГЖ) жидкости на постоянной площади) тепловыделение может быть постоянно:  $Q = \text{const}$ , а при пожаре класса А:

$$Q = qS_{\text{лик}}, \quad (4)$$

где  $q$  — удельное тепловыделение, зависящее от вида пожарной нагрузки.

На начальной стадии пожара динамику его площади  $S_{\text{п}}(t)$  можно оценить по выражению

$$S_{\text{п}}(t) = k_{\text{ф}}(Vt)^2, \quad (5)$$

где  $V$  — линейная скорость распространения пожара по горизонтальной поверхности пожарной нагрузки;

$k_{\text{ф}}$  — коэффициент формы (при круговой форме пожара  $k_{\text{ф}} = \pi$ );

$t$  — время, отсчитываемое от начала пожара.

В частном случае, когда центр очага пожара находится непосредственно под спринклером (т.е.  $r = 0$ ), из (2) и (3) можно найти предельно возможную высоту:

$$H_{\text{кр}} = 5,4542 \frac{Q^{0,4}}{\Delta T^{0,6}}. \quad (6)$$

Физический смысл величины  $H_{\text{кр}}$  в том, что спринклер, установленный на высоте, большей  $H_{\text{кр}}$ , колба которого активируется при достижении температуры  $T_{\text{г}} \geq T_{\text{пасп}}$  ( $T_{\text{пасп}}$  — паспортное значение номинальной температуры срабатывания спринклерного оросителя с колбой) при начальной температуре  $T_0$ , **никогда** не сможет потушить очаг пожара площадью  $S_3$ , даже находящийся непосредственно под спринклером. Другими словами, мощность  $Q$  этого очага будет недостаточной, чтобы на высоте установки спринклера  $H_{\text{кр}}$  температура продуктов горения в припотолочной зоне достигла величины  $T_{\text{г}}$ , поскольку площадь пожара  $S_{\text{п}}$ , приводящая к активации спринклера, всегда будет больше защищаемой спринклером площади  $S_{\text{лик}}$ . Эта высота в Приложении В с СП<sup>5</sup> именуется *критической*.

Результаты оценки  $H_{\text{кр}}$  по выражению (6) при  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{г}} = 60^\circ\text{C}$  и  $r = 0$  м приведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Критическая высота для спринклерной АУП согласно (6)

**Table 1.** Critical height of a sprinkler system according to (6)

$Q$ , кВт $Q$ , kW	500	1000	2000	3000	4000	5000	6000
$H_{\text{кр}}$ , м $H_{\text{кр}}$ , m	7,16	9,45	12,47	14,67	16,45	17,99	19,35

## Допустимая высота установки спринклера

Однако и при высоте защищаемого помещения, меньшей  $H_{\text{кр}}$ , нет гарантии успешного срабатывания АУП, что, как было показано в работах [1–3], объясняется смещением центра очага пожара от оси спринклера на величину  $r$  (см. рис. 2) и тепловой инерционностью колбы (параметром RTI —  $K$ ).

В работе [2] приведено выражение для оценки динамики прогрева колбы спринклерного оросителя (без учета теплоотдачи в конструкцию оросителя):

$$K \frac{dT_{\text{кол}}}{dt} = K_u(H, r) [qS_{\text{п}}(t)]^{1/6} (T_{\text{г}} - T_{\text{кол}}), \quad (7)$$

где  $T_{\text{кол}}$  — температура колбы;

$K_u(H, r)$  — коэффициент, зависящий от скорости  $u_{\text{г}}$  продуктов горения в припотолочной зоне:

$$K_u(H, r) = \begin{cases} \frac{0,98}{H^{1/6}} & \text{при } H > 6,775r; \\ \frac{0,4415H^{0,25}}{r^{5/12}} & \text{при } H \leq 6,775r. \end{cases} \quad (8)$$

В работе [2] и новой редакции СП<sup>5</sup> приведено решение дифференциального уравнения (7) для случая кругового развития пожара класса А:

$$T_{\text{кол}} = T_0 + k_T [X - 1 + e^{-X}], \quad (9)$$

где  $X = k_S S_{\text{лик}}^{2/3}$ .

Коэффициенты  $k_T$  и  $k_S$  соответственно рассчитываются по выражениям:

$$k_T = KV \sqrt{q} \times \begin{cases} \frac{40,76}{H^{1,5}} & \text{при } H > 6,775r; \\ \frac{90,42r^{5/12}}{H^{23/12}} & \text{при } H \in [5,577r; 6,775r]; \\ \frac{28,76}{H^{5/4}r^{1/4}} & \text{при } H < 5,577r; \end{cases} \quad (10)$$

$$k_S = \frac{q^{1/6}}{KV} \times \begin{cases} \frac{0,415}{H^{1/6}} & \text{при } H > 6,775r; \\ \frac{0,187H^{1/4}}{r^{5/12}} & \text{при } H \leq 6,775r. \end{cases} \quad (11)$$

Из выражений (9)–(11) можно, положив  $S_{\text{лик}} = S_{\text{п}}$ , найти максимально допустимую высоту  $H_{\text{д}}$ , при которой даже при самом неблагоприятном расположении очага, когда он находится на равном удалении от ближайших оросителей, будет выполняться условие  $T_{\text{кол}} \geq T_{\text{пасп}}$ , т.е. вскрывшиеся оросители накроют очаг пожара. Наибольшая величина  $r$  при стандартном размещении спринклеров (ближайшие четыре спринклера образуют квадрат) —  $r \approx 0,707L$ , при линейном (например, коридор или тоннель) —



$r = 0,5L$ , при сотовом (ближайшие три спринклера образуют равносторонний треугольник) —  $r \approx 0,577L$ .

Конечно, решение задачи по нахождению  $H_d$  возможно только численными методами [29], для чего разработана специальная компьютерная программа. На рис. 3 приведены расчетные данные о предельных высотах размещения спринклеров для различных защищаемых помещений.

Для определения критических высот  $H_{кр}$  и  $H_d$  были использованы данные по характерным пожарным нагрузкам [30] из Приложения В к СП<sup>5</sup> для различных групп помещений (табл. 2). Результаты расчетов при  $K = 50 \text{ м}^{0,5} \cdot \text{с}^{0,5}$ ,  $L = 4 \text{ м}$  и  $S_{лик} = 12 \text{ м}^2$  показывают, например, что для выставочного зала  $H_{кр} = 13,75 \text{ м}$ ,  $H_d = 8,95 \text{ м}$ ; для типографии  $H_{кр} = 9,91 \text{ м}$ ,  $H_d = 6,60 \text{ м}$ ; для кабинета  $H_{кр} = 12,88 \text{ м}$ ,  $H_d = 4,23 \text{ м}$ ; для лесопильного цеха кабинета  $H_{кр} = 13,59 \text{ м}$ ,  $H_d = 3,58 \text{ м}$ .

### Активация спринклеров от дифференциального теплового извещателя

В случаях, когда эффективное применение АУП с активацией спринклеров от теплового разрушения

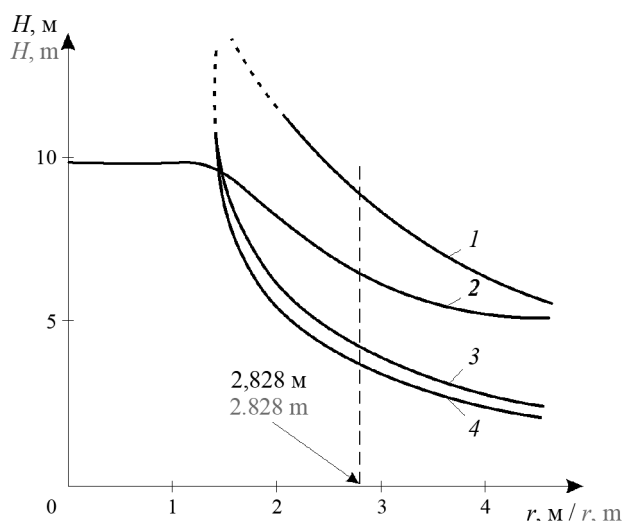


Рис. 3. Предельные высоты размещения спринклеров: 1 — выставочный зал; 2 — типография; 3 — кабинет; 4 — лесопильный цех; пунктирная линия соответствует проекционному расстоянию  $r = 2,828 \text{ м}$

Fig. 3. Sprinkler limit height values: 1 — exhibition hall; 2 — printing house; 3 — office; 4 — sawmill. The dotted line corresponds to projection distance  $r = 2.828 \text{ m}$

Таблица 2. Соотношение между группами помещений, защищаемых АУП, подклассами функциональной пожарной опасности (ФПО), классами и подклассами пожара и категориями взрывопожарной и пожарной опасности (КВПО, КПО)

Table 2. The ratio between sets of premises protected by sprinkler systems, functional fire hazard subclasses (FHS), fire classes and subclasses, explosion and fire hazard categories (EFHC, FHC)

Группа помещений Set of premises	Перечень характерных помещений, производств, технологических процессов List of typical premises, production facilities, and technological processes	Подкласс ФПО FHS subclass	Класс и подкласс пожара Class and subclass of fire	КВПО, КПО EFHC, FHC
1	Помещения / Rooms:			
	книгохранилищ и библиотек, фондохранилищ book depositories and libraries, museum depositories	Ф5.2 F5.2	A1	B1, B2 V1, V2
	хранения горючих музейных ценностей depository of flammable museum exhibits	Ф5.2 F5.2	A1	B2, B3 V2, V3
	цирков / circuses	Ф2.1 / F2.1	A1	—
	музеев, выставок, картинных галерей museums, exhibitions, art galleries	Ф2.2 F2.2	A1	—
	концертных и киноконцертных залов concert and cinema halls	Ф2.1 F2.1	A1	—
	ЭВМ / computer rooms	Ф4.3 / F4.3	E, A2	—
	магазинов / stores	Ф3.1 / F3.1	A2	—
	зданий управлений / office buildings	Ф4.3 / F4.3	A2	—
	гостиниц / hotels	Ф1.2 / F1.2	A1, A2	—
	больниц / hospitals	Ф1.1 / F1.1	A1, A2	—
2	Помещения / Premises accommodating:			
	деревообрабатывающего, текстильного, трикотажного, текстильно-галантерейного, табачного, обувного, кожевенного, мехового, целлюлозно-бумажного и печатного производств woodworking, textile, knitwear, textile and haberdashery, tobacco, footwear, leather, fur, pulp and paper production facilities and printing houses;	Ф5.1 F5.1	A1	Б, В, B1–B3 B, V, V1–V3

Группа помещений Set of premises	Перечень характерных помещений, производств, технологических процессов List of typical premises, production facilities, and technological processes	Подкласс ФПО FHS subclass	Класс и подкласс пожара Class and subclass of fire	КВПО, КПО EFHC, FHC
2	окрасочных, пропиточных, малярных, смесеприготовительных, обезжиривания, консервации и расконсервации, промывки деталей с применением ЛВЖ и ГЖ dyeing, inhibition, painting, mixing, degreasing, preservation and de-conservation, washing using flammable and combustible liquids	Ф5.1 F5.1	В V	А, Б, В2 А, В, V2
	производства ваты, искусственных и пленочных материалов, швейной промышленности production of cotton wool, artificial materials and films, clothing industry		А1	Б, В, В1–В3 В, V, V1–V3
	производств с применением резинотехнических изделий production involving rubber products		А2	В1–В3 V1–V3
	предприятий по обслуживанию автомобилей car service companies		А1, А2, В1 А1, А2, V1	В1–В3 V1–V3
	гаражи и стоянки garages and parking lots	Ф5.2 F5.2	А1, А2, Б А1, А2, В	В2, Вн V2, Vn
3	Помещения для производства резинотехнических изделий Premises accommodating the production of rubber products	Ф5.1 F5.1	А2	В1, В2 V1, V2
4	Помещения для производства горючих натуральных и синтетических волокон Premises accommodating the production of combustible natural and synthetic fibers:		А1, А2	Б, В1, В2 В, V1, V2
	окрасочные и сушильные камеры painting and drying chambers;		В1, В2 V1, V2	А, Б А, В
	участки открытой окраски и сушки краско-, лако-, клееприготовительных производств с применением ЛВЖ и ГЖ areas for open-air painting and paint/varnish drying, glue-making using flammable and combustible liquids			Ан, Бн An, Bn
4.1	машинные залы компрессорных станций, станций регенерации, гидрирования, экстракции Machinery halls that accommodate compressor stations, regeneration, hydrogenation, extraction stations		С	А, Б А, В
	помещения производств, в которых обращаются горючие газы, бензин, спирты, эфиры и др. ЛВЖ и ГЖ premises accommodating production facilities that entail the use of hot gases, gasoline, alcohols, ethers, etc., flammable and combustible liquids		С, В1, В2 С, V1, V2	А, Б А, В
5	Склады / Warehouses: негорючих материалов в горючей упаковке non-combustible materials in combustible packaging;	Ф5.1 F5.1	А1	В3 V3
	трудногорючих материалов / non-flammable materials			
6	Склады твердых горючих материалов, в т.ч. резины, РТИ, каучука, смолы Warehouses for solid combustible materials, including rubber, rubber products, gum elastic, resin		А2	В1, В2 V1, V2
7	Склады лаков, красок, ЛВЖ, ГЖ / Warehouses for lacquers and paints, flammable and combustible liquids		В1, В2 V1, V2	А, Б А, В

Примечания: 1. Класс и подкласс пожара указаны ориентировочно, их нужно уточнять с учетом конкретной пожарной нагрузки.  
2. КВПО и КПО указаны ориентировочно, их нужно рассчитывать по СП 12.13130.2009 «Определение категорий зданий, помещений и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности».

Notes: 1. The class and subclass of the fire are indicated approximately, they need to be specified taking into account the specific fire load.  
2. EFHC, FHC are given approximately, they need to be calculated according to SP 12.13130.2009 "Definition of categories of buildings, premises and outdoor installations for explosion and fire hazard".

колбы не гарантируется (например, высота помещения больше  $H_d$ , а изменить расстояние  $L$  и порядок размещения спринклеров невозможно), целесообразно использовать активацию от дифференциальных тепловых пожарных извещателей (ДТПИ), реагирующих на скорость изменения температуры продуктов горения.

Из выражений (1), (2), (4) и (5) для круговой формы пожара класса А можно оценить скорость роста температуры продуктов горения в припотолочной области:

$$\frac{dT_r}{dt} \approx 2,86 K_r(H, r) q^{2/3} V^{4/3} t^{1/3}. \quad (12)$$

Полагая, что ДТПИ сработает при скорости роста температуры

$$\frac{dT_r}{dt} \geq \theta_{\text{пасп}}. \quad (13)$$

( $\theta_{\text{пасп}}$  — паспортная величина срабатывания ДТПИ, например, 5 °С/мин), высоту гарантированной активации спринклера можно найти из выражения:

$$H_{\text{ДТПИ}} = \min \begin{cases} 10,246 q^{0,4} \left( \frac{V}{\theta_{\text{пасп}}} \right)^{0,6} \left( \sqrt{\frac{S_{\text{лик}}}{\pi}} - t_{\text{и}} V \right)^{0,2}; \\ 15,37 \left( \frac{q}{r} \right)^{2/3} \frac{V}{\theta_{\text{пасп}}} \left( \sqrt{\frac{S_{\text{лик}}}{\pi}} - t_{\text{и}} V \right)^{1/3}, \end{cases} \quad (14)$$

где  $t_{\text{и}}$  — инерционность активации спринклера ( $t_{\text{и}} < V^{-1} \sqrt{S_{\text{лик}}/\pi}$ ), т.е. суммарное время задержки передачи сигнала и времени активации оросителя.

Время активации ДТПИ  $t_d$ , соответствующее выполнению условия (13), и приведено в выражении (В.14) Приложения В свода правил<sup>5</sup>:

$$t_d = \frac{\theta_{\text{пасп}}^3}{q^2 V^4} \times \begin{cases} 8,86 \cdot 10^{-5} H^5 & \text{при } H > 5,577 r; \\ 2,75 \cdot 10^{-4} H^3 r^2 & \text{при } H \leq 5,577 r. \end{cases} \quad (15)$$

Тогда площадь пожара на момент подачи воды спринклерами составит:

$$S_{\text{п}} = \pi [V(t_d + t_{\text{и}})]^2. \quad (16)$$

При этом должно выполняться необходимое условие:  $S_{\text{п}} \leq S_{\text{лик}}$ .

### Примеры

**Пример 1.** Пожар произошел в выставочном зале (согласно Приложению В к СП<sup>5</sup>:  $q = 213$  кВт/м<sup>2</sup>,  $V = 0,016$  м/с) высотой  $H = 10$  м, защищенном спринклерной АУП ( $K = 50$  м<sup>0,5</sup> · с<sup>0,5</sup>,  $S_{\text{лик}} = 12$  м<sup>2</sup>,  $T_{\text{пасп}} = 60$  °С). АУП на момент пожара была исправна, сработала, но не выполнила функцию — оросители вскрывались, но пожар продолжался, пока его не потушили прибывшие пожарные караулы.

Требуется определить, могла ли эта АУП сработать эффективно, т.е. подавить пожар до прибытия пожарных, если на момент пожара  $T_0 = 20$  °С.

Найдем критическую высоту  $H_{\text{кр}}$  по выражению (6) при  $r = 0$ :

$$H_{\text{кр}} = 5,4542 \frac{(213 \cdot 12)^{0,4}}{(60 - 20)^{0,6}} \approx 13,75 \text{ м.}$$

Поскольку  $H = 10$  м < 13,75 м, АУП теоретически могла эффективно сработать, но этому, возможно, помешало большое проекционное расстояние  $r$  между оросителем и центром очага пожара (см. рис. 2). Дополнительно проведенное исследование места пожара позволило установить, что  $r = 2,6$  м.

Учитывая, что  $H/r = 3,846 < 5,577$ , в соответствии с выражениями (10) и (11) находим коэффициенты  $k_T$  и  $k_S$ :

$$k_T = 28,76 \frac{K \sqrt{q} V}{H^{1,25} r^{0,25}} = 28,76 \frac{50 \sqrt{213} \cdot 0,016}{10^{1,25} 2,6^{0,25}} = 14,87;$$

$$k_S = 0,187 \frac{q^{1/6} H^{0,25}}{K V r^{5/12}} = 0,187 \frac{213^{1/6} 10^{0,25}}{50 \cdot 0,016 \cdot 2,6^{5/12}} = 0,682.$$

Учитывая, что  $X = 0,682 \cdot 12^{2/3} = 3,575$ , из (9) находим температуру колбы на момент, когда  $S_{\text{п}} = 12$  м<sup>2</sup>:

$$T_{\text{кол}} = 20 + 14,87 [3,575 - 1 + e^{-3,575}] = 58,71 \text{ °С.}$$

Таким образом,  $T_{\text{кол}} = 58,71$  °С <  $T_{\text{пасп}} = 60$  °С — ороситель вовремя активироваться не смог, отчего и АУП, сработав с запозданием, не выполнила свою функцию. Этому можно найти подтверждение на рис. 3, если провести горизонтальную линию  $H = 10$  м до кривой 1, то точка пересечения будет левее пунктирной линии  $r = 2,828$  м.

**Пример 2.** Выставочный зал, аналогичный рассмотренному в предыдущем примере ( $q = 213$  кВт/м<sup>2</sup>,  $V = 0,016$  м/с,  $H = 10$  м,  $T_0 = 20$  °С), защищен спринклерной АУП ( $K = 50$  м<sup>0,5</sup> · с<sup>0,5</sup>,  $S_{\text{лик}} = 12$  м<sup>2</sup>,  $T_{\text{пасп}} = 60$  °С, оросители расположены квадратной сеткой с шагом  $L = 4$  м). У администрации выставочного зала возникли сомнения в части эффективности такой АУП при возможном пожаре, в связи с чем проведена соответствующая экспертиза согласно Приложению В к СП<sup>5</sup>.

Как и в предыдущем примере, по выражению (3) при  $r = 0$  найдена критическая высота  $H_{\text{кр}} = 13,75$  м, что свидетельствует о потенциальной возможности защиты выставочного зала данной АУП.

Но нужно учесть и худший сценарий, когда  $r = \lambda L = 0,707 \cdot 4 = 2,828$  м.

Учитывая, что  $H/r = 3,534 < 5,577$ , в соответствии с выражениями (10) и (11) находим коэффициенты  $k_T$  и  $k_S$ :

$$k_T = 28,76 \frac{50\sqrt{213} \cdot 0,016}{10^{1,25} \cdot 2,828^{0,25}} = 14,35;$$

$$k_S = 0,187 \frac{213^{1/6} 10^{0,25}}{50 \cdot 0,016 \cdot 2,282^{5/12}} = 0,659.$$

Учитывая, что  $X = 0,659 \cdot 12^{2/3} = 3,454$ , из (9) находим температуру колбы на момент, когда  $S_{\Pi} = 12 \text{ м}^2$ :

$$T_{\text{кол}} = 20 + 14,35 \left[ 3,454 - 1 + e^{-3,454} \right] = 55,67 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Таким образом,  $T_{\text{кол}} = 55,67 \text{ }^{\circ}\text{C} < T_{\text{пасп}} = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$  — АУП сработает с запозданием и не сможет эффективно защитить выставочный зал. На момент активации оросителя площадь пожара составит  $S_{\Pi} = 14,12 \text{ м}^2$ .

В этой связи можно предложить два варианта модернизации АУП: установить спринклеры с повышенной защищаемой площадью  $S_{\text{лик}} = 16 \text{ м}^2$  или применить принудительный пуск от ДТПИ.

Первый вариант сразу позволит решить проблему, поскольку  $S_{\Pi} = 14,12 \text{ м}^2 < 16 \text{ м}^2$ . Однако он приведет к нежелательно большому расходу воды.

Второй вариант потребует проведения расчетов. Пусть система с ДТПИ будет иметь следующие параметры:  $\theta_{\text{пасп}} = 5 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин} = 0,083(3) \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$  и  $t_{\text{и}} = 90 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Высоту гарантированной активации  $H_{\text{Д}}$  найдем из выражения (14):

$$H_{\text{ДТПИ}} = \min \left\{ \begin{aligned} &10,246 \cdot 213^{0,4} \left( \frac{0,016}{0,08333} \right)^{0,6} \times \\ &\times \left( \sqrt{\frac{12}{\pi}} - 90 \cdot 0,016 \right)^{0,2} = 39,58 \text{ м}; \\ &15,37 \left( \frac{213}{2,828} \right)^{2/3} \frac{0,016}{0,08333} \times \\ &\times \left( \sqrt{\frac{12}{\pi}} - 90 \cdot 0,016 \right)^{1/3} = 42,16 \text{ м}. \end{aligned} \right. =$$

$$= 39,58 \text{ м} > 10 \text{ м}.$$

Это свидетельствует о том, что ДТПИ своевременно активирует сразу четыре спринклера, если очаг пожара будет между ними.

Время активации ДТПИ  $t_{\text{д}}$  найдем из выражения (15):

$$t_{\text{д}} = 2,75 \cdot 10^{-4} \frac{\theta_{\text{пасп}}^3 H^5 r^2}{q^2 V^4} =$$

$$= 2,75 \cdot 10^{-4} \frac{0,08333^3 \cdot 10^5 \cdot 2,828^2}{213^2 \cdot 0,016^4} = 42,16 \text{ с}.$$

Площадь пожара  $S_{\Pi}$  на момент подачи воды спринклерами, согласно выражению (16), будет равна:  $S_{\Pi} = \pi [0,016(42,16 + 90)]^2 = 14,05 \text{ м}^2$ .

Таким образом, активация АУП от ДТПИ также позволит обеспечить эффективное срабатывание АУП и защитить выставочный зал от пожара.

**Пример 3.** Требуется защитить выставочный зал, аналогичный рассмотренному в предыдущих примерах ( $q = 213 \text{ кВт}/\text{м}^2$ ,  $V = 0,016 \text{ м}/\text{с}$ ,  $H = 10 \text{ м}$ ,  $T_0 = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Сначала рассмотрим возможность применения спринклерной АУП с параметрами:  $K = 50 \text{ м}^{0,5} \cdot \text{с}^{0,5}$ ,  $S_{\text{лик}} = 12 \text{ м}^2$ ,  $T_{\text{пасп}} = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $L = 4 \text{ м}$ . Как показано в предыдущем примере, такая АУП не сможет эффективно сработать, если очаг пожара находится на равном удалении  $r = 2,828 \text{ м}$  от соседних четырех оросителей.

Там же показано, что пожар может быть потушен, если каждый ороситель может защитить площадь  $S_{\text{лик}} = 16 \text{ м}^2$  или если применить активацию с помощью ДТПИ с параметрами:

$$\theta_{\text{пасп}} = 5 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин} = 0,083(3) \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с} \text{ и } t_{\text{и}} = 90 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Однако представляется интересным оценить, может ли спринклерная АУП защитить выставочный зал, если расстояние между оросителями снизить до  $L = 3,5 \text{ м}$ . Поскольку, как и ранее,  $H_{\text{кр}} = 13,75 \text{ м} > H = 10 \text{ м}$ , оценим худший вариант пожара, когда его очаг будет находиться между четырьмя оросителями, на расстоянии  $r = 0,707L = 2,475 \text{ м}$ .

В соответствии с выражениями (10) и (11) найдем коэффициенты  $k_T$  и  $k_S$ :

$$k_T = 28,76 \frac{50\sqrt{213} \cdot 0,016}{10^{1,25} \cdot 2,475^{0,25}} = 15,05;$$

$$k_S = 0,187 \frac{213^{1/6} \cdot 10^{0,25}}{50 \cdot 0,016 \cdot 2,475^{5/12}} = 0,696.$$

Учитывая, что  $X = 0,696 \cdot 12^{2/3} = 3,650$ , из (9) находим температуру колбы на момент, когда  $S_{\Pi} = 12 \text{ м}^2$ :

$$T_{\text{кол}} = 20 + 15,05 \left[ 3,65 - 1 + e^{-3,65} \right] = 60,27 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Таким образом,  $T_{\text{кол}} = 60,27 \text{ }^{\circ}\text{C} > T_{\text{пасп}} = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$  — АУП сможет эффективно защитить выставочный зал.

## Выводы

С учетом вышеизложенного можно заключить, что применение Приложения В к СП 485.13130.2020 позволит решать следующие задачи:

- выявить возможную причину неэффективного срабатывания АУП при пожаре;
- провести экспертизу ранее смонтированной АУП на предмет оценки эффективности ее срабатывания при пожаре;
- дать рекомендации для проектировщика по выбору параметров АУП и способа ее включения при пожаре.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Танклевский Л.Т., Бабилов И.А., Таранцев А.А., Зыбина О.А.* Об уточненной оценке координат очага пожара в помещении // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2020. Т. 29. № 3. С. 33–43. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.03.33-43
2. *Таранцев А.А., Танклевский Л.Т., Снегирев А.Ю., Цой А.С., Копылов С.Н., Меишман Л.М.* Оценка эффективности спринклерной установки пожаротушения // *Пожарная безопасность*. 2015. № 1. С. 72–79.
3. *Бабилов И.А., Танклевский Л.Т., Таранцев А.А.* О способе определения группы принудительно активируемых оросителей при возникновении пожара в помещении // *Проблемы управления рисками в техносфере*. 2019. № 3 (51). С. 34–41.
4. *Tanklevskiy L., Tsoy A., Snegirev A.* Electrically controlled dynamic sprinkler activation: computational assessment of potential efficiency // *Fire Safety Journal*. 2017. Vol. 91. Pp. 614–623. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.04.019
5. *Tanklevskiy L., Vasiliev M., Meshman L., Snegirev A., Tsoi A.* A novel methodology of electrically controlled sprinkler activation // *Proceedings of the 13th International conference Interflam 2013*. London, 2013. Pp. 503–508.
6. *Tsoi A., Snegirev A., Tanklevskiy L., Sheinman I.* Flame suppression by water sprays: exploring capabilities and failures of FDS // *Proceedings of the Seventh International Seminar Fire and Explosion Hazards*. Research Publ., 2013. Pp. 482–491. DOI: 10.3850/978-981-07-5936-0\_07-05
7. *Xin Yibing, Burchesky K., de Vries J., Magistrale H., Zhou X., D'Aniello S.* SMART sprinkler protection for highly challenging fires — Part 1: System design and function evaluation // *Fire Technology*. 2016. Vol. 53. No. 5. Pp. 1847–1884. DOI: 10.1007/s10694-017-0662-2
8. *Груданова О.В., Таранцев А.А., Королева Л.А.* Об экономической оценке двух путей модернизации автоматических установок пожаротушения // *Проблемы управления рисками в техносфере*. 2007. № 1. С. 38–42.
9. *Kopylov S., Tanklevskiy L., Vasilev M., Zima V., Snegirev A.* Advantages of electronically controlled sprinklers (ECS) for fire protection of tunnels // *Proceedings from the Fifth International Symposium on Tunnel Safety and Security*, New York, USA, March 14-16, 2012. Vol. 1. SP Technical Research Institute of Sweden, 2012. Pp. 87–92. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:962674/FULLTEXT01.pdf#page=88>
10. *Меишман Л.М., Цариченко С.Г., Былинкин В.А., Алешин В.В., Губин Р.Ю.* Проектирование водяных и пенных автоматических установок пожаротушения / под общ. ред. Н.П. Копылова. М. : ВНИИПО МЧС РФ, 2002. 413 с.
11. *Собурь С.В.* Установки пожаротушения автоматические : справочник. 3-е изд. с изм. М. : Спецтехника, 2003. 400 с.
12. *Сафронов В.В., Аксенова Е.В.* Выбор и расчет параметров установок пожаротушения и сигнализации. Орел : ОрлГТУ, 2004. 57 с.
13. *Храпский С.Ф., Стариков В.И., Рысев Д.В.* Производственная и пожарная автоматика. Омск : Изд-во ОмГТУ, 2013. 152 с.
14. *Воронков О.Ю.* Расчет, монтаж и эксплуатация автоматических установок пожаротушения. Омск : Изд-во ОмГТУ, 2016.
15. *Илюшов Н.Я.* Автоматические установки пожаротушения. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. 134 с.
16. *Alpert R.L.* Ceiling jet flows // *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3rd ed. NFPA, 2002. Pp. 2–31.
17. *Абраков Д.Д., Бородин А.А., Булатова В.В., Корнилов А.А., Шнайдер А.В.* Экспериментальная оценка инерционности спринклерных оросителей // *Интернет-журнал «Технологии техносферной безопасности»*. 2013. № 1 (47). URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2013-1/03-01-13.ttb.pdf>
18. *Васильева М.С., Зорина К.В., Ремез А.С.* Исследование возможности применения агрегатно-модульных установок пожаротушения ТРВ // *Безопасность в чрезвычайных ситуациях : сб. науч. тр. Всеросс. науч.-практ. конф. СПб. : СПбПУ, 2018. С. 215–219. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=37007468&>*
19. *Markus E., Snegirev A., Kuznetsov E., Tanklevskiy L.* Application of a simplified pyrolysis model to predict fire development in rack storage facilities // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 1107. P. 042012. DOI: 10.1088/1742-6596/1107/4/042012

20. Markus E., Snegirev A., Kuznetsov E., Tanklevskiy L. Fire growth in a high-rack storage // Proceedings of the Ninth International Seminar on Fire and Explosion Hazards. 21–26 April 2019, Saint Petersburg, Russia. Saint Petersburg, 2019. Pp. 796–807. URL: <https://elib.spbstu.ru/dl/2/k19-70.pdf/info> DOI: 10.18720/spbpu/2/k19-70
21. Drysdale D. An introduction to fire dynamics. John Wiley and Sons, Chichester, 1985. 424 p.
22. Snegirev A., Tanklevskiy L. The macrokinetics of indoor fire // High Temperature. 1998. Vol. 36. No. 5. Pp. 737–743.
23. Snegirev A., Tanklevskiy L. Numerical simulation of turbulent convection of gas indoors in the presence of a source of ignition // High Temperature. 1998. Vol. 36. No. 6. Pp. 949–959.
24. Markus E., Snegirev A., Kuznetsov E., Tanklevskiy L. Application of the thermal pyrolysis model to predict flame spread over continuous and discrete fire load // Fire Safety Journal. 2019. Vol. 108. P. 102825. DOI: 10.1016/j.firesaf.2019.102825
25. Маркус Е.С., Снегирев А.Ю., Кузнецов Е.А., Танклевский Л.Т., Аракчеев А.В. Численное моделирование распространения пламени по дискретной совокупности горючих материалов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2019. Т. 28. № 4. С. 29–41. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.04.29-41
26. Маркус Е.С., Кузнецов Е.А., Снегирев А.Ю. Естественно-конвективное турбулентное диффузионное пламя у вертикальной поверхности // Физика горения и взрыва. 2018. № 3 (54). С. 36–46. DOI: 10.15372/FGV20180304
27. Snegirev A., Markus E., Kuznetsov E., Harris J., Wu T. On soot and radiation modeling in buoyant turbulent diffusion flames // Heat and Mass Transfer. 2018. Vol. 54. No 8. P. 2275–2293. DOI: 10.1007/s00231-017-2198-x
28. Снегирев А.Ю., Коковина Е.С., Цой А.С., Талалов В.А., Степанов В.В. Интеграция моделей турбулентного пламени и пиролиза горючего материала: горение термопластиков // Труды XXXI Сибирского теплофизического семинара. 17–19 ноября 2014 г., Новосибирск. С. 226–233.
29. Демидович Б.П., Марон И.А., Шувалова Э.З. Численные методы анализа. 3-е изд., перераб. М.: Наука, 1967. 368 с.
30. СИТИС-СПН-1. Пожарная нагрузка. Справочник. Редакция 3 от 20.06.2014. 2014. 51 с.

## REFERENCES

1. Tanklevskiy L.T., Babikov I.A., Tarantsev A.A., Zybina O.A. On a more precise assessment of coordinates of the seat of fire in the premises. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(3):33-43. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.03.33-43 (rus).
2. Tarantsev A.A., Tanklevskiy L.T., Snegirev A.Yu., Tsoy A.S., Kopylov S.N., Meshman L.M. Assessment of the sprinkler installation efficiency. *Fire Safety Journal*. 2015; 1:72-79. (rus).
3. Babikov I.A., Tanklevskiy L.T., Tarantsev A.A. Determination method of sprinklers with electrical activation in case of internal fire. *Risk Management Challenges in the Technosphere*. 2019; 3(51):34-41. (rus).
4. Tanklevskiy L., Tsoy A., Snegirev A. Electrically controlled dynamic sprinkler activation computational assessment of potential efficiency. *Fire Safety Journal*. 2017; 91:614-623. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.04.019
5. Tanklevskiy L., Vasiliev M., Meshman L., Snegirev A., Tsoi A. A novel methodology of electrically controlled sprinkler activation. *Proceedings of the 13th International conference Interflam 2013*. London, 2013; 503-508.
6. Tsoi A., Snegirev A., Tanklevskiy L., Sheinman I. Flame suppression by water sprays: exploring capabilities and failures of FDS. *Proceedings of the Seventh International Seminar Fire and Explosion Hazards*. Research Publ., 2013; 482-491. DOI: 10.3850/978-981-07-5936-0\_07-05
7. Xin Yibing, Burchesky K., de Vries J., Magistrale H., Zhou X., D'Aniello S. SMART sprinkler protection for highly challenging fires — Part 1: System design and function evaluation. *Fire Technology*. 2016; 53(5):1847-1884. DOI: 10.1007/s10694-017-0662-2
8. Grudanova O.V., Tarantsev A.A., Koroleva L.A. On the Economic Assessment of the Two Ways of Retrofitting Automatic Fire Extinguishing Units. *Risk management challenges in the technosphere*. 2007; 1:38-42. (rus).
9. Kopylov S., Tanklevskiy L., Vasilev M., Zima V., Snegirev A. Advantages of electronically controlled sprinklers ECS for fire protection of tunnels. *Proceedings from the Fifth International Symposium on Tunnel Safety and Security, New York, USA, March 14-16, 2012. Vol. 1*. SP Technical Research

- Institute of Sweden, 2012; 87-92. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:962674/FULL-TEXT01.pdf#page=88>
10. Meshman L.M., Tsarichenko S.G., Bylinkin V.A., Aleshin V.V., Gubin R.Yu. *Design of water and foam automatic fire extinguishers* / N.P. Kopylov (ed.). Moscow, VNIPO MCHS RF, 2002; 413. (rus).
  11. Sobur S.V. *Automatic fire extinguishers : a reference book*. 3rd ed., changes. Moscow, Spetstekhnika Publ., 2003; 400. (rus).
  12. Safronov V.V., Aksenova E.V. *Selection and calculation of fire extinguishing and signalling installations*. Orel, OrlGTU, 2004; 57. (rus).
  13. Khrapskii S.F., Starikov V.I., Rysev D.V. *Production and fire automation*. Omsk, OmGTU Publ., 2013; 152. (rus).
  14. Voronkov O.Iu. *Design, installation and operation of automatic fire extinguishers*. Omsk, OmGTU Publ., 2016. (rus).
  15. Iliushov N.Ia. *Automatic fire extinguishing installations*. Novosibirsk, NGTU Publ., 2016; 134. (rus).
  16. Alpert R.L. Ceiling jet flows. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. 3rd Ed NFPA. 2002; 2-31.
  17. Abrakov D.D., Borodin A.A., Bulatova V.V., Kornilov A.A., Shnaider A.V. Experimental evaluation of sprinklers inertia. *Technology of Technosphere Safety*. 2013; 1(47). URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2013-1/03-01-13.ttb.pdf> (rus).
  18. Vasil'eva M.S., Zorina K.V., Remez A.S. Investigation of the possibility of using aggregate-modular water mist fire extinguishing systems. *Safety in emergency situations: collection of scientific papers of the All-Russian scientific and practical conference*. Saint Petersburg, SPbPU, 2018; 215-219. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=37007468> (rus).
  19. Application of a simplified pyrolysis model to predict fire development in rack storage facilities. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018; 1107:042012. DOI: 10.1088/1742-6596/1107/4/042012
  20. Markus E., Snegirev A., Kuznetsov E., Tanklevskiy L. Fire growth in a high-rack storage. *Proceedings of the Ninth International Seminar on Fire and Explosion Hazards*. 21–26 April 2019, Saint Petersburg, Russia. Saint Petersburg, 2019; 796-807. URL: <https://elib.spbstu.ru/dl/2/k19-70.pdf/info> DOI: 10.18720/spbpu/2/k19-70
  21. Drysdale D. *An Introduction to Fire Dynamics*. Chichester, John Wiley and Sons Publ., 1985; 424.
  22. Snegirev A., Tanklevskiy L. The macrokinetics of indoor fire. *High Temperature*. 1998; 36(5):737-743.
  23. Snegirev A., Tanklevskiy L. Numerical simulation of turbulent convection of gas indoors in the presence of a source of ignition. *High Temperature*. 1998; 36(6):949-959.
  24. Markus E., Snegirev A., Kuznetsov E., Tanklevskiy L. Application of the thermal pyrolysis model to predict flame spread over continuous and discrete fire load. *Fire Safety Journal*. 2019. 108:102825. DOI: 10.1016/j.firesaf.2019.102825
  25. Markus E.S., Snegirev A.Yu., Kuznetsov E.A., Tanklevskiy L.T., Arakcheev A.V. Simulation of flame spread over discrete fire load. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2019; 28(4):29-41. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.04.29-41 (rus).
  26. Markus E.S., Kuznetsov E.A., Snegirev A.Yu. Natural buoyant turbulent diffusion flame near a vertical surface. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2018; 54(3):284-293. DOI: 10.15372/FGV20180304 (rus).
  27. Snegirev A., Markus E., Kuznetsov E., Harris J., Wu T. On soot and radiation modeling in buoyant turbulent diffusion flames. *Heat and Mass Transfer*. 2018. 54(8):2275-2293. DOI: 10.1007/s00231-017-2198-x (rus).
  28. Snegirev A.Yu., Kokovina E.S., Tsoi A.S., Talalov V.A., Stepanov V.V. Integration of models of turbulent flame and pyrolysis of combustible material: combustion of thermoplastics. *Proceedings of the XXXI Siberian Thermophysical Seminar. November 17-19, 2014, Novosibirsk*. 226-233. (rus).
  29. Demidovich B.P., Maron I.A., Shuvalova E.Z. *Numerical methods of analysis*. 3rd ed., rev. Moscow, Nauka Publ., 1967; 368. (rus).
  30. CITIS-SPN-1. *Fire load. Directory*. 3rd edition dated June 20, 2014. 2014; 51. (rus).

Поступила 05.11.2020, после доработки 02.12.2020;

принята к публикации 21.12.2020

Received November 5, 2020; Received in revised form December 2, 2020;

Accepted December 21, 2020

**Информация об авторах**

**ТАНКЛЕВСКИЙ Леонид Тимофеевич**, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой Высшей школы техносферной безопасности, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого; главный научный сотрудник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; РИНЦ ID: 181476; Scopus Author ID: 57192367552; ResearcherID: S-1901-2017; ORCID: 0000-0002-2769-0086; e-mail: tanklevskiy@gefest-spb.ru

**ТАРАНЦЕВ Александр Алексеевич**, д-р техн. наук, профессор, заведующий лабораторией, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук; профессор Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; РИНЦ ID: 664653; Scopus Author ID: 57195636448; ResearcherID: K-2087-2018; ORCID: 0000-0003-1561-2483; e-mail: t\_\_54@mail.ru

**ЗЫБИНА Ольга Александровна**, д-р техн. наук, доцент Высшей школы техносферной безопасности, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; РИНЦ ID: 505657; Scopus Author ID: 6504571187; ResearcherID: Q-4451-2017; ORCID: 0000-0001-9401-7206; e-mail: zybina\_oa@spbstu.ru

**БАБИКОВ Игорь Александрович**, аспирант Высшей школы техносферной безопасности, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; РИНЦ ID: 949758; Scopus Author ID: 57205082476; ResearcherID: S-5502-2017; ORCID: 0000-0003-4100-1686; e-mail: babikovia@gmail.com

**Information about the authors**

**Leonid T. TANKLEVSKIY**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Department of Higher School of Technosphere Safety, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University; Chief researcher, Saint-Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Saint Petersburg, Russian Federation; ID RISC: 181476; Scopus Author ID: 57192367552; ResearcherID: S-1901-2017; ORCID: 0000-0002-2769-0086; e-mail: tanklevskiy@gefest-spb.ru

**Alexander A. TARANTSEV**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Laboratory, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science; Professor, Saint-Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Saint Petersburg, Russian Federation; ID RISC: 664653; Scopus Author ID: 57195636448; ResearcherID: K-2087-2018; ORCID: 0000-0003-1561-2483; e-mail: t\_\_54@mail.ru

**Olga A. ZYBINA**, Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor of Department of Higher school of Technosphere Safety, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation; ID RISC: 505657; Scopus Author ID: 6504571187; ResearcherID: Q-4451-2017; ORCID: 0000-0001-9401-7206; e-mail: zybina\_oa@spbstu.ru

**Igor A. BABIKOV**, Graduate Student of Department of Higher School of Technosphere Safety, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation; ID RISC: 949758; Scopus Author ID: 57205082476; ResearcherID: S-5502-2017; ORCID: 0000-0003-4100-1686; e-mail: babikovia@gmail.com