

УДК 614.842.6

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ ВЕЛИЧИН ОПАСНЫХ ФАКТОРОВ ПОЖАРА ДЛЯ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ

Молодоженцев Павел Владимирович

Специальное управление ФПС № 10 МЧС России, г. Трехгорный, Российская Федерация

**Аннотация.** Рассмотрена пожарная опасность объектов энергетики Российской Федерации. Разработана методика проведения экспериментов с горючими веществами и материалами в замкнутых объемах, изготовлена необходимая материальная база, подобраны оборудование и средства фиксации. Испытаниям подвергалось пространство внутри изготовленной огневой камеры. Исследования в замкнутом объеме проводились в условиях, максимально приближенных к реальным, при воздействиях опасных факторов пожара. Определяемые характеристики опасных факторов пожара и другие параметры измерялись непосредственно поверенными контрольно-измерительными приборами, дополнительно использован математический аппарат статистической обработки экспериментальных данных.

При помощи полевой модели с использованием программы FDS (Fire Dynamic Simulator), разработанной Национальным институтом стандартов и технологии (NIST), проведено моделирование сценариев пожара по параметрам, полученным в результате натурных испытаний. В программе реализована вычислительная гидродинамическая модель теплопереноса при горении, которая использует уравнение Навье — Стокса для низкоскоростных температурно-зависимых потоков.

Анализ полученных результатов определил расхождения и зависимости между экспериментальным и программным методом исследования. Как следствие, вычислены величины, применяемые для корректировки расчетов с учетом определенных факторов. Намечены задачи дальнейшего совершенствования исследований по данному направлению.

**Ключевые слова:** безопасность, методика, эксперимент, огневая камера, чашечная горелка, компьютерная модель

**Для цитирования:** Молодоженцев П. В. Определение расчетных величин опасных факторов пожара для объектов энергетики // Техносферная безопасность. 2026. № 1 (50). С. 62–72.

## DETERMINATION OF CALCULATED VALUES OF FIRE HAZARDS FOR ENERGY FACILITIES

Pavel V. Molodozhentsev

Special FPS Department No. 10 of the Russian Ministry of Emergency Situations, Trekhgornny, Russian Federation

**Abstract.** The fire danger of energy facilities in the Russian Federation is considered. A method of conducting experiments with combustible substances and materials in closed volumes has been developed, the necessary material base has been manufactured, equipment and fixation devices have been selected. The space inside the manufactured firing chamber was subjected to tests. The research in a closed volume was carried out in conditions as close as possible to real conditions under the influence of fire hazards. The determined characteristics of fire hazards and other parameters were measured directly by certified control and measuring devices, and a mathematical apparatus for statistical processing of experimental data was additionally used.

Using a field model using the FDS (Fire Dynamic Simulator) program developed by the National Institute of Standards and Technology NIST/NIST, fire scenarios were simulated using parameters obtained as a result of field tests. The program implements a computational hydrodynamic model of heat and mass transfer in gorenje, which uses the Navier-Stokes equation for low-velocity temperature-dependent flows.

The final analysis of the results revealed discrepancies and dependencies between the experimental and programmatic research method. As a result, the values used to adjust calculations taking into account certain factors are calculated. The tasks of further improvement of research in this area are outlined.

**Keywords:** safety, methodology, experiment, fire chamber, cup burner, computer model

**For citation:** Molodozhentsev P. V. Determination of calculated values of fire hazards for energy facilities // Technospheric safety. 2026. No. 1 (50). Pp. 62–72.

## Введение

Энергетические ресурсы в современном обществе обладают исключительной ценностью. По этой причине противопожарной защите объекта энергетики необходимо уделять особое внимание, в том числе совершенствовать методы прогнозирования пожара, огнетушащие вещества и способы их подачи.

Общая статистика пожаров, произошедших на энергетических объектах страны за последние 10 лет, демонстрирует стабильный рост. Причиной является износ технологического оборудования и систем противопожарной защиты. Наибольший материальный ущерб экономике наносят крупные пожары, которые составляют лишь 3 % от общего числа; на долю пожаров, про-

изошедших в замкнутых объемах, приходится 73 % случаев. В частности в машинных отделениях происходит 72 % пожаров, в котельных отделениях — 23 %, в кабельных тоннелях — 5 % [1].

Предупредить или свести к минимуму ущерб от пожара — перспективная задача в рамках обеспечения национальной безопасности Российской Федерации [2].

В настоящее время в числовом выражении не определены расхождения и зависимости между экспериментальным и программным методом исследования при прогнозировании пожаров в замкнутых объемах на объектах энергетики. В рамках решения данной проблемы необходимо:

- переоценить горючую нагрузку объектов энергетики;

- составить программу исследований;
- спланировать, изготовить и подобрать необходимое оборудование;
- провести программное моделирование сценариев пожаров, так как помещения объектов энергетики имеют большие объемы и проведение натуральных испытаний в большинстве случаев затруднительно;
- найти расхождения и зависимости экспериментального и программного методов исследования.

Найденные в работе решения дадут возможность создать методику, которая заменит дорогостоящие эксперименты компьютерной моделью. Математическое моделирование с определенными поправками позволит получить достаточно точные данные, необходимые для анализа [3].

Таким образом, использование полученных в результате физического эксперимента поправочных коэффициентов в динамических компьютерных моделях позволит более точно вычислить значения опасных факторов пожара, сосредоточенных в ограниченном

пространстве, и оценить их влияние на прекращение горения в различных зонах исследуемого объема.

### Результаты исследований и их обсуждение

Горючую нагрузку закрытых объемов объектов энергетики составляют: уголь, мазут, дизельное топливо, водород, горючие фильтрующие материалы, изоляция электрических кабелей, конструкционные материалы на основе пластмасс, различные масла, другие вещества, материалы [4].

В результате анализа статистики пожаров из всего спектра горючего стоит выделить трансформаторное масло и изоляцию электрических кабелей, подвергающихся горению чаще других. На предприятиях нефтепереработки чаще происходит горение бензинов, мазутов, горючих газов.

Сведения о пожарной опасности перечисленных веществ и материалов, а также значения интенсивности подачи огнетушащих веществ представлены в табл. 1 [5].

**Таблица 1**  
**Пожарная опасность веществ, материалов и параметры подачи воды**

Table 1

Fire hazard of substances, materials and water supply parameters

Вещество, материал Substance, material	Скорость распространения огня, м/мин The speed of fire propagation, m/min	Интенсивность подачи воды, л/с·м <sup>2</sup> Intensity of water supply, l/s·m <sup>2</sup>
Трансформаторное масло Transformer oil	1	0,2
Бензин Gasoline	3	0,15
Дизельное топливо Diesel fuel	3	0,15
Изоляция кабелей в кабельных полуэтажах — под напряжением Insulation of cables in cable semi-floors — under voltage	0,2–0,8	0,2

Окончание таблицы 1

Вещество, материал Substance, material	Скорость распространения огня, м/мин The speed of fire propagation, m/min	Интенсивность подачи воды, л/с·м <sup>2</sup> Intensity of water supply, l/s·m <sup>2</sup>
Изоляция кабелей в горизонтальных кабельных туннелях — при снятом напряжении Insulation of cables in horizontal cable tunnels — with the voltage removed	0,15–0,3	0,2

Анализ данных табл. 1 показывает: наибольшая скорость распространения огня является свойством бензинов и дизельного топлива. Согласно руководству по тушению нефти и нефтепродуктов в резервуарах и резервуарных парках интенсивность подачи огнетушащих веществ на тушение пожаров в машинных залах при горении продуктов нефтепереработки равна: водой 0,1–0,2 л/с·м<sup>2</sup>, пенными составами 0,05–0,2 л/с·м<sup>2</sup> [6]. При длительном горении продуктов нефтепереработки распространение пожара происходит в геометрической прогрессии, возможно, их вскипание и последующий выброс. Все перечисленные факторы негативно влияют на процесс ликвидации пожара и минимизацию последствий.

В целях решения данной задачи на первом этапе составлена программа испытаний. Основные условия проведения испытаний определены в соответствии с требованиями ГОСТ Р 53280.3–2009 «Установки пожаротушения автоматические. Огнетушащие вещества. Часть 3. Газовые огнетушащие вещества. Методы испытаний» [7].

Для проведения экспериментальных испытаний изготовлены огневая камера, чашечные горелки, подобраны средства измерения и фиксации результатов эксперимента. Основные контрольно-измерительные приборы: четырехканальный программный регулятор температуры «ТЕРМОДАТ-19Е6», термогигрометр CENTER 310, тепловизионная

камера Dräger UCF 9000, весы товарные CAS PB-150, газоанализатор «АГМ-505», напоромер «ДГ-СВ-УЗ».

Огневая камера представляет собой замкнутый объем из негорючих материалов с параметром негерметичности не более 0,001 м<sup>-1</sup>, объемом 2,5 м<sup>3</sup>, высотой 1,36 м, с отношением длины к ширине и высоте в пределах 1:1:1. Огневая камера оборудована отверстиями для подачи огнетушащих веществ и размещения измерительных датчиков согласно схеме, приведенной на рис. 1 [7].

В качестве модельных очагов используются цилиндрические горелки (4 шт.) из нержавеющей стали или стали по ГОСТ 5632–2014 любой марки толщиной стенки 5 ± 1 мм с внутренним диаметром 80 ± 5 мм и высотой 110 ± 2 мм, которые имеют защитные экраны. Схема горелки приведена на рис. 2.

Для проведения испытаний на огневой камере две горелки размещают в углах огневой камеры относительно пола на уровне 10 % и по одной горелке на уровнях 50 % и 90 % от высоты камеры. Каждая горелка должна быть размещена на расстоянии 50 ± 5 м от стены камеры.

Заливают в горелки горючую жидкость (бензин марки АИ-92) так, чтобы ее уровень был на 50 ± 3 мм ниже верхнего среза горелки. Поджигают горючее и дают выдержку 30 ± 3 с, обеспечивая доступ воздуха в камеру.

По истечении времени свободного горения прекращают доступ воздуха, герметизируют камеру до степени, указанной в условиях проведения испытаний, и начинают фиксировать измерения. Фиксируют время

затухания горючей жидкости в чашечных горелках, определяют количество выгоревшей жидкости, проводят еще два определения. Огневая камера и необходимое оборудование представлены на рис. 3.

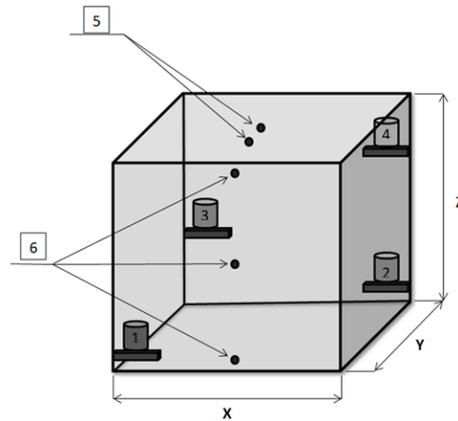


Рис. 1. Схема расположения чашечных горелок и технологических отверстий в огневой камере:  
1–4 — чашечные горелки; 5, 6 — технологические отверстия

Fig. 1. Arrangement of cup burners and process openings in the fire chamber:  
1–4 — cup burners; 5, 6 — process holes

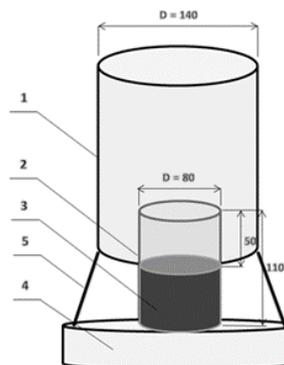


Рис. 2. Схема чашечной горелки:

1 — защитный кожух; 2 — горелка; 3 — горючая жидкость; 4 — полка; 5 — соединительные стержни

Fig. 2. Diagram of the cup burner:

1 — protective casing; 2 — burner; 3 — flammable liquid; 4 — shelf; 5 — connecting rods



Рис. 3. Огневая камера и оборудование

Fig. 3. Firing chamber and equipment

При планировании эксперимента основными фиксируемыми параметрами выбраны: время и вес сгораемого топлива, динамика изменения температур на уровне защитного кожуха горелки, на уровне 1,3 м от пола огневой камеры, значения других опасных факторов пожара.

Погодные условия до начала эксперимента: температура воздуха в огневой камере до начала эксперимента — 24 °С, ветер и осадки отсутствуют, влажность воздуха — 44 %, атмосферное давление — 100,65 кПа.

После проведения трех исследований зафиксированы следующие средние временные показатели самозатухания горелок: № 3 — 8 мин 00 с; № 1 — 9 мин 00 с; № 2 — 9 мин 50 с; № 4 — 14 мин 55 с. Порядок самозатухания горелок не изменялся, максимальный временной интервал расхождения составил 19 с. В результате наблюдений объем камеры заполнился плотной массой дыма после 4 мин свободного горения, далее видимость снижалась, наиболее плотный дым наблюдался после затухания горелки № 2. Максимальное температурное значение на уровне защитного кожуха горелки составило 312 °С, в центре камеры на уровне 1,3 м от уровня пола — 105 °С, минимальное содержание  $O_2$  — 10,5 %, максимальное значение

$CO$  — 3 840 мг/м<sup>3</sup>, итоговая влажность — 65,0 %. Повторного возгорания после завершения всех исследований не зафиксировано.

В современных исследованиях применяются программные методы изучения природы происходящих процессов. Достоверность получаемых в результате таких моделирований данных требует подтверждения.

Моделирование развития пожара, в основу которого положены параметры проведения натурного эксперимента, проводилось по полевой модели с помощью программы FDS (Fire Dynamic Simulator), разработанной Национальным институтом стандартов и технологий (США), с использованием методики расчета оценки пожарного риска, выполненной в соответствии с приложением к приказу МЧС России 26 июня 2024 г. № 533 «Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах» [8].

На рис. 4–7 представлены результаты моделирования, показана динамика развития опасных факторов пожара. Критическое время по каждому из опасных факторов пожара определялось как время достижения этим фактором предельно допустимого значения на высоте 1,3 м от пола (на графиках обозначено прямой линией).

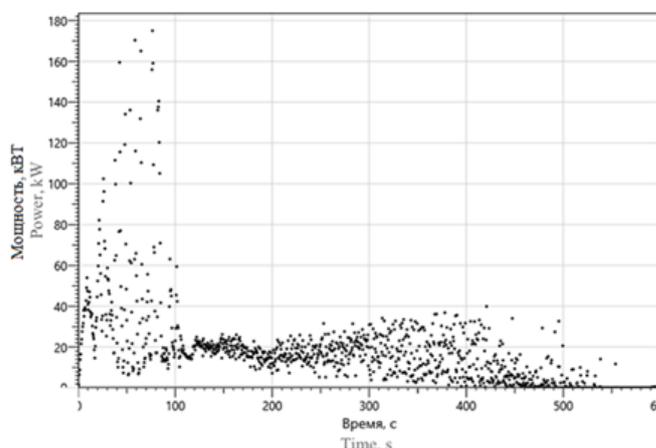


Рис. 4. Мощность пожара

Fig. 4. Fire power

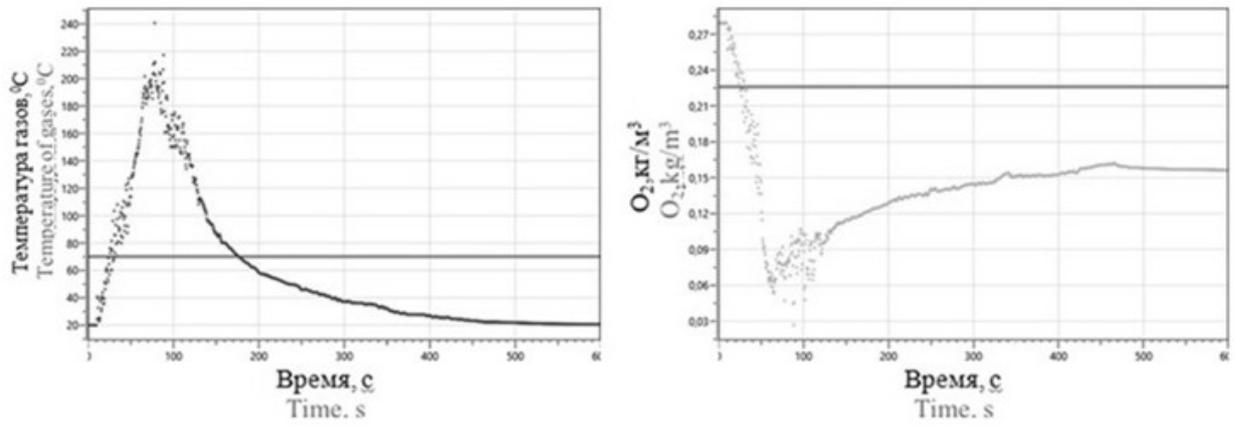


Рис. 5. График изменения температуры и кислорода в сравнении с предельно допустимыми значениями  
 Fig. 5. Graph of temperature and oxygen changes in comparison with the maximum permissible values

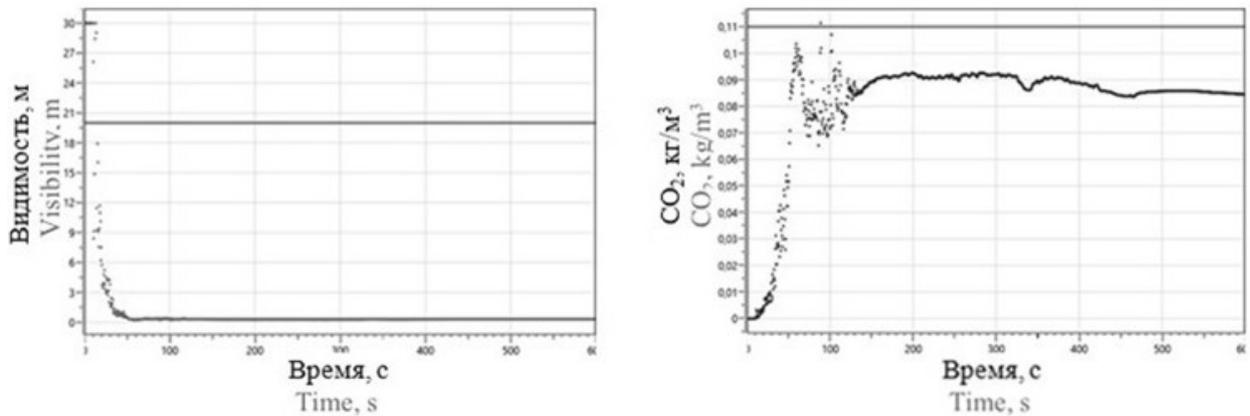


Рис. 6. График изменения и видимости и углекислого газа в сравнении с предельно допустимыми значениями  
 Fig. 6. Graph of changes in both visibility and carbon dioxide in comparison with the maximum permissible values

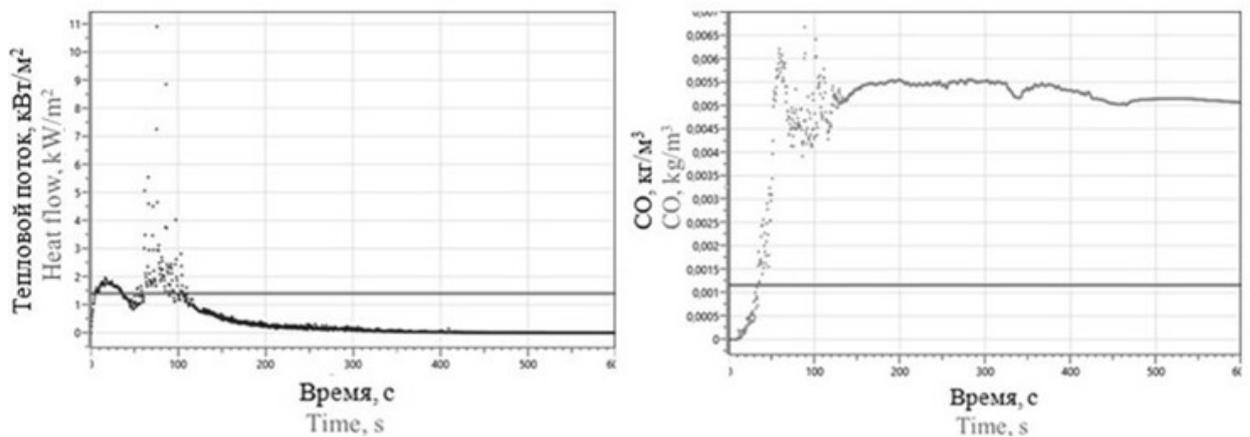


Рис. 7. График изменения теплового потока и оксида углерода в сравнении с предельно допустимыми значениями  
 Fig. 7. Graph of changes in heat flow and carbon monoxide in comparison with the maximum permissible values

В результате проведения натурального эксперимента и моделирования пожара появилась возможность сравнения некоторых измеренных параметров, представленных в табл. 2.

Установим наличие статистически значимой взаимосвязи между данными, полученными в результате натурального эксперимента, и данными моделирования пожара.

**Таблица 2**  
**Сравнительные показатели исследований**  
 Table 2  
 Comparative research indicators

Параметр пожара, ед. изм. Fire parameter, units	Эксперимент Experiment	Моделирование Simulation	Процентная разница, % Percentage difference, %	
			от меньшего к большему from less to more	от большего к меньшему from more to less
Время горения, с Gorenje time, s	837	556	57,01	-36,31
Температура, °C Foamed PE	105	218	107,62	-51,83
Содержание O <sub>2</sub> , % O <sub>2</sub> Content, %	10,5	6	75	-42,86
Содержание CO, мг/м <sub>3</sub> CO content, mg/m <sub>3</sub>	3 840	5 500	43,23	-30,18

Среднее значение процентной разницы от большего к меньшему составило 40 %, от меньшего к большему — 71 %. Из данных табл. 2 видно, что два параметра моделирования значительно выше экспериментальных данных (температура и содержание CO, средняя процентная разница 75,5 %), два параметра ниже экспериментальных данных (время горения и содержание O<sub>2</sub>, средняя процентная разница 66 %). Полученные средние процентные разницы позволяют ввести поправочные коэффициенты для адаптации результатов исследования.

Таким образом, в целях получения достоверных данных при использовании программы FDS для моделирования сценария пожара на объекте энергетики требуется введение поправочных коэффициентов: время горения — 0,64, температура — 2, содержание O<sub>2</sub> — 0,6, содержание CO — 1,4.

Потенциальные расхождения полученных данных скрыты в невозможности задать в программе точные данные, касающиеся материалов ограждающих конструкций, примененных в экспериментальной огневой

камере, дополнительную трудность вносит достоверное измерение коэффициента негерметичности камеры, а также шаг установки высоты регистратора параметров опасных факторов пожара, равный 0,1 м [9].

Установим различия в средних значениях методом дисперсионного анализа. В качестве нулевой гипотезы принимается утверждение: «средние параметры экспериментальных данных не зависят от параметров моделирования». Дисперсионный анализ проведен с помощью пакета анализа данных в MS Excel. Результаты дисперсионного анализа, проведенного по строкам данных, представлены в табл. 3, 4.

В табл. 4 фактическое отношение Фишера ( $F = 27,203\ 45$ ) больше критического ( $F_{\text{крит}} = 6,591\ 382$ ), следовательно, средние классы градации отличаются друг от друга, значит, исследуемый фактор существенно влияет на изменение данных. Учитывая полученную вероятность достоверности ( $P$ -Значение) нулевой гипотезы ниже предельного значения допустимой ошибки (0,05), нулевая гипотеза не принимается.

Значение  $F$ -статистики больше критического значения, соответствующего выбранному уровню значимости, дисперсии случай-

ных величин признаются неодинаковыми. Следовательно, различия в средних показателях являются статистически значимыми [10].

**Таблица 3**  
**Однофакторный дисперсионный анализ, 1-я группа данных**

Table 3  
One-factor analysis of variance, the first group of data

Группы Groups	Счет Account	Сумма The amount	Среднее Average	Дисперсия Variance
Время горения, с Gorenje time, s	2	1 429	714,5	50 244,5
Температура, °C Foamed PE	2	323	161,5	6 384,5
Содержание O <sub>2</sub> , % O <sub>2</sub> Content, %	2	16,5	8,25	10,125
Содержание CO, мг/м <sub>3</sub> CO content, mg/m <sub>3</sub>	2	9 340	4 670	1 377 800

**Таблица 4**  
**Однофакторный дисперсионный анализ, 2-я группа данных**

Table 4  
One-factor analysis of variance, the second group of data

Источник вариации The source of the variation	SS	df	MS	F	Среднее Average	Дисперсия Variance
Между группами Between groups	29 266 275	3	9 755 425	27,203 45	0,004 029	6,591 382
Внутри групп Within groups	1 434 439	4	358 609,8	—	—	—
Итого Total	30 700 714	7	—	—	—	—

### Заключение

В результате исследования подтверждена гипотеза о возможности моделирования сценариев развития опасных факторов пожара, в замкнутых объемах на объектах энергетики с помощью программы FDS при условии применения найденных поправочных коэффициентов.

Задачами дальнейшего совершенствования исследований по данному направлению

являются разработка программы эксперимента и создание огневой камеры большего объема, предусмотренного ГОСТ Р 53280.3–2009 «Установки пожаротушения автоматические. Огнетушащие вещества. Часть 3. Газовые огнетушащие вещества. Методы испытаний».

Наиболее сложной задачей продолжения исследований может стать совмещение модели пожара в замкнутых объемах и факторов воздействия огнетушащих веществ на происходящие процессы.

**СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. Молодоженцев П. В., Ищенко А. Д. Тушение пожаров на объектах энергетики в начальной стадии // Современные проблемы гражданской защиты. 2024. № 2 (51). С. 74–84. URL: <https://ntp.edufire37.ru/uploads/2024/06/СПГЗ-251-2024.pdf> (дата обращения: 09.01.2026).
2. О Стратегии в области развития гражданской обороны, защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций, обеспечения пожарной безопасности и безопасности людей на водных объектах на период до 2030 года : указ Президента РФ от 16.10.2019 № 501. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72771784/> (дата обращения: 09.01.2026).
3. Маркелов Г. Е. Основные принципы построения математических моделей // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2020. № 4. URL: <https://clck.ru/3SE2Ao> (дата обращения: 13.02.2026).
4. Собурь С. В. Пожарная безопасность объектов электроэнергетики // Инфра-Инженерия. 2023. С. 123. URL: <https://znanium.ru/catalog/document?id=475320> (дата обращения: 13.02.2026).
5. Об особенностях применения автоматических установок сдерживания пожара / А. И. Бондар [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. 2019. № 6 (28). С. 73–76. URL: <https://clck.ru/3SE2WV> (дата обращения: 12.01.2026).
6. Руководство по тушению нефти и нефтепродуктов в резервуарах и резервуарных парках, утвержденное ГУГПС МВД РФ 12.12.1999. URL: <https://vzrk.ru/public/images/31.pdf> (дата обращения: 12.01.2026).
7. ГОСТ Р 53280.3–2009. Установки пожаротушения автоматические. Огнетушащие вещества. Часть 3. Газовые огнетушащие вещества. Методы испытаний. М., 2009. 8 с.
8. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах : приказ МЧС России от 26 июня 2024 г. № 533. URL: [https://base.garant.ru/409615151/#block\\_21](https://base.garant.ru/409615151/#block_21) (дата обращения: 12.02.2026).
9. Fenix+ 3 // MST : сайт. URL: <https://mst.su/fenix3/features/> (дата обращения: 02.02.2026).
10. Семенов М. Е. Статистическое моделирование и прогнозирование. Лекция 5. Дисперсионный анализ. URL: <https://clck.ru/3SE6Fm> (дата обращения: 17.01.2025).

**REFERENCES**

1. Molodozhentsev P. V., Ishchenko A. D. Fire Extinguishing at Energy Facilities in the Initial Stage // Modern Problems of Civil Defense. 2024. No. 2 (51). Pp. 74–84. URL: <https://ntp.edufire37.ru/uploads/2024/06/СПГЗ-251-2024.pdf> (accessed 09.01.2026).
2. On the Strategy for the Development of Civil Defense, Protection of the Population and Territories from Emergencies, Ensuring Fire Safety and the Safety of People on Water Bodies for the Period up to 2030 : Decree of the President of the Russian Federation of 16.10.2019 No. 501. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72771784/> (accessed 09.01.2026).
3. Markelov G. E. Basic principles of constructing mathematical models // Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. 2020. No. 4. URL: <https://clck.ru/3SE2Ao> (accessed 13.02.2026).
4. Sobur S. V. Fire safety of electric power facilities // Infra-Engineering. 2023. P. 123. URL: <https://znanium.ru/catalog/document?id=475320> (accessed 13.02.2026).

5. On the features of the use of automatic fire containment systems / A. I. Bondar [et al.] // Pozharovzryvobezopasnost. 2019. No. 6 (28). Pp. 73–76. URL: <https://clck.ru/3SE2WV> (accessed 12.01.2026).

6. Guidelines for extinguishing oil and petroleum products in tanks and tank farms, approved by the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation on 12.12.1999. URL: <https://vzrk.ru/public/images/31.pdf> (accessed 12.01.2026).

7. GOST R 53280.3–2009. Automatic fire extinguishing systems. Fire Extinguishing Agents. Part 3. Gaseous Fire Extinguishing Agents. Test Methods. Moscow, 2009. 8 p.

8. On Approval of the Methodology for Determining the Estimated Values of Fire Risk at Industrial Facilities : Order of the Ministry of Emergency Situations of Russia dated 26.06.2024 No. 533. URL: [https://base.garant.ru/409615151/#block\\_21](https://base.garant.ru/409615151/#block_21) (accessed 12.02.2026).

9. Fenix+ 3 // MST. URL: <https://mst.su/fenix3/features/> (accessed 02.02.2026).

10. Semenov M. E. Statistical modeling and forecasting. Lecture 5. Analysis of variance. URL: <https://clck.ru/3SE6Fm> (accessed 17.01.2025).

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ**

**Молодоженцев Павел Владимирович**, начальник Специального управления ФПС № 10 МЧС России (456080, Российская Федерация, Челябинская область, г. Трехгорный, ул. Заречная, д. 13); РИНЦ ID: 1186021; SPIN-код 7232-7677; e-mail: [ugps6okvr@yandex.ru](mailto:ugps6okvr@yandex.ru)

#### **INFORMATION ABOUT AUTHOR**

**Pavel V. Molodozhentsev**, Head of the Department, Special FPS Department No. 10 of the Ministry of Emergency Situations of Russia (13 Zarechnaya St., Trekhgorny, Chelyabinsk region, 456080, Russian Federation); ID RSCI: 1186021; SPIN-code 7232-7677; e-mail: [ugps6okvr@yandex.ru](mailto:ugps6okvr@yandex.ru)