

Научная статья

УДК 614.845.1; DOI: 10.61260/2304-0130-2026-3-17-23

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУШЕНИЯ ОЧАГА ВОЗГОРАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ СЕТКАМИ В ПРОГРАММЕ FDS

✉ Кожевин Дмитрий Федорович;

Савинова Екатерина Сергеевна;

Боков Максим Дмитриевич.

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

✉ Yagmort_KDF@mail.ru

Аннотация. Применение металлических сеток для тушения пламени основано на механизме интенсивного теплоотвода в узких каналах, что обуславливает необходимость валидации численных моделей для прогнозирования эффективности сеточных огнепреградителей на очагах различного масштаба. В работе представлены результаты сопоставления лабораторных экспериментов по тушению диффузионного пламени этанола в тигле диаметром 2,2 см металлическими сетками с различным размером ячейки (0,1; 1,0 и 6,0 мм) и скоростью подачи (от 0,015 до 1,5 м/с) с данными численного моделирования в программной среде Fire Dynamics Simulator (FDS/PyroSim). Экспериментально установлено, что для мелкоячеистых сеток (0,1 и 1,0 мм) тушение достигается во всем исследованном диапазоне времен контакта, тогда как для сетки с ячейкой 6 мм горение прекращается лишь при минимальной скорости (время контакта не менее 0,13 с), что подтверждает критическую роль длительности теплоотвода. Разработанная численная модель, реализующая метод дискретного перемещения твердотельных препятствий (OBST) с использованием логических функций DEVC и CTRL, показала качественное и количественное соответствие натурным данным. В результате моделирования определено, что для сетки с ячейкой 0,1 мм срыв горения происходит при плотности теплового потока на ее поверхности порядка 20 кВт/м². Полученные результаты демонстрируют принципиальную возможность применения CFD-моделирования в среде FDS для анализа теплового воздействия металлических сеток на пламя малого размера и создают основу для дальнейшей валидации модели на очагах большего диаметра с целью разработки научно обоснованной методики масштабирования на реальные объекты.

Ключевые слова: пожаротушение, металлическая сетка, огнепреграждение, Fire Dynamics Simulator, численное моделирование, тепловой поток, этанол, ячейка сетки

Для цитирования: Кожевин Д.Ф., Савинова Е.С., Боков М.Д. Моделирование тушения очага возгорания металлическими сетками в программе FDS // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2026. № 3 (59). С. 17–23. DOI: 10.61260/2307-7476-2026-3-17-23

Scientific article

MODELING OF FIRE EXTINGUISHING WITH METAL GRIDS IN THE FDS PROGRAM

✉ Kozhevin Dmitriy F.;

Savinova Ekaterina S.;

Bokov Maksim D.

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

✉ Yagmort_KDF@mail.ru

Abstract. The use of metal grids to extinguish flames is based on the mechanism of intensive heat dissipation in narrow channels, which necessitates the validation of numerical models to predict the effectiveness of grid fire barriers on foci of various scales. The paper presents the results of comparing laboratory experiments on extinguishing a diffusion flame of ethanol in a crucible with a diameter of 2.2 cm with metal grids with different cell sizes (0.1, 1.0 and 6.0 mm) and feed rates (from 0.015 to 1.5 m/s) with numerical simulation data in the Fire Dynamics Simulator (FDS/PyroSim) software environment. It has been experimentally established that for fine-mesh grids (0.1 and 1.0 mm), extinguishing is achieved over the entire studied range of contact times, whereas for a grid with a cell of 6 mm, gorenje stops only at a minimum speed (contact time of at least 0.13 s), which confirms the critical role of the duration of heat removal. The developed numerical model, which implements the method of discrete displacement of solid-state obstacles (OBST) using the logical functions DEVC and CTRL, showed qualitative and quantitative compliance with field data. As a result of the simulation, it was determined that for a grid with a cell of 0.1 mm, gorenje occurs at a heat flux density on its surface of the order of 20 kW/m². The results obtained demonstrate the fundamental possibility of using CFD modeling in the FDS environment to analyze the thermal effect of metal grids on small flames and create the basis for further validation of the model on larger-diameter foci in order to develop a scientifically sound scaling technique for real objects.

Keywords: fire fighting, metal mesh, fire barrier, Fire Dynamics Simulator, numerical simulation, heat flow, ethanol, mesh cell

For citation: Kozhevin D.F., Radova E.V., Bokov M.D. Modeling of fire extinguishing with metal grids in the fds program // Prirodnye i tekhnogennye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty) = Natural and man-made risks (physico-mathematical and applied aspects). 2026. № 3 (59). P. 17–23. DOI: 10.61260/2307-7476-2026-3-17-23

Введение

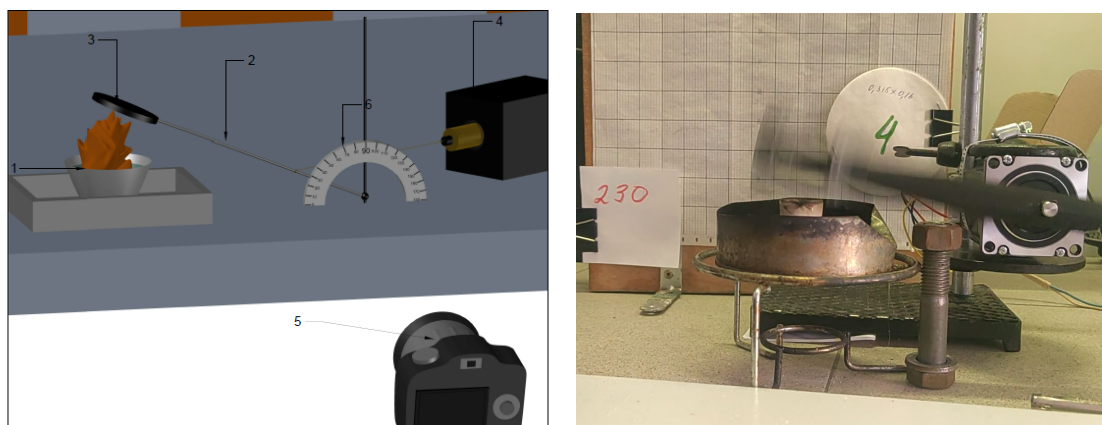
В работе [1] было обосновано, что эффект тушения огнетушащими порошковыми составами сходен с действием металлических сеток на очаг горения, в обоих случаях реализуется механизм охлаждения зоны горения в узких каналах в сетках – между нитями, в порошковом облаке – между частицами. В рамках исследования [1] были проведены натурные эксперименты по воздействию сеток разной ячеистости на очаг горения. Определены значения скорости подачи сеток различной ячеистости для эффективного тушения очага горения.

Для масштабирования полученных результатов на очаг возгорания большего размера без проведения полигонных испытаний необходимо смоделировать процесс действия сеток на очаг горения численными методами CFD – моделирования. Подходящим для этого инструментом является программа Fire Dynamics Simulator (FDS).

Моделированию тушения очага горения сетками в FDS посвящена настоящая статья.

Основная часть

В рамках исследования была проведена серия экспериментов по тушению очага горения сетками с разным размером ячеей, при подаче в очаг с разной скоростью. Конструкция установки приведена на рис. 1.



(1–тигель с горючей жидкостью, 2–поворотный кронштейн, 3–сетка 4–шаговый двигатель, 5–высокоскоростная камера, 6–транспорт)

Рис. 1. Установка определения эффективности прекращения горения сеткой

В рамках проведения экспериментов был разработан план проведения эксперимента, состоящий из 5 этапов, приведенных в табл. 1:

Таблица 1

План проведения эксперимента

№ этапа	Содержание этапа	Примечание
№1	В тигель (1) заливается 2 мл горючей жидкости	Подготовка
№2	В кронштейне (2) закрепляется сетка, заданной ячеистости	
№3	Шаговый двигатель настраивается на требуемую скорость движения, на поворот 90°, с учетом длины кронштейна 10 см	
№4	Осуществляется поджиг жидкости. Время свободного горения при проведении эксперимента 10 с	Проведение
№5	Запускается шаговый двигатель и фиксируется факт и время ликвидации горения	

В результате проведения натурного эксперимента определялся факт тушения очага горения сетками различной ячеистости, подаваемыми в очаг с различной скоростью. Результаты опыта с сетками разной ячеи при сжигании этанола в тигле диаметром 2 см приведены в табл. 2. Из данных табл. 2 следует, что для сеток с малым гидравлическим диаметром ячейки (0,1 мм) тушение достигается во всем исследованном диапазоне скоростей, вплоть до 1,5 м/с, что соответствует минимальному реализованному в эксперименте времени теплового контакта порядка 1 мс. Для сеток с ячейкой 6 мм тушение наблюдалось только при наименьшей скорости (0,015 м/с), когда время пребывания в пламени составляло не менее 0,13 с. Полученные результаты качественно согласуются с представлениями о решающей роли теплоотвода в материал сетки: при большом времени контакта даже разреженная сетка успевает отвести достаточно тепла для срыва горения, тогда как при малом времени контакта эффективны только мелкоячеистые сетки с высокой удельной поверхностью теплообмена [2].

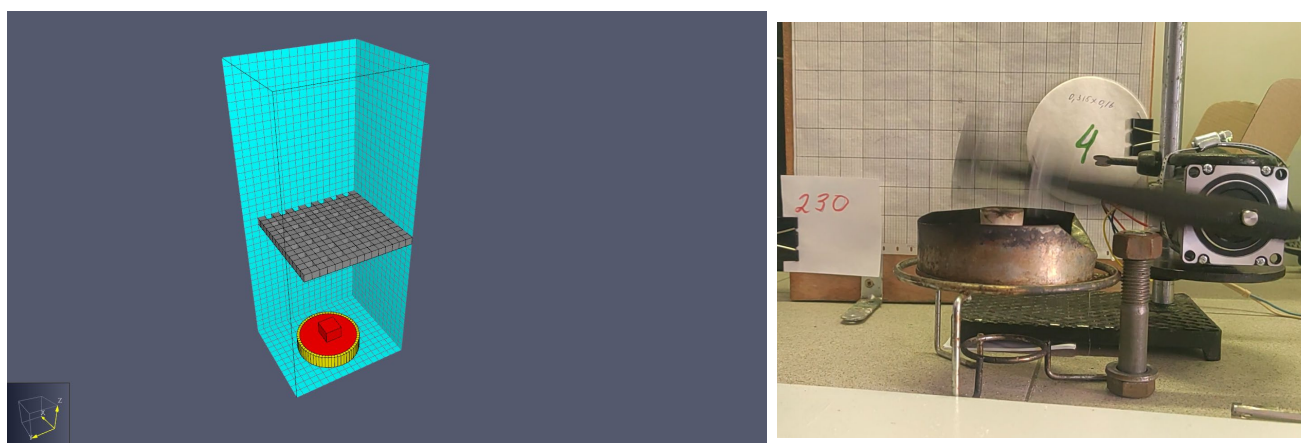
Таблица 2

Результаты определения эффективности прекращения горения сеткой

Сетка с ячейкой	Скорость движения сетки в зоне пламени, м/с	Время нахождения сетки в зоне пламени, определенное на установке* (рисунок 1), с	Результат тушения
Сетка №1 (ячейка 0,1 мм)	$1,5 \pm 0,1$	0,0013	Тушение
	$0,15 \pm 0,02$	0,013	Тушение
	$0,015 \pm 0,002$	0,13	Тушение
Сетка №2 (ячейка 1 мм)	$1,5 \pm 0,1$	0,0013	Тушение
	$0,15 \pm 0,02$	0,013	Тушение
	$0,015 \pm 0,002$	0,13	Тушение
Сетка №3 (ячейка 6 мм)	$1,5 \pm 0,1$	0,0013	Нет тушения
	$0,15 \pm 0,02$	0,013	Нет тушения
	$0,015 \pm 0,002$	0,13	Тушение

* время пребывания рассчитано как отношение характерной толщины фронта пламени (принято 2 мм) к измеренной скорости движения кронштейна.

Для достижения поставленной цели исследования была создана модель установки, приведенной рис. 1 в FDS. Установка в FDS (рис. 2), модель очага горения размерами, соответствующими экспериментальной установке. Для воспроизведения движения сетки в численной модели использовался метод дискретного перемещения твердотельного препятствия (OBST). В расчетной области создавалась последовательность идентичных объектов «сетка». В каждый момент времени активным являлся только один объект, соответствующий текущему положению кронштейна. Переключение активных объектов осуществлялось с помощью логических функций DEVC и CTRL в соответствии с заданной временной разверткой, имитирующей реальную скорость движения. Верификация такого подхода показала, что при временном интервале переключения 0,05 с погрешность в описании теплового воздействия на пламя не превышает 3% по сравнению с идеализированным непрерывным движением.

**Рис. 2. Установка определения эффективности прекращения горения сеткой в FDS**

На модели определялись параметры, при которых действия сеток на очаг горения соответствовал натурному эксперименту. Результаты и характеристики установки для моделирования в Pyrosim приведены в табл. 3.

Таблица 3

Характеристики установки в Pyrosim

Наименование характеристики	Обозначение, размерность	Численное значение
Диаметр резервуара	$d_{рез}$, м	0,022
Материал резервуара		Керамика
Материал сеток		Сталь
Вид горючей жидкости		Этанол
Массовая скорость выгорания [3]	m' , кг/(м ² с)	0,024
Низшая теплота сгорания жидкости [3]	$Q_{низ}$, МДж/кг	30
Площадь поверхности горючей жидкости	$S_{поверх}$, м ²	$3,8 \cdot 10^{-4}$
Удельная теплоемкость материала сеток	Дж/(кг К)	460
Плотность материала сетки	кг/м ³	7850
Теплопроводность материала сетки	Вт/(м·К)	45
Площадь поверхности теплоъемника (поверхность теплообмена)	м ²	0,0376
Толщина нити сетки (геометрический размер проволоки)	мм	0,5
Размер ячейки модели (параметр численной модели)	мм	0,5

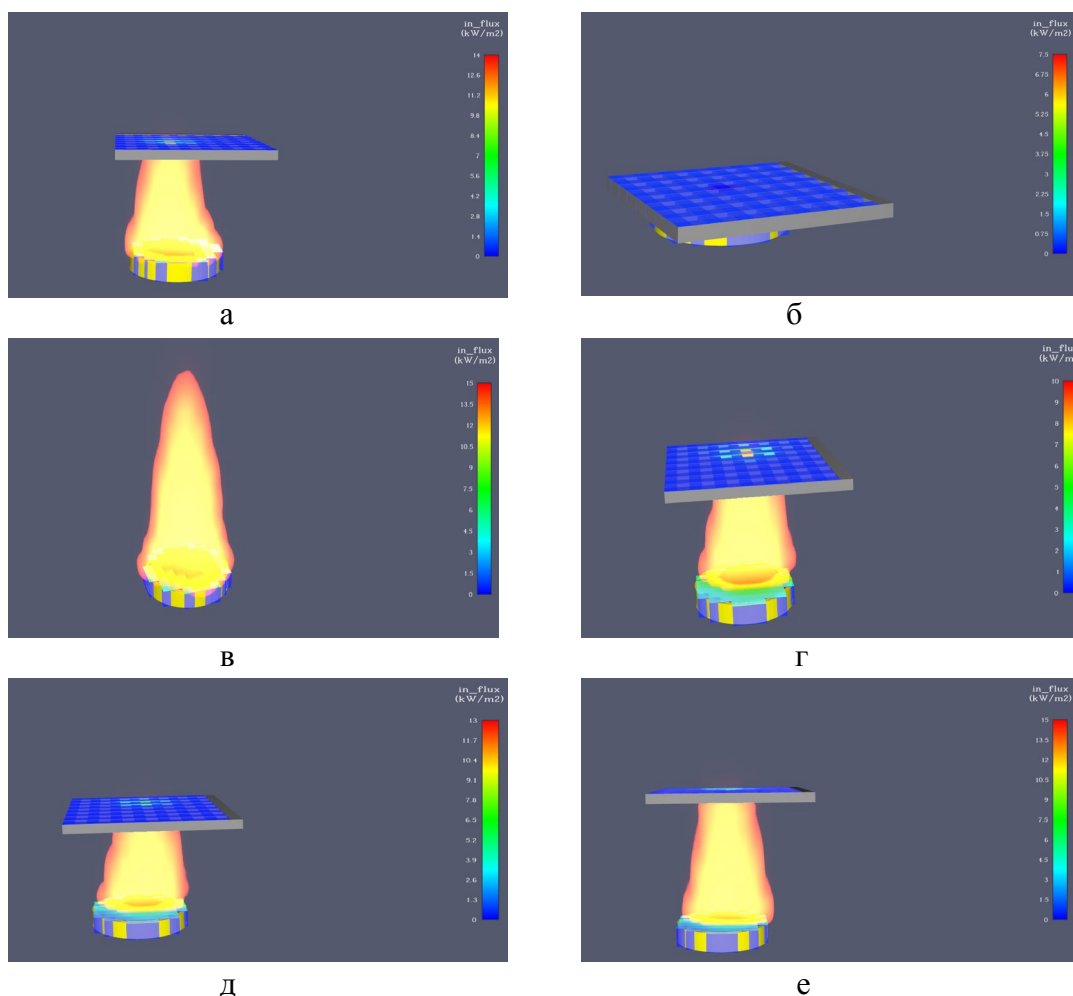
При моделировании рассматриваемого процесса в FDS, получены дополнительные результаты, которые было невозможно получить при натурном эксперименте, в первую очередь величину теплового потока, при котором был реализован эффект тушения. Полученные на установке расчетные значения мощности тепловыделения приведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты численного моделирования: параметры теплового воздействия на сетку при тушении пламени этанола

Сетка с ячейкой	Время подачи сетки в очаг горения (рисунок 1), с	Время подачи сетки в очаг горения (рисунок 2), с	Эффект тушения	Плотность теплового потока на сетку в момент тушения, кВт/м ²
Сетка №1 (ячейка 0,1 мм)	0,013	0,013	+	20

Результаты моделирования тушения очага возгорания сетками в Pyrosim приведены на рис. 3.



а – момент установившегося горения; б – ввод сетки через 0,1 с после начала движения; в – ввод сетки через 0,2 с после начала движения; г – ввод сетки через 0,3 с после начала движения; д – ввод сетки через 0,4 с после начала движения; е – момент тушения.

Рис. 3. Визуализация подачи сетки в очаг горения в Pyrosim

Заключение

В статье приведены результаты моделирования воздействия сеток на очаг горения в программе FDS. В результате численного эксперимента подобраны параметры, позволяющие моделировать тушение сетками очага горения, так как результаты численного эксперимента соответствуют натурным испытаниям.

Полученные в работе результаты демонстрируют принципиальную возможность применения CFD-моделирования в среде FDS для анализа теплового воздействия металлических сеток на диффузионное пламя малого размера. Достигнуто удовлетворительное качественное и количественное соответствие с данными лабораторного эксперимента для исследованного масштаба (диаметр тигля 2 см). Дальнейшее развитие работы должно быть направлено на валидацию модели на очагах большего диаметра (10–50 см) с целью определения границ применимости полученных критериев тушения и разработки научно обоснованной методики масштабирования на реальные объекты (резервуары, проливы).

Список источников

1. Кожевин Д.Ф. Обоснование механизма огнетушащего действия порошка на основании анализа его фракционного состава в нестационарном газопорошковом потоке // Проблемы управления рисками в техносфере. 2025. № 1 (73). С. 175–189.

2. Баратов А.Н., Иванов В.Н. Пожаротушение. М.:Химия, 1979.
3. Корольченко А.Я., Корольченко Д.А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: справочник. М.: Пожнаука, 2004. Ч. 2. 774 с.
4. Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.Н. Физические величины: справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.

References

1. Kozhevin D.F. Obosnovanie mekhanizma ognetushashchego dejstviya poroshka na osnovanii analiza ego fraktsionnogo sostava v nestatsionarnom gazoporoshkovom potoke/D.F. Kozhevin // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2025. № 1 (73). S. 175–189.
2. Baratov A.N., Ivanov V.N. Pozharotushenie. M.:Khimiya, 1979.
3. Korol'chenko A.Ya., Korol'chenko D.A. Pozharovzryvoopasnost' veshchestv i materialov i sredstva ikh tusheniya: spravochnik. M.: Pozhnauka, 2004. Ch. 2. 774 s.
4. Babichev A.P., Babushkina N.A., Bratkovskij A.N. Fizicheskie velichiny: spravochnik. M.: Energoatomizdat, 1991. 1232 s.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 20.06.2026; одобрена после рецензирования: 20.07.2026; принята к публикации: 26.07.2026

Information about the article:

The article was submitted to the editorial office: 20.06.2026; approved after review: 20.07.2026; accepted for publication: 26.07.2026

Информация об авторах:

Кожевин Дмитрий Федорович, начальник кафедры физико-химических основ процессов горения и тушения, Санкт-Петербургский ордена Почета университет ГПС МЧС России им. Героя Российской Федерации генерала армии Е. Н. Зиничева, Санкт-Петербург (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), доктор технических наук, доцент, e-mail: Yagmort_KDF@mail.ru , <https://orcid.org/0000-0002-6418-107X>, SPIN-код: 9647-7196.

Савинова Екатерина Сергеевна заместитель начальника отдела обеспечения научно-технической деятельности НИИ перспективных исследований и инновационных технологий в области безопасности жизнедеятельности, Санкт-Петербургский ордена Почета университет ГПС МЧС России им. Героя Российской Федерации генерала армии Е. Н. Зиничева, Санкт-Петербург (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149).

Боков Михаил Дмитриевич курсант группы ПБ43.510 Санкт-Петербургский ордена Почета университет ГПС МЧС России им. Героя Российской Федерации генерала армии Е. Н. Зиничева, Санкт-Петербург (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149).

Information about the authors:

Kozhevin Dmitriy F., chief of the physical and chemical bases of the burning and extinguishing processes department of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovskiy ave., 149), doctor of technical sciences, Associate Professor, e-mail: Yagmort_KDF@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6418-107X>, SPIN: 9647-7196.

Savinova Ekaterina S., Deputy Head of the Department for Supporting Scientific and Technical Activities of the Research Institute of Advanced Research and Innovative Technologies in the Field of Life Safety, Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (Moskovsky ave., 149 St. Petersburg, 196105, Russia).

Bokov Mikhail D., cadet of the PB43.510 group of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (Moskovsky ave., 149 St. Petersburg, 196105, Russia).