

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДОВОЗДУШНЫХ ОГНЕТУШАЩИХ СМЕСЕЙ

Алимбекова С.Р., д.т.н., с.н.с.

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»

Тертышный Н.С., аспирант кафедры «Робототехника»,

АНО ВО «Московский университет «Синергия»

Аннотация. В работе были проанализированы существующие способы описания двухфазного потока, численное моделирование процессов теплопередачи и массообмена, а также рассмотрены современные методы прогнозирования эффективности пожаротушения. Были выделены основные проблемы: неопределенность параметров окружающей среды, сложность описания дисперсных структур, необходимость учета нормативных требований. Были предложены рекомендации по разработке, которые включают использование CFD-моделирования, цифровых двойников и интеллектуальных алгоритмов для оптимизации параметров распыления.

Ключевые слова: водовоздушная смесь, пожаротушение, математическое моделирование, распыляющие устройства.

Развитие современных систем пожарной безопасности характеризуется переходом от статичных инженерных решений к интеллектуальным информационным, измерительным и управляющим системам, способным адаптироваться к изменяющимся условиям пожара в режиме реального времени. Особую роль в этом процессе играют установки автоматического пожаротушения, которые используют технологию смешивания воды и воздуха, обладающую высокой эффективностью за счёт комбинированного воздействия на очаг горения - охлаждения, вытеснения кислорода и ингибирования химических реакций горения [10, 8].

Актуальность разработки методов математического моделирования и алгоритмического обеспечения таких систем обусловлена рядом факторов. Во-первых, действующие нормативные требования к противопожарной защите, установленные Федеральным законом №123-ФЗ [1] и соответствующих сводах правил [2, 3], предъявляют повышенные требования к обоснованию проектных решений, которые включают в себя необходимость расчета пожарных рисков и подтверждения эффективности систем пожаротушения. Во-вторых, процессы образования и распространения водовоздушных смесей относятся к классу сложных двухфазных течений, которые характеризуются нелинейной динамикой, наличием межфазного взаимодействия и многочисленными режимами течений. Классические исследования двухфазной гидродинамики [7, 9] подтверждают, что структура потока (пузырьковый, кольцевой, дисперсный режимы) оказывает решающее влияние на распределение капель, интенсивность тепло- и массообмена, что на прямую сказывается на эффективности пожаротушения. В-третьих, результативность применения тонкораспыленной воды напрямую зависит от их дисперсного состава, скорости, концентрации и пространственного распределения. Согласно исследованиям [14, 11], существует оптимальный диапазон размеров капель при интенсивном испарении, который обеспечивает максимальный эффект охлаждения и подавления пламени. Однако оценка этих параметров является математически сложной задачей и требует применения численных методов. Дополнительная сложность вызвана необходимостью учитывать реальные условия пожара, включая динамику рассеивания тепла, состав газов в окружающей среде, влияние вентиляции и геометрию защищаемого объекта. В работе [4] показано, что интеграция моделей пожара с современными моделями инженерных систем (вентиляции, дымоудаления, пожаротушения) является необходимым условием для получения корректных результатов.

Гидродинамическое описание двухфазного потока

Классический подход к моделированию двухфазного потока изложен в фундаментальных работах по газожидкостной гидродинамике [7, 9]. В соответствии с ними водовоздушный поток может рассматриваться как:

1. континуальный (Эйлеров) подход, при котором каждая фаза описывается как взаимопроникающая сплошная среда;
2. Лагранжев подход, при котором жидкая фаза описывается как совокупность отдельных капель, движущихся в газовом потоке;
3. смешанный (Эйлера-Лагранжа), который обычно используется в задачах распыления.

Представление Эйлера описывает движение фаз системы уравнений сохранения неразрывности, импульса и энергии. При этом межфазное взаимодействие учитывается через члены обмена импульсом, теплом и массой. Существенное влияние на структуру потока оказывает режим течения, который может варьироваться от дисперсного до кольцевого, что приводит к различиям в распределении фаз и характеристиках теплообмена [7].

Дисперсный состав и динамика капель

Ключевым параметром водовоздушной смеси является дисперсный состав капель, определяемый функцией распределения по размерам. Диаметр капель оказывает решающее влияние на границу раздела фаз, интенсивность испарения, глубину проникновения в очаг возгорания, эффективность охлаждения и разбавления горючей среды. Каждая отдельная капля в газовой среде характеризуется уравнением баланса сил. Кроме того, при расчете массообмена необходимо учитывать процессы измельчения и плавления, которые приводят к изменению дисперсного состава смеси. Согласно исследованиям [14, 11] существует оптимальный диапазон размеров капель, определяемый условиями конкретного пожара. Уменьшение диаметра капель приводит к увеличению скорости испарения за счёт роста удельной поверхности, однако чрезмерное уменьшение может снижать импульс струи и ухудшать доставку воды в зону горения.

Тепло- и массообмен в водовоздушной смеси

Основным механизмом воздействия водовоздушной смеси на очаг является интенсивный тепло- и массообмен между каплями воды, горячими газами и пламенем. Процесс испарения капли является нестационарным теплообменом с фазовым переходом, скорость испарения в котором определяется:

- температурой окружающей среды;
- размером капли;
- коэффициентами тепло- и массоотдачи;

- относительной скоростью между фазами.

В работе [11] показано, что испарение капель вызывает значительное снижение температуры в зоне горения. Испарение приводит к разбавлению кислорода водяным паром, что снижает интенсивность химических реакций. Кроме того, водяной туман влияет на радиационный теплообмен, экранируя тепловое излучение и снижая тепловой поток к горючим материалам [8].

Моделирование взаимодействия водовоздушной смеси с очагом пожара

При моделировании поведения водовоздушной смеси необходимо учитывать её взаимодействие с развивающимся пожаром, который представляет собой сложную термохимическую систему. Параметры пожара, такие как температура, скорость тепловыделения, состав газовой среды, существенно влияют на поведение смеси, а именно:

- повышение температуры ускоряет испарение капель;
- турбулентность усиливает перемешивание фаз;
- наличие продуктов горения изменяет теплофизические свойства среды.

Интеграция моделей пожара и систем пожаротушения является необходимым условием описания процесса. Это подтверждается в работе [4], где показана необходимость учета совместного влияния вентиляции, дымоудаления и систем пожаротушения.

Для описания процессов взаимодействия водовоздушной смеси с очагом пожара применяются методы вычислительной гидродинамики (CFD). Основы численных методов изложены в работах Патанкара [6] и Зенкевича [5], где рассматриваются конечно-разностные и конечно-элементные подходы. Современные исследования [14, 13] демонстрируют возможность оптимизации параметров распыла (размер капель, скорость, угол факела) с использованием численного моделирования. Моделирование также используется для анализа динамики пожара и дымообразования [12, 15], что позволяет учитывать реальные условия эксплуатации систем пожаротушения.

Заключение

В результате проведённого анализа установлено, что моделирование водовоздушных огнетушащих смесей представляет собой сложную научно-техническую задачу, находящуюся на пересечении гидродинамики двухфазных потоков, теплофизики, теории горения и методов вычислительной математики. Существующие исследования в области газожидкостных течений [7, 9] и численного моделирования [6, 5] создают теоретическую основу для описания данных процессов, однако их применение к задачам пожаротушения требует дополнительной адаптации с учётом специфики взаимодействия распылённой жидкости с очагом пожара.

Таким образом, теоретические основы моделирования водовоздушных смесей включают совокупность взаимосвязанных моделей гидродинамики, тепло- и массообмена, а также дисперсной структуры потока. Особенность задачи определяет необходимость применения комплексных численных методов и создания специализированного алгоритмического обеспечения, ориентированного на задачи прогнозирования и оптимизации параметров огнетушащих смесей.

В целом можно заключить, что дальнейшее развитие методов моделирования водовоздушных смесей должно быть направлено на повышение эффективности математических моделей, снижение вычислительной сложности алгоритмов и их интеграцию в интеллектуальные системы управления пожаротушением. Это позволит обеспечить переход от статических проектных решений к динамическим системам прогнозирования и управления, способным эффективно функционировать в условиях неопределенности и быстро меняющихся параметров пожара.

Литература

1. Федеральный закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ (ред. от 25.12.2023) «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности».
2. СП 10.13130.2020 «Системы противопожарной защиты. Внутренний противопожарный водопровод. Нормы и правила проектирования».
3. СП 505.1311500.2021 «Расчет пожарного риска. Требования к оформлению» (утв. приказом МЧС России от 29.09.2021 № 645).
4. Пузач С. В., Богатищев А. И., Зернов С. И., Карпов С. Ю. Расчёт фактических пределов огнестойкости строительных конструкций с учётом реальных параметров пожара, действий систем пожаротушения, механической вентиляции и дымоудаления (Математическая модель и методика). – Саранск : Морд. кн. изд. : Ковылк. тип., 2004. – 80 с.
5. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация : пер. с англ. – М. : Мир, 1986. – 318 с.

6. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости : пер. с англ. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.

7. Хьюитт Дж., Холл-Тейлор Н. Кольцевые двухфазные течения : пер. с англ. – М. : Энергия, 1974. – 408 с.

8. Mawhinney J. R., Back III G. G. Water Mist Fire Suppression Systems // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. – 2002. – P. 4.311-4.337.

9. Baker J. L. L. Flow regime transitions at elevated in vertical two-phase flow. – ANL-7093.

10. Farrell K., Hassan Md K., Hossain Md D., Ahmed B., Rahnamayiezekavat P., Douglas G., Saha S. Water Mist Fire Suppression Systems for Building and Industrial Applications: Issues and Challenges // Fire. – 2023. – Vol. 6, № 2. – Art. 40. – DOI: 10.3390/fire6020040.

11. Ferng Y.-M., Liu C.-H. Numerically investigating fire suppression mechanisms for the water mist with various droplet sizes through FDS Code // Nuclear Engineering and Design. – 2011. – Vol. 241. – P. 3142-3148.

12. Hu G. Research on the Fire of High-rise Residential Building Based on Pyrosim Numerical Simulation // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – Vol. 455. – Art. 012059. – DOI: 10.1088/1755-1315/455/1/012059.

13. Jenft A., Collin A., Boulet P., Pianet G., Breton A., Muller A. Experimental and numerical study of pool fire suppression using water mist // Fire Safety Journal. – 2014. – Vol. 67. – P. 1-12.

14. Wang Z., Wang W., Wang Q. Optimization of water mist droplet size by using CFD

Автор: Алимбекова С.Р., Тертышный Н.С.

21.05.2026 15:27 - Обновлено 21.05.2026 15:28

modeling for fire suppressions // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2016.
– Vol. 44. – P. 626-632.

15. Moinuddin K., Tanaka F. Modelling smoke temperature distribution in tunnel fires. – URL:
<https://www.researchgate.net/publication/332035854> (дата обращения: 18.05.2026).