

Научная статья

УДК 621.45.034.36

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=176844>

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУЙНО-ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ФОРСУНКИ СПРИНКЛЕРНОЙ СИСТЕМЫ МЕТОДОМ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ С УЧЕТОМ ДИСПЕРСНОСТИ СРЕДЫ

Татьяна Александровна Башарина¹, Дмитрий Павлович Шматов²,

Сергей Евгеньевич Глебов³✉, Иван Васильевич Акользин⁴

^{1,2,3,4}Общество с ограниченной ответственностью научно-производственное предприятие "Интерполярис",

Нововоронеж, Россия

¹ta@interpolyaris.ru

²shmatov@inlerpolyaris.ru

³se_glebov@mail.ru✉

⁴akolziniv@interpolyaris.ru

Аннотация. Спринклерные системы атомных станций являются одним из ключевых механизмов ликвидации последствий проектных аварий, что обуславливает высокие требования к разработке форсунок, входящих в состав спринклерных систем. В статье представлены результаты вычислительного эксперимента функционирования спринклерной форсунки в постановке сплошной среды с использованием морфологии Continuous fluid и дисперсной среды – Dispersed fluid. Для вычислительного эксперимента в постановке задачи с учетом дисперсности среды

аналитическим методом определены средние размеры дисперсных частиц. В ходе исследований в широком диапазоне расходной характеристики был определен основной параметр спринклерной форсунки: угол распыла факела. Была проведена валидация результатов вычислительного эксперимента и исследовательских испытаний спринклерной форсунки, в результате чего была установлена высокая степень достоверности в постановке сплошной среды, при относительной погрешности, достигающей 25 %, и высокая степень точности в постановке с дисперсностью среды с относительной погрешностью менее 3 % на каждой экспериментальной точке, что свидетельствует о возможности снижения затрат на разработку спринклерных систем и стендового оборудования путем замены натуральных испытаний вычислительным экспериментом.

Ключевые слова: спринклерная форсунка, численное моделирование, угол распыла, гидравлические испытания, локализующая система безопасности

Для цитирования: Башарина Т.А., Шматов Д.П., Глебов С.Е., Акользин И.В. Исследование струйно-центробежной форсунки спринклерной системы атомной электростанции методом вычислительного эксперимента на основе математической модели с учетом дисперсности среды // Труды МАИ. 2023. № 132. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=176844>

Original article

INVESTIGATION OF JET-CENTRIFUGAL NOZZLE OF SPRINKLER SYSTEM BY COMPUTATIONAL EXPERIMENT WITH CONSIDERATION OF MATHEMATICAL MODEL OF MEDIUM DISPERSIBILITY

Tatiana A. Basharina¹, Dmitry P. Shmatov², Sergey E. Glebov³✉, Ivan V. Akolzin⁴

^{1,2,3,4}Scientific and production enterprise «Interpolyaris» limited liability company, Novovoronezh, Russia

¹ta@interpolyaris.ru

²shmatov@inlerpolyaris.ru

³se_glebov@mail.ru✉

⁴akolziniv@interpolyaris.ru

Abstract. Sprinkler systems of nuclear power plants (NPP) are one of the key mechanisms for eliminating the consequences of design basis accidents, which stipulates high requirements for the development of nozzles as parts of sprinkler systems. The article presents the results of computational experiment of sprinkler nozzle functioning in the continuous medium formulation, employing Continuous medium morphology and Dispersed medium morphology. Average sizes of dispersed particles were determined for the computational experiment in the formulation with regard to the medium dispersity. The basic parameter of the sprinkler nozzle, namely the angle of the torch atomization, was determined on the experiment in the wide range of the flow characteristic. The computational experiment results validation and research tests of the sprinkler nozzle was performed, which results revealed the high degree of uncertainty in the continuous medium formulation, with relative error reaching up to 25%, and high degree of certainty with the

dispersive medium formulation with relative error less than 3% in each experimental point. The above said is indicative of the possibility of cost reduction on the sprinkler system and test rig development by natural tests replacing with the computational experiment.

Keywords: sprinkler nozzle, numerical simulation, spray angle, hydraulic tests, localizing safety system

For citation: Basharina T.A., Shmatov D.P., Glebov S.E., Akolzin I.V. Investigation of jet-centrifugal nozzle of nuclear power plant sprinkler system by computational experiment with consideration of mathematical model of medium dispersibility. *Trudy MAI*, 2023, no.132. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=176844>

Введение

Спринклерная форсунка является ключевым элементом спринклерной системы охлаждения герметичной оболочки локализирующей системы безопасности атомных электростанций (АЭС) [1]. К оборудованию, обеспечивающему безопасность работы АЭС и ликвидации последствий аварий, предъявляются высокие требования к проведению научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР), выраженные в обязательном проведении ряда испытаний для подтверждения работоспособности и безопасности оборудования. Испытания изделий требуют проведения дополнительных работ по созданию или модернизации стендового оборудования, что влечет за собой значительное увеличение затрат и сроков на осуществление НИОКР. В связи с этим, составление инженерных методов

исследования и разработки оборудования АЭС, обеспечивающих высокую степень достоверности, является актуальной задачей современного машиностроения.

Постановка задачи

Целью работы является разработка инженерного метода исследования функционирования спринклерной форсунки, позволяющего заменить натурные испытания вычислительным экспериментом с высокой степенью достоверности и снизить затраты и сроки проведения НИОКР.

Спринклерная форсунка представляет собой однокомпонентную струйно-центробежную форсунку с внешним смещением, распыляющую раствор борной кислоты низкой концентрации под действием сил, возникающих при интенсивном вращательном движении (закручивании) потока внутри форсунки. Закрутка рабочей среды обеспечивается завихрителем (шнеком), имеющим на наружной поверхности винтовую резьбу, двигаясь по которой рабочая среда приобретает вращательное движение относительно оси форсунки, поступая далее в сопло и вытекая из него в виде тонкой полый пелены конусообразной формы, представляющей собой раздробленные капли жидкости. Внутри шнека расположена струйная часть спринклерной форсунки, выполненная в виде цилиндрического канала, соосного оси шнека, выполняющая важную функцию – заполнение полый части факела распыла.

На рисунке 1 представлена 3D-модель спринклерной форсунки в продольном разрезе с габаритными размерами.

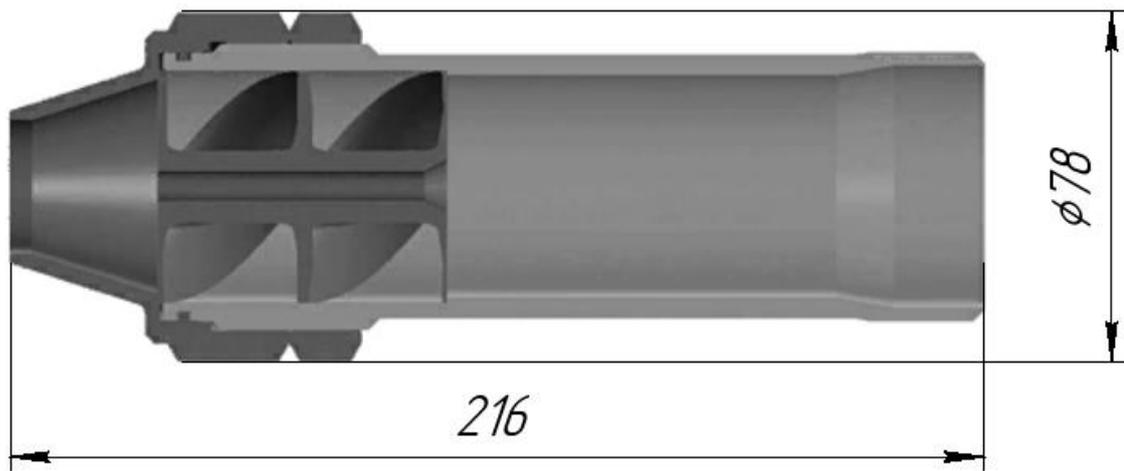


Рисунок 1 – 3D-модель спринклерной форсунки

Описание математической модели

Вычислительный эксперимент спринклерной форсунки осуществлялся в двух постановках: сплошной среды с морфологией Continuous fluid и дисперсной среды с морфологией Dispersed fluid в программном обеспечении Ansys CFX. Рабочая среда – раствор борной кислоты, представляет собой несжимаемую реальную жидкость.

Математическая модель динамики несжимаемой реальной жидкости как сплошной среды в постановке Continuous fluid описывается классическим уравнением гидродинамики – уравнением Навье-Стокса:

$$\rho \frac{\partial(\bar{U})}{\partial t} = -\rho g - grad(p) + \mu \Delta \bar{U}, \quad (0.1)$$

где ρ – плотность несжимаемой рабочей среды, \bar{U} – вектор абсолютной скорости рабочей среды, p – статическое давление рабочей среды, μ – коэффициент динамической вязкости рабочей среды.

Математическая модель дисперсной среды (индекс β в уравнении) в постановке Dispersed fluid выражается системой уравнений, содержащей уравнение Навье-Стокса (0.1) и уравнение движения дисперсных частиц рабочей среды внутри сплошной среды (индекс α в уравнении) – модели окружающего воздуха:

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_a \rho_a U_a) + \nabla(r_a(\rho_a U_a \times U_a)) = \nabla \cdot (r_a \mu_a (\nabla U_a + (\nabla U_a)^T)) - r_a \nabla p_a + \sum_{\beta=1}^2 (\Gamma_{\alpha\beta}^+ U_\beta - \Gamma_{\beta\alpha}^+ U_\alpha) + S_{Ma} + M_a, \quad (0.2)$$

где r_a – объемная доля фазы сплошной среды, ρ_a – постоянная плотность сплошной среды, U_a – вектор абсолютной скорости сплошной среды, μ_a – коэффициент динамической вязкости сплошной среды, $\sum_{\beta=1}^2 (\Gamma_{\alpha\beta}^+ U_\beta - \Gamma_{\beta\alpha}^+ U_\alpha)$ – член уравнения, учитывающий изменение импульса системы вследствие взаимодействия фаз, S_{Ma} – величина, показывающая изменение импульса вследствие воздействия внешних сил, M_a – член уравнения, описывающий межфазные взаимодействия.

Величина M_a , представляет межфазные силы в уравнении (0.2), возникающие вследствие действия диссипационных сил на частицы дисперсной фазы со стороны сплошной среды, и может быть записана в виде:

$$M_a = \frac{3}{4} \cdot \frac{C_D}{D_p} \cdot \rho_a \cdot r_\beta (U_\beta - U_\alpha)^2, \quad (0.3)$$

где C_D – суммарный коэффициент сопротивления, r_β – объемная доля фазы дисперсной среды.

Входящий в уравнение (0.3) диаметр дисперсных частиц D_p рабочей среды зависит от ряда параметров, таких как:

- массовый расход рабочей среды;
- давление на входе в спринклерную форсунку;
- плотность рабочей среды.

Переменная D_p является функцией, зависящей от критериев Вебера и Лапласа:

$$D_p = 269[\text{мм}] \cdot La^{-0,35} \cdot We^{-0,483},$$

где La , We – критерии Лапласа и Вебера соответственно.

Критерий Лапласа вычисляется по формуле:

$$La = \frac{\rho \cdot \delta \cdot \sigma}{\mu^2},$$

где δ – характерная толщина распыла.

Критерий Вебера вычисляется по формуле:

$$We = \frac{\rho \cdot w_a \cdot d}{\sigma},$$

где d – диаметр сопла спринклерной форсунки на выходе, w_a – скорость рабочей среды на выходе из спринклерной форсунки.

Скорость рабочей среды на выходе из спринклерной форсунки вычисляется по формуле:

$$w_a = \frac{4 \cdot \dot{m}}{\pi \cdot \rho \cdot d^2},$$

где \dot{m} – массовый расход рабочей среды.

Вычислительный эксперимент

Для проведения вычислительного эксперимента была создана геометрическая модель проточной области спринклерной форсунки, содержащая цилиндрическую расчетную область, имитирующую впрыск рабочей среды в пространство и предназначенную для измерения угла факела распыла (рисунок 2). Расчетная область разбивается на конечные элементы – тетраэдры. Для корректности расчета движения рабочей среды вблизи стенок создаются десять пристеночных призматических слоев с плавным увеличением толщины слоя в 1,1 раза перпендикулярно внешней границе конечно-элементной модели.

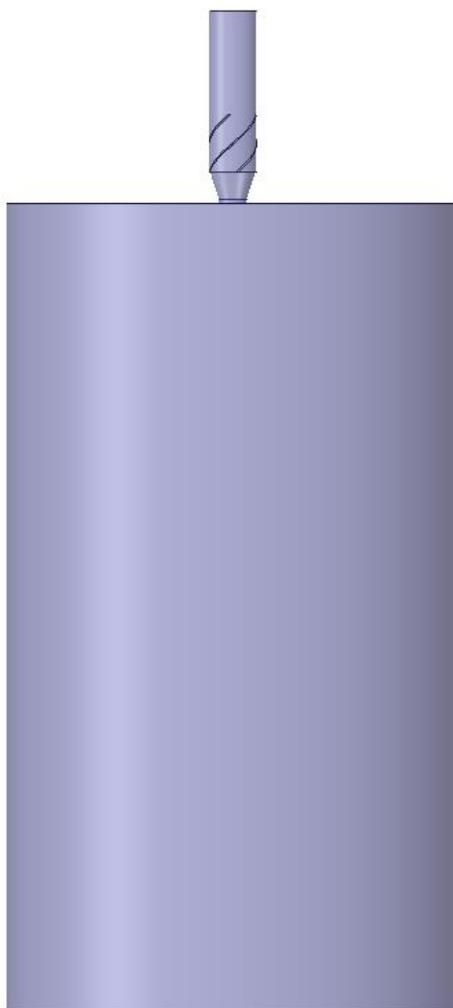


Рисунок 2 – Проточная область спринклерной форсунки

Вид полученной конечно-элементной модели в осевом сечении приведен на рисунке 3. Общий размер конечно-элементной модели составил 5171245 узлов при числе элементов в 28367257 единиц. Вид конечно-элементной модели представлен на рисунке 3.

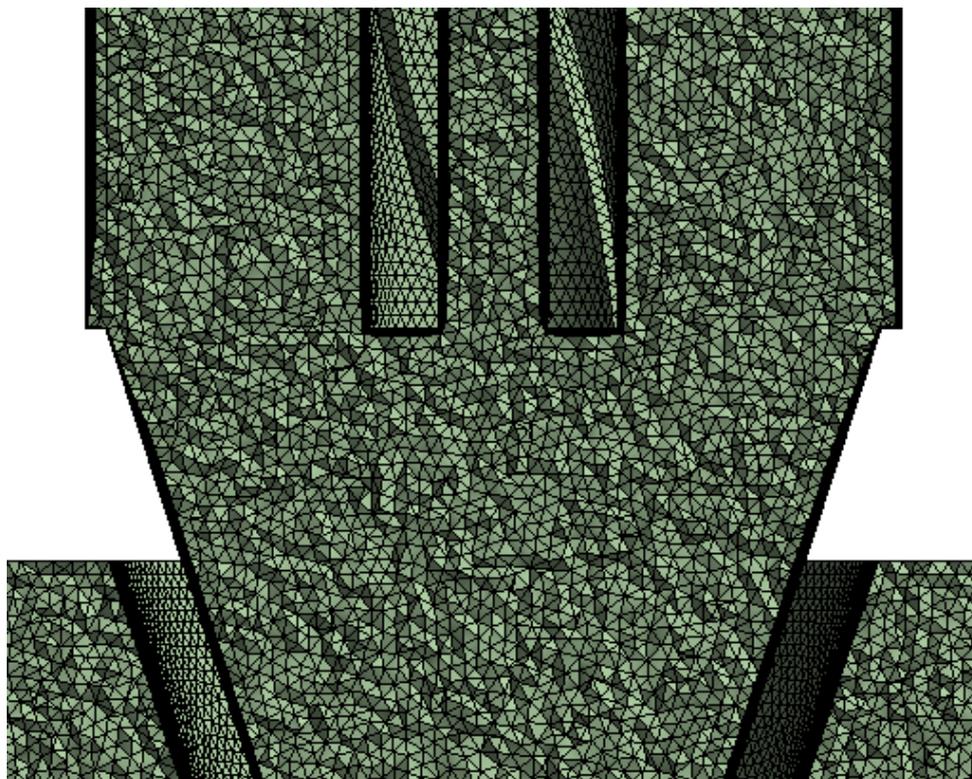


Рисунок 3 – Конечно-элементная модель форсунки

Вычислительный эксперимент проводился в изотермической постановке, модель турбулентности – Shear Stress Transport, теплофизические свойства рабочей среды аналогичны свойствам воды в связи с низкой концентрацией борной кислоты. В расчете была обусловлена имитация впрыска рабочей среды в атмосферу. Использовалась двухфазная модель – дисперсные капли рабочей среды и сплошная среда окружающего воздуха. Граничными условиями являлись массовый расход рабочей среды на входе в форсунку и атмосферное давление на выходе в расчетную область (параметры выходного сечения – Opening).

Вычислительный эксперимент проводился в диапазоне расходной характеристики от 2,60 кг/с до 5,13 кг/с. В таблице 1 представлены исследуемые

режимы работы спринклерной форсунки в части избыточного давления на входе и массового расхода рабочей среды.

Таблица 1

Режимы работы спринклерной форсунки

№	Избыточное давление рабочей среды на входе, кгс/см ²	Массовый расход рабочей среды, кг/с
1	0,1	2,69
2	0,15	3,44
3	0,2	4,15
4	0,3	5,13

Для постановки расчета на основе морфологии Dispersed fluid были рассчитаны средние диаметры дисперсных капель рабочей среды, представленные в таблице 2 в соответствии с режимами работы форсунки на основе уравнений (0.1) – (0.3).

Таблица 2

Средние значения диаметров дисперсных капель рабочей среды

№	Средний диаметр капли рабочей среды, мм
1	0,079
2	0,062
3	0,052
4	0,042

Результаты вычислительного эксперимента в постановке сплошной среды с морфологией Continuous fluid и дисперсной среды с морфологией Dispersed fluid представлены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты вычислительного эксперимента

№	Угол факела распыла форсунки (Continuous Fluid)	Угол факела распыла форсунки (Dispersed Fluid)
1	35°28′	49°15′
2	39°39′	56°30′
3	43°43′	63°11′
4	46°40′	66°4′

Как видно из таблицы 3, при разных постановках математической модели вычислительного эксперимента максимальное отклонение значений угла факела распыла на одинаковых режимах работы форсунки составляет 30 %.

Измерение значения угла факела распыла форсунки определялось в расчетной модели по линиям тока, представляющим собой линии в пространстве, направление касательной к которым в данный момент времени в каждой точке совпадает с направлением вектора скорости в этой точке. На рисунке 4 представлены углы факела распыла форсунки при постановке расчетной модели с учетом дисперсности среды.

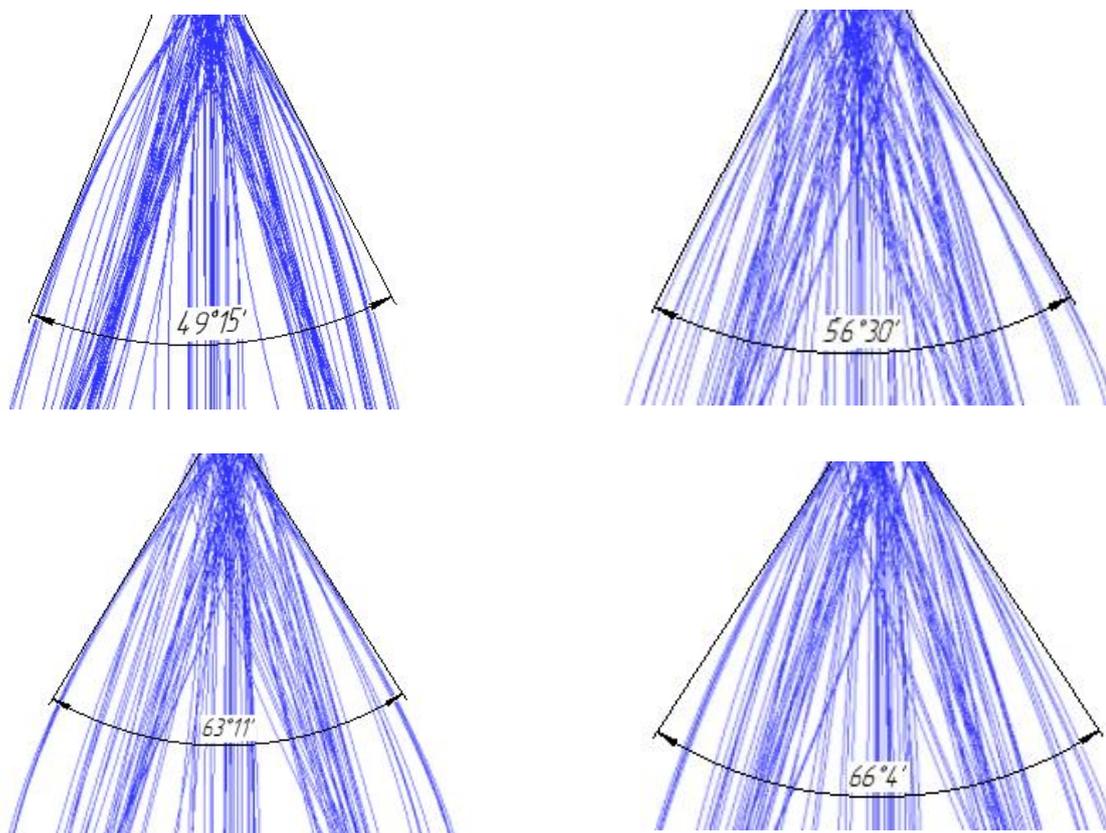


Рисунок 4 – Измерение угла факела распыла спринклерной форсунки

Для установления достоверной математической модели вычислительного эксперимента были проведены экспериментальные исследования спринклерной форсунки на режимах работы, представленных в таблице 1. На рисунке 5 представлены испытания форсунки.

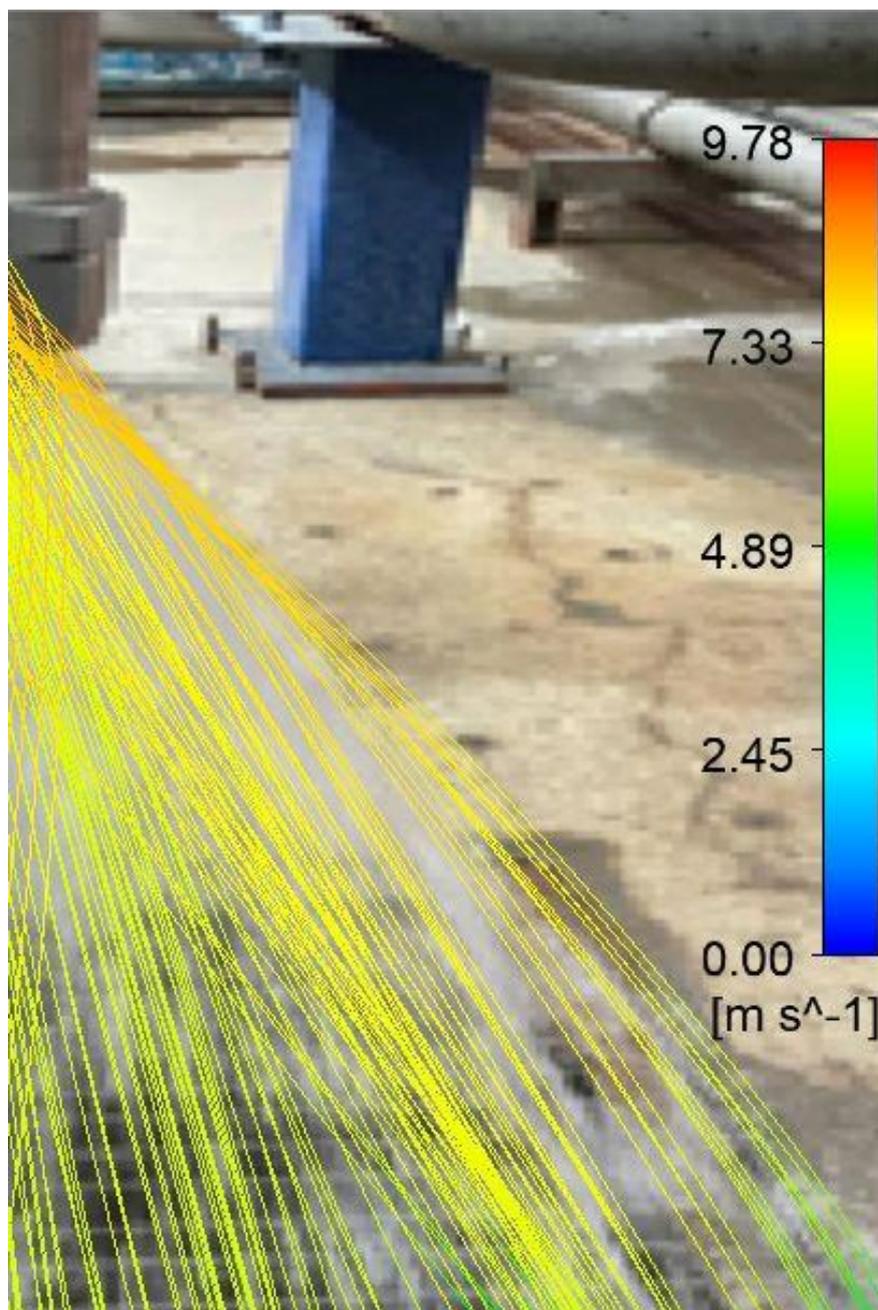


Рисунок 5 – Гидродинамические испытания спринклерной форсунки при наложении линий тока вычислительного эксперимента

На рисунке 5 цветом на цветовой шкале показано значение абсолютной скорости рабочей среды. Результаты валидации вычислительного эксперимента в двух постановках и гидродинамических испытаний представлена в таблице 4 с указанием погрешности вычислений.

Таблица 4

Результаты валидации вычислительного эксперимента и гидродинамических испытаний

№	Угол факела распыла форсунки по результатам испытаний, °	Относительная погрешность с морфологией Continuous Fluid	Относительная погрешность с морфологией Dispersed Fluid
1	49°46′	28,64 %	1,04 %
2	56°23′	29,94 %	0,20 %
3	64°48′	32,64 %	2,49 %
4	66°11′	29,81 %	2,09%

Полученная существенная разница в значениях угла распыла при расчете различных морфологий объясняется наличием дополнительных внешних сил, действующих на рабочую среду в процессе функционирования спринклерной форсунки, а именно силы сопротивления движению – диссипативной силы, направленной в каждый момент времени по касательной к линиям тока рабочей среды. На рисунке б показано направление действия суммарной силы сопротивления, действующей на каплю со стороны жидкости, модуль которой вычисляется согласно уравнению (0.3).

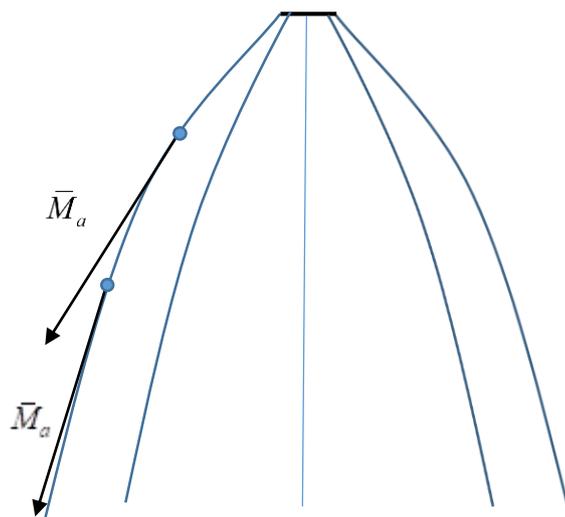


Рисунок 6 – Схема отбрасывания капель жидкости

По рисунку 6 заметно, что сила сопротивления в каждый момент времени расширяет конус пелены распыла путем отбрасывания отдельных дисперсных частиц от оси форсунки, и таким образом, увеличивает угол распыла.

Сравнение вычислительного эксперимента с гидродинамическими испытаниями подтвердило высокую степень недоверности при постановке математической модели с морфологией сплошной среды, максимальное отклонение значение угла факела распыла форсунки составляет более 32 %, что является недопустимым при проектировании критически важного оборудования атомной промышленности.

Математическая модель с учетом дисперсности рабочей среды имеет высокую степень достоверности, максимальное отклонение значений угла факела распыла не превышает 2,5 %.

Заключение

Таким образом, совокупность вычислительного эксперимента с аналитическим методом расчета среднего диаметра дисперсных капель рабочей среды обеспечивает высокую степень достоверности результатов, обуславливая возможность замены натуральных испытаний струйно-центробежных форсунок спринклерных систем безопасности с целью сокращения затрат и сроков на проведение НИОКР.

Список источников

1. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Физматгиз, 1963. - 708 с.
2. Егорычев В.С. Расчет и проектирование смесеобразования в камере ЖРД. – Самара: СГАУ, 2011. - 99 с.
3. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1992. - 662 с.
4. Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления. – М.: Недра, 1982. - 224 с.
5. Ashwani K. Gupta, D.G. Lilley, Nick Syred. Swirl Flows. Energy and engineering science series, Abacus Press, 1984, 475 p. DOI: [10.1016/0010-2180\(86\)90133-1](https://doi.org/10.1016/0010-2180(86)90133-1)
6. Wei Zhou, Kai He, Jiannan Cai, Shaojie Hu, Jihua Li, Ruxu Du. Simulation and Experimental Study on Cavitating Water Jet Nozzle // IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 2017, vol. 51. DOI: [10.1088/1755-1315/51/1/012006](https://doi.org/10.1088/1755-1315/51/1/012006)
7. Zalkind V.I., Zeigarnik Yu. A., Nizovskiy V.L., Nizovskiy L.V., Schigel S.S. Superheated Water Atomization: Some New Aspects of Control and Determining Disperse

Characteristics of Atomization Plume in Micron and Submicron Ranges of Droplet Size // Journal of Physics Conference Series, 2017, vol. 891. DOI: [10.1088/1742-6596/891/1/012011](https://doi.org/10.1088/1742-6596/891/1/012011)

8. Семкин Е.В. Методика моделирования процесса течения жидкости в смесителе, состоящем из двух малорасходных центробежных форсунках // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. № 4. С. 141-154. DOI: [10.18287/2541-7533-2018-17-4-141-154](https://doi.org/10.18287/2541-7533-2018-17-4-141-154)

9. Abbasalizadeha M., Jafarmadara S., Shirvanib H. The Effects of Pressure Difference in Nozzle's two Phase Flow on the Quality of Exhaust Mixture // International Journal of Engineering, 2013, vol. 26, no. 5. DOI: [10.5829/idosi.ije.2013.26.05b.12](https://doi.org/10.5829/idosi.ije.2013.26.05b.12)

10. Никитченко Ю.А. О целесообразности учета коэффициента объемной вязкости в задачах газовой динамики // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2018. № 2. С. 128-138. DOI: [10.7868/S0568528118020135](https://doi.org/10.7868/S0568528118020135)

11. Sadiki A., Repp S., Schneider C., Dreizler A., Janicka J. Numerical and experimental investigations of confined swirling combustions flows // Progress in Computational Fluid Dynamics, 2003, vol. 3, no. 2-4, pp. 78-88. DOI: [10.1504/PCFD.2003.003778](https://doi.org/10.1504/PCFD.2003.003778)

12. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. - М.: Государственное изд-во физико-математической литературы, 1960. - 715 с.

13. Дулов В.Г., Лукьянов Г.А. Газодинамика процессов истечения. - Новосибирск: Наука, 1984. - 235 с.

14. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. - М.: Дрофа, 2003. - 846 с.

15. Аникеев А.А., Молчанов А.М., Янышев Д.С. Основы вычислительного теплообмена и гидродинамика. - М.: МАИ, 2010. - 149 с.
16. Молессон Г.В. Численное исследование растекания струи при ее нормальном падении // Труды ЦАГИ. 1988. № 2411. С. 30-41.
17. Темнов А.Н., Шкапов П.М., Чжаокай Ю. Механический аналог колебаний маловязкой жидкости с учетом капиллярного эффекта // Труды МАИ. 2023. № 129. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=173024>. DOI: [10.34759/trd-2023-129-12](https://doi.org/10.34759/trd-2023-129-12)
18. Сназин А.А., Шевченко А.В., Панфилов Е.Б. Исследование локальной адаптации сетки конечных элементов в задаче обтекания тела сверхзвуковым потоком // Труды МАИ. 2022. № 125. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=168165>. DOI: [10.34759/trd-2022-125-06](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-06)
19. Бакланов А.В., Краснов С.Д., Гараев А.И. Исследование параметров факела за форсункой со струйной и закрученной подачей топлива // Труды МАИ. 2020. № 113. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=117960>. DOI: [10.34759/trd-2020-113-03](https://doi.org/10.34759/trd-2020-113-03)
20. Бакланов А.В., Макаров Г.Ф., Васильев А.А., Нуждин А.А. Влияние изменения геометрии газовой форсунки на угол распространения топливной струи // Труды МАИ. 2019. № 104. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=102105>

References

1. Vargaftik N.B. *Spravochnik po teplofizicheskim svoistvam gazov i zhidkosti* (Handbook on thermophysical properties of gases and liquids), Moscow, Fizmatgiz, 1963, 708 p.

2. Egorychev V.S. *Raschet i proektirovanie smeseobrazovaniya v kamere ZhRD* (Calculation and design of mixture formation in the LRE chamber), Samara, SGAU, 2011, 99 p.
3. Idel'chik I.E. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam* (Handbook of hydraulic resistance), Moscow, Mashinostroenie, 1992, 662 p.
4. Al'tshul' A.D. *Gidravlicheskie soprotivleniya* (Hydraulic resistance), Moscow, Nedra, 1982, 224 p.
5. Ashwani K. Gupta, D.G. Lilley, Nick Syred. *Swirl Flows. Energy and engineering science series*, Abacus Press, 1984, 475 p. DOI: [10.1016/0010-2180\(86\)90133-1](https://doi.org/10.1016/0010-2180(86)90133-1)
6. Wei Zhou, Kai He, Jiannan Cai, Shaojie Hu, Jiuhua Li, Ruxu Du. Simulation and Experimental Study on Cavitating Water Jet Nozzle, *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2017, vol. 51. DOI: [10.1088/1755-1315/51/1/012006](https://doi.org/10.1088/1755-1315/51/1/012006)
7. Zalkind V.I., Zeigarnik Yu. A., Nizovskiy V.L., Nizovskiy L.V., Schigel S.S. Superheated Water Atomization: Some New Aspects of Control and Determining Disperse Characteristics of Atomization Plume in Micron and Submicron Ranges of Droplet Size, *Journal of Physics Conference Series*, 2017, vol. 891. DOI: [10.1088/1742-6596/891/1/012011](https://doi.org/10.1088/1742-6596/891/1/012011)
8. Semkin E.V. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie*, 2018, no. 4, pp. 141-154. DOI: [10.18287/2541-7533-2018-17-4-141-154](https://doi.org/10.18287/2541-7533-2018-17-4-141-154)
9. Abbasalizadeha M., Jafarmadara S., Shirvanib H. The Effects of Pressure Difference in Nozzle's two Phase Flow on the Quality of Exhaust Mixture, *International Journal of Engineering*, 2013, vol. 26, no. 5. DOI: [10.5829/idosi.ije.2013.26.05b.12](https://doi.org/10.5829/idosi.ije.2013.26.05b.12)

10. Nikitchenko Yu.A. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Mekhanika zhidkosti i gaza*, 2018, no. 2, pp. 128-138. DOI: [10.7868/S0568528118020135](https://doi.org/10.7868/S0568528118020135)
11. Sadiki A., Repp S., Schneider C., Dreizler A., Janicka J. Numerical and experimental investigations of confined swirling combustions flows, *Progress in Computational Fluid Dynamics*, 2003, vol. 3, no. 2-4, pp. 78-88. DOI: [10.1504/PCFD.2003.003778](https://doi.org/10.1504/PCFD.2003.003778)
12. Abramovich G.N. *Teoriya turbulentnykh strui* (Theory of turbulent jets), Moscow, Gosudarstvennoe izd-vo fiziko-matematicheskoi literatury, 1960, 715 p.
13. Dulov V.G., Luk'yanov G.A. *Gazodinamika protsessov istecheniya*. (Gas dynamics of outflow processes), Novosibirsk, Nauka, 1984, 235 p.
14. Loitsyanskii L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* (Mechanics of liquid and gas), Moscow, Drofa, 2003, 846 p.
15. Anikeev A.A., Molchanov A.M., Yanyshchev D.S. *Osnovy vychislitel'nogo teploobmena i gidrodinamika* (Fundamentals of computational heat transfer and hydrodynamics), Moscow, MAI, 2010, 149 p.
16. Molesson G.V. *Trudy TsAGI*, 1988, no. 2411, pp. 30-41.
17. Temnov A.N., Shkapov P.M., Chzhaokai Yu. *Trudy MAI*, 2023, no. 129. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=173024>. DOI: [10.34759/trd-2023-129-12](https://doi.org/10.34759/trd-2023-129-12)
18. Snazin A.A., Shevchenko A.V., Panfilov E.B. *Trudy MAI*, 2022, no. 125. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=168165>. DOI: [10.34759/trd-2022-125-06](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-06)
19. Baklanov A.V., Krasnov S.D., Garaev A.I. *Trudy MAI*, 2020, no. 113. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=117960>. DOI: [10.34759/trd-2020-113-03](https://doi.org/10.34759/trd-2020-113-03)

20. Baklanov A.V., Makarov G.F., Vasil'ev A.A., Nuzhdin A.A. *Trudy MAI*, 2019, no. 104.

URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=102105>

Статья поступила в редакцию 23.08.2023

Одобрена после рецензирования 28.08.2023

Принята к публикации 27.10.2023

The article was submitted on 23.08.2023; approved after reviewing on 28.08.2023; accepted for publication on 27.10.2023