



## Выбор численных методов для моделирования свободных струй из пожарного ствола

© 2025, И.Н. Пожаркова<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Железногорск, Россия

<sup>2</sup> Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

### Аннотация

Методы вычислительной гидродинамики позволяют оценивать характеристики газожидкостных потоков, в частности свободных струй, с учётом различных явлений. Особенности струй, исследуемых в данной работе, являются значительные геометрические размеры и начальные скорости, что повышает вычислительную сложность используемых моделей и увеличивает время их расчёта. Основу выбора численных методов и их настроечных параметров составляет поэтапное увеличение вычислительной сложности используемых моделей до уровня, удовлетворяющего критериям их качества: обеспечение приемлемых относительно решаемых задач значений времени расчёта; точности, определяемой величиной отклонения полученных результатов от экспериментальных целевых характеристик струй. Описаны этапы выбора, включающие проведение эксперимента для оценки точности рассматриваемых методов, принципы согласования экспериментальных и расчётных характеристик для выполнения валидации. Эффективность использования предлагаемой схемы выбора показана на примере решения задачи моделирования свободных струй огнетушащего вещества из пожарного ствола. Представлены результаты проведённых на полигоне натуральных испытаний и расчётов на основе выбранных моделей. Новизна заключается в формализации методов вычислительной гидродинамики, обеспечивающих приемлемые относительно целевых характеристик точность и время расчёта траекторий свободных струй, что может быть использовано при разработке систем автоматизированного наведения потока огнетушащего вещества из ствола пожарного робота на заданные области защищаемого пространства.

**Ключевые слова:** моделирование, точность модели, время расчёта, свободные струи, многофазные потоки, вычислительная гидродинамика, огнетушащее вещество, пожарный ствол.

**Цитирование:** Пожаркова И.Н. Выбор численных методов для моделирования свободных струй из пожарного ствола. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №2(56). С.270-280. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-270-280.

**Конфликт интересов:** автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

### Введение

Численное моделирование свободных струй под воздействием внешних сил является основной решаемой задачей ряда задач: оценка параметров исследуемых потоковых процессов [1], разработка и совершенствование исполнительных и управляющих устройств, алгоритмов [2] и др. Выбор методов вычислительной гидродинамики определяется свойствами жидкости и среды, в которую она истекает, а также изучаемыми при этом явлениями [3].

Предметная область настоящей работы ограничена свободными струями огнетушащего вещества из пожарных стволов, движущегося в воздухе под воздействием сил сопротивления, тяжести и т.д., без учёта ветра

Неучёт ветра обусловлен тем, что имеющиеся эмпирические данные, которые можно использовать для оценки точности и валидации моделей, получены на основе испытаний ствольной техники в шторм, для того, чтобы обеспечить унификацию параметров, определяемых по результатам экспериментов, проводимых на различных полигонах, в т.ч. закрытых. Характерными особенностями таких потоков огнетушащего вещества являются большие геометрические размеры траекторий (десятки метров), высокие начальные скорости (десятки

метров в секунду), раздробление и распыл сплошной струи на отдельные фрагменты и капли различных размеров (рисунок 1), а также обратный процесс слияния капель.

Для математического описания указанных явлений необходимо использование соответствующих методов и размеров ячеек расчётной сетки [4], на которые разбивается исследуемое пространство, что потребует значительного количества ресурсов для проведения расчёта.



Рисунок 1 – Схема свободной струи огнетушащего вещества из пожарного ствола

Исследуемые в данной работе свободные струи представляют собой многофазные потоки [5]. Первичная фаза – газовая: воздух,двигающийся за счёт взаимодействия (в частности, в распылённой и раздробленной частях струи) с жидкой вторичной фазой (огнетушащим веществом). Если характерный размер межфазной границы значительно превышает соответствующие размеры ячеек расчётной сетки на участке сплошной струи (рисунок 1), то для описания этого участка можно использовать метод переноса объёмной доли жидкости (*Volume Of Fluid, VOF*) [6], который позволяет сократить время расчёта по сравнению с эйлеровой моделью [7]. Это может быть актуально при решении задач, требующих построения траекторий на множестве различных значений параметров, влияющих на исследуемые процессы, например, задач формирования выборок для обучения нейросетевых моделей [2].

Когда раздробление и распыл жидкости (рисунок 1) оказывают существенное влияние на траекторию её движения, необходимо учитывать не только её сплошную, но и дисперсную фазы [8], а также переходы между ними. Для этого применяются, в частности, гибридные методы, совместно использующие две модели, например, *VOF-DPM* [9]: для сплошной фазы – *VOF*, для дискретной фазы – модель Лагранжа (*Discrete Phase Model, DPM*). В исследованиях, одним из предметов которых является обратный переход (слияние отдельных капель и т.д.), применяются более сложные модели на базе эйлеровой.

- Многофазная модель Эйлера, использующая метод *VOF* для описания отдельных фаз (*Multi-fluid VOF*) [10]. Особенностью данного подхода является представление жидкости, как дисперсного потока, который при определённом критическом значении объёмной доли приобретает свойства сплошной фазы.
- Модель плотности алгебраической площади границы между фазами (*Algebraic Interfacial Area Density, AIAD*) [11], в которой переходы между сплошными и дисперсными фазами представлены на основе уравнений массообмена.
- Обобщённая двухфазная методика, в которой переходы между фазами описываются на основе *AIAD, Multi-fluid VOF*, а также с использованием модели равновесного распределения [12].

Оценка степени влияния переходов между фазами на траекторию свободной струи в задачах наведения потока огнетушащего вещества из пожарного лафетного ствола (ПЛС) на заданную область пространства [2] представляет сложную проблему. Цель настоящего исследования заключается в формализации выбора вычислительных моделей и их параметров, обеспечивающих высокие точность и скорость расчёта.

# 1 Методы

Схема выбора методов вычислительной гидродинамики (*Computational Fluid Dynamic, CFD*) и их параметров для моделирования свободных струй представлена на рисунке 2.

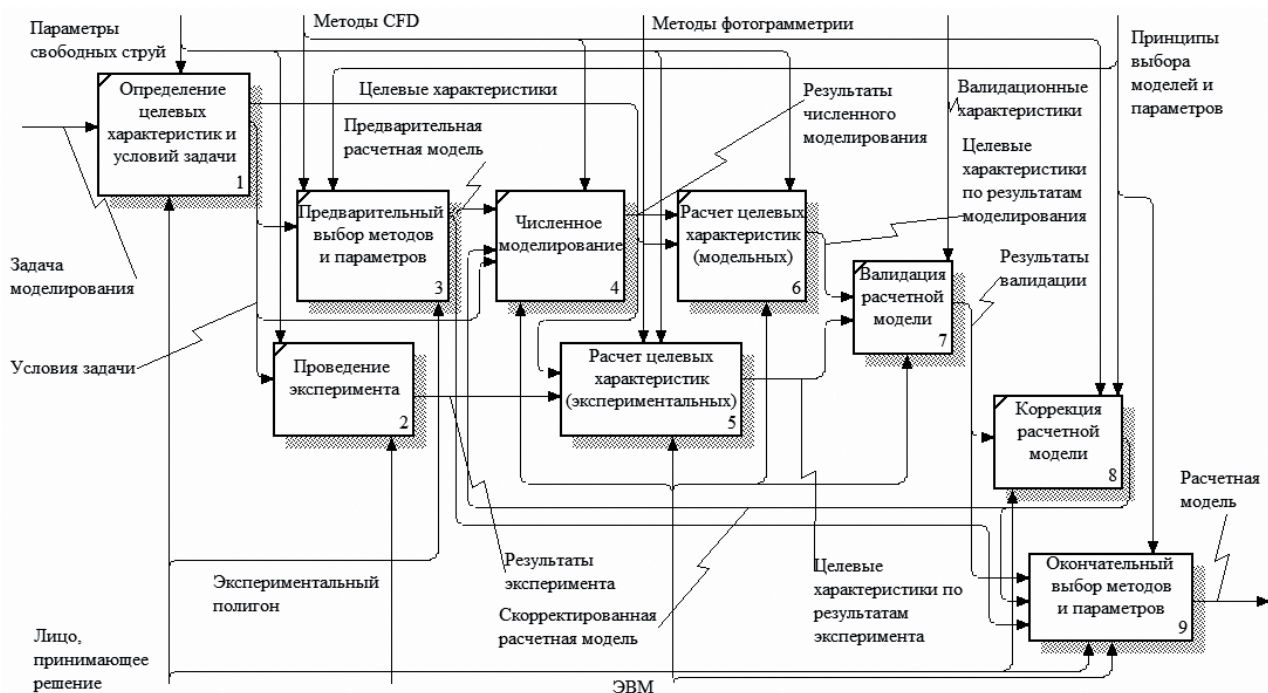


Рисунок 2 – Схема выбора методов вычислительной гидродинамики и их параметров для моделирования свободных струй

Характеристиками, представляющим интерес в исследуемой области, являются: высота  $h$ , дальность  $L$ , верхняя граница струи (множество точек  $P$  траектории движения переднего фронта), размер пятна контакта  $d$ , интенсивность орошения в зоне пятна контакта  $q$  (рисунок 1). Наибольшую важность имеют  $h$ ,  $L$  и  $P$ , т.к. на их основе формируются соответствующие ограничения (например, при разработке алгоритмов решения задач наведения огнетушащего вещества из ствола пожарного робота на заданную точку защищаемого пространства [13] под воздействием управляющих параметров: угол возвышения, расход огнетушащего вещества, рабочее давление [2]).

Критериями качества моделей, используемых для численного расчёта движения свободных струй, является выполнение следующих условий:

$$T \leq T_{max}, \tag{1}$$

$$D_i \leq D_{max,i}, \tag{2}$$

где  $T$  – время моделирования на имеющемся оборудовании,

$T_{max}$  – максимально допустимое значение времени расчёта на имеющемся оборудовании,

$D_i$  – ошибка оценки  $i$ -й целевой характеристики, полученной на основе моделирования,

$D_{max,i}$  – максимально допустимая величина ошибки оценки  $i$ -й целевой характеристики.

При выполнении условий (1) и (2) для различных конфигураций моделей и их параметров предпочтение отдаётся той, для которой свёртка (3) имеет минимальное значение.

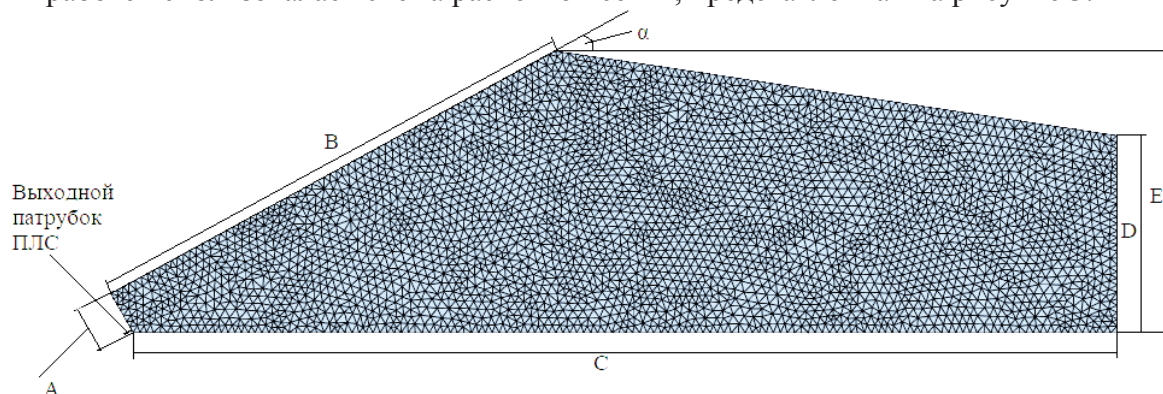
$$F(T, D_i) = \alpha \cdot T/T_{max} + \sum_i (\beta_i \cdot D_i/D_{max,i}), \tag{3}$$

где  $\alpha$ ,  $\beta_i$  – весовые коэффициенты важности соответствующих критериев (1) и (2).

Выбор моделей и их параметров для описания свободных струй огнетушащего вещества с целью обеспечения достижения приемлемого времени расчёта осуществляется согласно

схеме (рисунок 2, блоки 3 и 8) от наиболее простых с вычислительной точки зрения к более сложным, включающим решение большего количества уравнений. Отсутствие необходимости учитывать процессы перехода из дисперсной фазы в сплошную позволяет в качестве предварительных моделей вычислительной гидродинамики (МВГ) использовать наиболее простые *k-epsilon turbulence model* ( $k-\epsilon$ ) [14] и *k-omega turbulence model* ( $k-\omega$ ) [15] для описания турбулентности и *VOF* [6] для описания фаз. На время расчёта влияют геометрические размеры исследуемого пространства, количество ячеек расчётной сетки, граничные условия, использование дополнительных функций (например, для демпфирования или ограничения турбулентности).

В работе использовалась схема расчётной сетки, представленная на рисунке 3.



$A$  – длина задней стенки моделируемого пространства, смежной с выходным патрубком ПЛС,

$B$  – длина верхней стенки моделируемого пространства на начальном участке струи,

$C$  – длина моделируемого пространства,

$D$  – высота передней стенки моделируемого пространства,

$E$  – максимальная высота моделируемого пространства,

$\alpha$  – угол возвышения выходного патрубка ПЛС.

Рисунок 3 – Схема моделируемого пространства с разбиением на ячейки расчётной сетки

Параметры  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ,  $E$ , а также ширина  $W$  моделируемого пространства выбираются по результатам предварительных натурных испытаний так, чтобы обеспечить полный охват исследуемой струи и исключить влияние на её движение явлений, возникающих на границах расчётной сетки. В частности,  $A \geq A_{min} = 1.5$  м,  $B \geq B_{min}$  (расстояние от выходного отверстия ПЛС до наивысшей точки струи),  $C \geq C_{min}$  (дальность струи с запасом не менее 5 м),  $D \geq D_{min}$  (высота струи),  $E \geq E_{min} \approx D_{min} + 2 \cdot A_{min}$ ,  $W \geq W_{min} = 5$  м. Чем выше начальная скорость огнетушащего вещества, тем сильнее раздробление и распыл струи, и тем больший запас геометрических размеров пространства относительно указанных минимальных значений требуется.

Размеры ячеек расчётной сетки выбираются так, чтобы получить приемлемую точность моделирования с учётом явлений, оказывающих влияние на траекторию свободной струи. Малые отклонения параметров, описывающих поток огнетушащего вещества на выходе из ПЛС (профиль скорости, диаметр и форма выходного отверстия и т.д.) могут приводить к значительным изменениям выбранных целевых характеристик. Поэтому важно обеспечить в области моделируемого пространства высокую точность расчётов, в частности за счёт:

- использования внутри исследуемого ПЛС малых размеров ячеек расчётной сетки;
- уменьшения размеров ячеек расчётной сетки в областях исследуемого пространства, находящихся в непосредственной близости от стенок ПЛС (пристеночные области);
- использования на начальном участке траектории огнетушащего вещества (на выходе из ПЛС) размеров ячеек расчётной сетки, достаточных для представления его характерных геометрических особенностей.

Расчёт целевых характеристик по результатам моделирования и экспериментов (блоки 6 и 5 на рисунке 2) производится так, чтобы обеспечить согласование соответствующих вели-

чин. В данной работе для определения параметров струи огнетушащего вещества, представленных в таблице 1, использовались методы [16, 17].

Таблица 1 – Согласование целевых характеристик, определяемых по результатам моделирования и эксперимента

Характеристики	Способ оценки по результатам моделирования	Способ оценки по результатам эксперимента
Высота струи	Расстояние по вертикальной оси от выходного отверстия пожарного ствола до наивысшей точки расчётной сетки, в которой объёмная доля жидкой фазы превышает заданное граничное значение	Измеренное в ходе эксперимента расстояние по вертикальной оси от выходного отверстия пожарного ствола до наивысшей точки основного потока струи. Соответствующее расстояние, рассчитанное на основе цифровых изображений струи с использованием обратного перспективного преобразования по методике, представленной в [17]
Дальность струи	Расстояние по горизонтальной оси от выходного отверстия пожарного ствола до наиболее удалённой от него точки расчётной сетки, в которой объёмная доля жидкой фазы превышает заданное граничное значение на высоте, соответствующей поверхности моделируемого экспериментального полигона	Измеренное в ходе эксперимента расстояние по горизонтальной оси от выходного отверстия пожарного ствола до наиболее удалённой от него точки поверхности полигона, которой достигла струя. Соответствующее расстояние, рассчитанное на основе цифровых изображений струи с использованием обратного перспективного преобразования по методике, представленной в [17]
Верхняя граница струи	Линия (множество точек) максимальных скоростей потока огнетушащего вещества [16]	Верхняя граница визуально наиболее плотной части струи, определяемая на основе цифровых изображений с использованием обратного перспективного преобразования по методике, представленной в [17]

Валидация (блок 7 на рисунке 2) используемых МВГ производилась путём оценки точности (отклонений) результатов расчётов относительно полученных на основе натуральных испытаний с соответствующими значениями исходных параметров.

Точность моделирования относительно результатов, полученных экспериментально, оценивалась на основе относительного отклонения (4) для простых целевых характеристик (высота и дальность струи) и среднеквадратического отклонения (5) – для сложных (верхняя граница струи).

$$RD = |X_e - X_m| / X_e \cdot 100\%, \quad (4)$$

где  $X_e \neq 0$  и  $X_m$  – значения простой целевой характеристики, полученные соответственно по результатам эксперимента и моделирования.

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N |P_{e,i} - P_{m,i}|^2}, \quad (5)$$

где  $N$  – количество точек, а  $P_{e,i}$  – координаты  $i$ -й точки верхней границы струи, построенной по результатам эксперимента;  $P_{m,i}$  – координаты точки верхней границы струи, построенной по результатам моделирования, ближайшей к точке  $P_{e,i}$ .

Решение об изменении (усложнении) МВГ или их параметров принимается в зависимости от значений указанных отклонений. В качестве критериев достижения приемлемой точности (2) использовалось выполнение условий (6) и (7):

$$RD \leq 10\%, \quad (6)$$

$$RMSD \leq 1 \text{ м} \quad (7)$$

При невыполнении данных условий производится коррекция используемых моделей или их параметров и повторное выполнение численного расчёта целевых характеристик и вали-

дании. Для этого применялся алгоритм последовательного повышения вычислительной сложности путём увеличения количества решаемых на каждом временном шаге уравнений, описывающих динамику струи.

Окончательный выбор моделей и их параметров (блок 9, рисунок 2) производится среди конфигураций, удовлетворяющих критериям (1) и (2) и минимуму функции (3).

Современные ПЛС, позволяющие регулировать угол распыления струи огнетушащего вещества (в т.ч. роботизированные), имеют сложную геометрию насадков, для описания которых необходимо повышать количество ячеек расчётной сетки, что приводит к увеличению времени, требуемое для вычислений. В данной работе исследование выполнено в два этапа:

- 1) Первичный выбор МВГ и их параметров для решения задачи расчёта движения воды из ПЛС с простой геометрией и малым расходом огнетушащего вещества (РС-70) [13]. Валидация производилась на основе дальности и высоты траектории струи.
- 2) Оценка точности выбранных методов и их параметров при моделировании траектории струи воды из ПЛС со сложной геометрией (ЛС-П20У) [13] и высоким расходом огнетушащего вещества. Валидация производилась на основе дальности, высоты и верхней границы траектории струи.

## 2 Результаты

Для первичного выбора МВГ проведён расчёт траекторий свободных струй воды из ПЛС РС-70 для следующих значений управляющих параметров: угол возвышения  $30^\circ$ , расход огнетушащего вещества 7,4 л/с, рабочее давление 0,4 МПа. Соответствующие значения дальности и высоты по экспериментальным замерам составили 32 м и 6,7 м. В таблице 2 и на рисунке 4 представлены полученные результаты с использованием различных наборов моделей вычислительной гидродинамики и их параметров.

Таблица 2 – Результаты моделирования траектории струи воды из пожарного ствола РС-70

Обозначение моделей	Время расчёта $T$ , ч	Дальность $L$ , м / Относительное отклонение $RD$ , %	Высота $h$ , м / Относительное отклонение $RD$ , %	Свёртка $F(3)$ : $\alpha=0.5$ , $\beta(L)=\beta(h)=0.25$
а	11.5	30.5 / 4.7	6.9 / 3	0.672
<b>б</b>	<b>10.5</b>	<b>29.5 / 7.8</b>	<b>6.8 / 1.5</b>	<b>0.670</b>
в	11.5	29.5 / 7.8	6.8 / 1.5	0.712
г	11.5	22.3 / 30.3	5.9 / 11.9	1.534
д	13	19.2 / 40	4.9 / 26.9	2.214

а – модель турбулентности  $k-\varepsilon$  (здесь и далее модификация на основе ренормализованных групп (*ReNormalization Group*, *RNG* [14])) с демпфированием турбулентности, модель фазового взаимодействия *VOF* с ограничением объёмной доли жидкости  $10^{-8}$ .

б – модель турбулентности  $k-\varepsilon$  с демпфированием турбулентности, модель фазового взаимодействия *VOF* с ограничением объёмной доли жидкости  $10^{-6}$ .

в – модель турбулентности  $k-\varepsilon$  с демпфированием турбулентности, модель фазового взаимодействия *VOF* с учётом неявных сил и ограничением объёмной доли жидкости  $10^{-6}$ .

г – модель турбулентности  $k-\omega$  (здесь и далее модификация с использованием метода переноса сдвиговых напряжений (*Shear Stress Transport*, *SST* [15])), модель фазового взаимодействия *VOF* с ограничением объёмной доли жидкости  $10^{-6}$ .

д – модель турбулентности  $k-\varepsilon$ , модель фазового взаимодействия Эйлера.

Время расчёта в таблице 2 соответствует модельному времени 7 с., выбранному с запасом, исходя из момента достижения струёй устойчивого режима, при котором отсутствуют значительные изменения целевых характеристик. Как следует из полученных результатов,

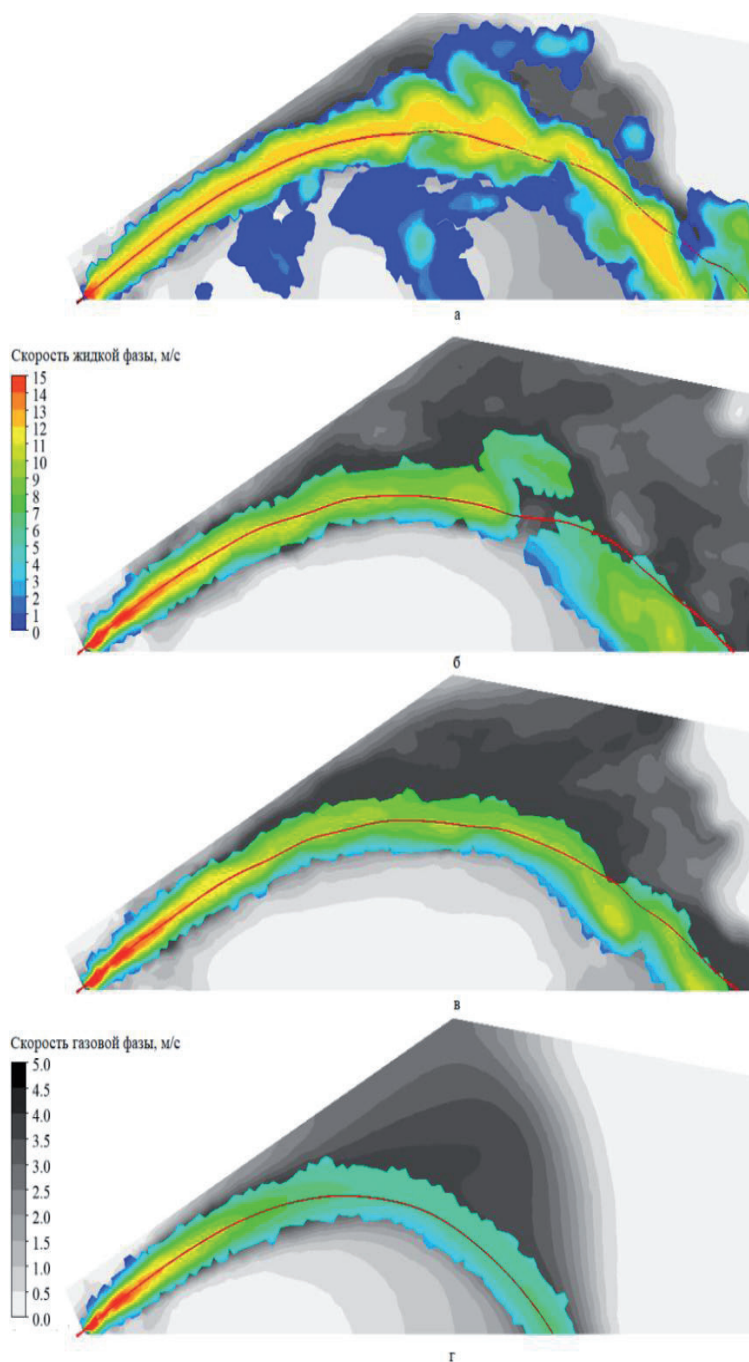


Рисунок 4 – Поля скоростей жидкой и газовой фаз в сечении вертикальной плоскости симметрии пожарного ствола РС-70 и линии потока (красные линии)

л/с, рабочее давление 0,27 МПа.

В верхней части рисунка 5 представлен фрагмент цифровой фотографии потока огнетушащего вещества после предварительной обработки, а в нижней – после выделения верхней и нижней границ на базе методики [17] и её программной реализации.

условию (б) удовлетворяют только траектории, построенные на основе совместного использования моделей  $k-\epsilon$  и  $VOF$  с различными настроечными параметрами. Минимальное значение функции (3) обеспечивается для схемы с ограничением объёмной доли жидкости  $10^{-6}$  и без учёта неявных сил (таблица 2, б), поэтому она выбрана в качестве базовой для дальнейших вычислений.

Существенные отклонения целевых характеристик, полученные с использованием моделей  $k-\omega$  и Эйлера (г и д, таблица 2), можно объяснить подбором значений их параметров, не соответствующих особенностям исследуемых процессов. Однако, даже для таких настроек при достаточно большом времени расчёта наблюдаются слабо (по сравнению со схемами  $k-\epsilon+VOF$ ) выраженные турбулентность и явления распада сплошного потока (рисунок 4) вследствие значительного снижения скоростей движения жидкой фазы на начальном участке.

Оценка точности моделей а, б, в, д при решении задачи построения траектории струи из ПЛС со сложной геометрией производилась на основе натуральных испытаний, проведённых на экспериментальном полигоне Сибирской пожарно-спасательной академии. На рисунке 5 представлены фрагменты изображений воды из ЛС-П20У, полученные для следующих значений управляющих параметров: угол возвышения выходного патрубка  $60^\circ$ , расход огнетушащего вещества 14,3

На рисунке 6 изображены поля скоростей жидкой и газовой фаз в сечении вертикальной плоскостью симметрии выходного патрубка, полученные по результатам численного расчёта на основе  $k-\varepsilon$  и  $VOF$  с использованием модели с параметрами, соответствующими проведённым натурным испытаниям.

На рисунке 7 представлены совмещённые кривые, соответствующие верхним границам струи, которые построены на основе эксперимента (с использованием обратных перспективных преобразований [17] с учётом расположения камеры относительно ПЛС и углов её наклона по координатным осям полигона) и моделирования (линия максимальных скоростей потока [16]), а в таблице 3 приведены результаты валидации. Из таблицы 3 видно, что условия (6) и (7) выполняются для всех представленных характеристик, что соответствует приемлемой точности модели. Время расчёта составило 10 часов, что также удовлетворяет принятым целевым критериям.

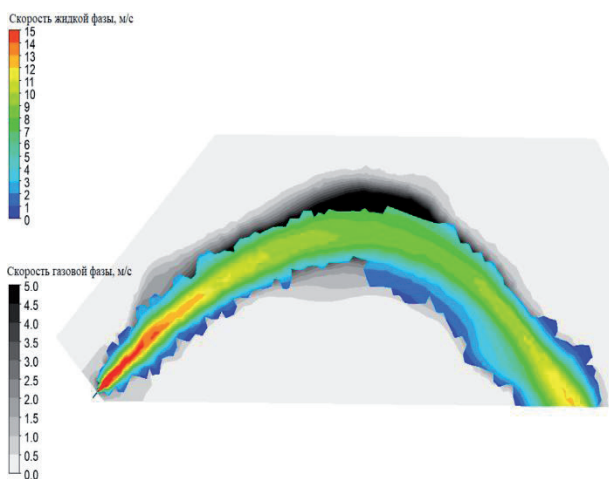


Рисунок 6 – Поля скоростей жидкой и газовой фаз в сечении вертикальной плоскостью симметрии выходного патрубка ЛС-П20У



Рисунок 5 – Фрагменты изображения струи огнетушащего вещества из ПЛС после предварительной обработки (вверху) и выделения границ (внизу)

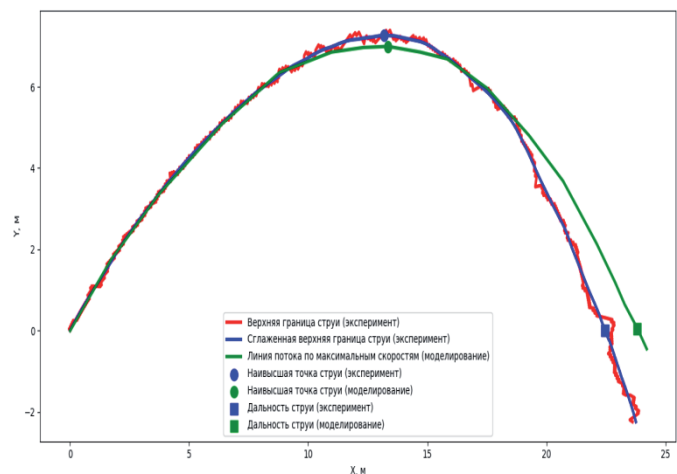


Рисунок 7 – Верхние границы струи, полученные по результатам эксперимента и моделирования

Таблица 3 – Оценка точности моделирования относительно результатов эксперимента

Характеристики	Эксперимент, м	Моделирование, м	Отклонение $RD / RMSD$	Выполнение условий (6) и (7)
Высота	7.3	7	4.1%	$4.1\% \leq 10\%$
Дальность	22.5	23.8	5.8%	$5.8\% \leq 10\%$
Верхняя граница струи	См. рисунок 7		0.42 м	$0.42 \text{ м} \leq 1 \text{ м}$

## Заключение

Представленная схема выбора МВГ позволяет определять соответствующие модели, а также значения настроечных параметров, обеспечивающие приемлемые точность и скорость расчёта траекторий свободных струй из ПЛС, и может использоваться при разработке и совершенствовании исполнительных и управляющих устройств и алгоритмов.



Численные расчёты траекторий струй воды, проведённые с использованием выбранных методов, показали высокую точность и скорость расчёта. В моделируемых потоках огнетушащего вещества отмечено наличие характерных явлений, которые наблюдались при натуральных испытаниях: колебания, раздробление и распыление струи.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Jankee G.K., Ganapathisubramani B.** Scalings for rectangular synthetic jet trajectory in a turbulent boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics*. 2021. 915. P.A57. DOI: 10.1017/jfm.2020.1142.
- [2] **Пожаркова И.Н.** Оценка эффективности применения сетей Колмогорова-Арнольда в задачах управления пожарными роботами. *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. 2024. № 7. С.33-41.
- [3] **Muralha A., Melo J.F., Ramos H.M.** Assessment of CFD solvers and turbulent models for water free jets in spillways. *Fluids*. 2020. 5(3). P. 104. DOI: 10.3390/fluids5030104.
- [4] **Lee M., Park G., Park C., Kim C.** Improvement of grid independence test for computational fluid dynamics model of building based on grid resolution. *Advances in Civil Engineering*. 2020. 2020(1). P.8827936. DOI: 10.1155/2020/8827936.
- [5] **Li S.J., Zhu L.T., Zhang X.B., Luo Z.H.** Recent advances in CFD simulations of multiphase flow processes with phase change. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2023. Vol.62(28). P.10729-10786. DOI: 10.1021/acs.iecr.3c00706.
- [6] **Liu Z. et al.** Numerical study on primary breakup of disturbed liquid jet sprays using a VOF model and LES method. *Processes*. 2022. 10(6). P. 1148. DOI: 10.3390/pr10061148.
- [7] **Shynybayeva A., Rojas-Solórzano L.R.** Eulerian–Eulerian modeling of multiphase flow in horizontal annuli: Current limitations and challenges. *Processes*. 2020. 8(11). P. 1426. DOI: 10.3390/pr8111426.
- [8] **Octau C. et al.** Liquid–solid two-phase jet in a turbulent crossflow: Experiments and simulations. *Chemical engineering research and design*. 2020. 155. P. 156-171. DOI: 10.1016/j.cherd.2020.01.004.
- [9] **Jin W. et al.** Three-dimensional simulation of impinging jet atomization of soft mist inhalers using the hybrid VOF-DPM model. *Powder Technology*. 2022. 407. P. 117622. DOI: 10.1016/j.powtec.2022.117622.
- [10] **Garooosi F., Mahdi T.F.** New benchmark problems for validation and verification of incompressible multi-fluid flows based on the improved Volume-Of-Fluid (VOF) method. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2022. 648. P. 129313. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2022.129313.
- [11] **Höhne T., Porombka P., Moya Sáez S.** Validation of AIAD sub-models for advanced numerical modelling of horizontal two-phase flows. *Fluids*. 2020. 5(3). P. 102. DOI: 10.3390/fluids5030102.
- [12] **Setoodeh H. et al.** CFD-modelling of boiling in a heated pipe including flow pattern transition. *Applied Thermal Engineering*. 2022. 204. P. 117962. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117962.
- [13] **Горбань Ю.И.** Пожарные роботы и ствольная техника в пожарной охране. М.: Пожнаука. 2013. 351 с.
- [14] **Xiao J. et al.** Assessment of different CFD modeling and solving approaches for a supersonic steam ejector simulation. *Atmosphere*. 2022. 13(1). P. 144. DOI: 10.3390/atmos13010144.
- [15] **Lewak M.W., Terpiński J., Klapsa W.** The use of the k- $\omega$  SST turbulence model for mathematical modeling of jet fire. *Safety & Fire Technology*. 2022. 59(1). P. 28-40. DOI: 10.12845/sft.59.1.2022.1.
- [16] **Пожаркова И.Н.** Алгоритмы построения потоковых характеристик свободных струй по результатам численного моделирования. *Информационные технологии*. 2024. №9(30). С.443-448. DOI:10.17587/it.30.443-448.
- [17] **Пожаркова И.Н.** Распознавание траекторий струй огнетушащего вещества из пожарного ствола на основе цифровых изображений. *Программные продукты и системы*. 2024. № 2. С.262-269. DOI: 10.15827/0236-235X.142.262-269.

### Сведения об авторе

**Пожаркова Ирина Николаевна**, 1981 г. рождения. Окончила Красноярский государственный технический университет в 2003 г., к.т.н. (2009). Профессор кафедры инженерно-технических экспертиз и криминалистики Сибирской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России, докторант, доцент кафедры систем автоматизации, автоматизированного управления и проектирования Сибирского федерального университета. В списке научных трудов около 150 работ. ORCID: 0000-0003-1153-350X; Author ID (РИНЦ): 501137; Author ID (Scopus): 55990913900; Researcher ID (WoS): A-7628-2015. [pozharikova@mail.ru](mailto:pozharikova@mail.ru).



Поступила в редакцию 05.11.2024, после рецензирования 24.02.2025. Принята к публикации 11.03.2025.



## Selection of numerical methods for modeling free jets from a fire nozzle

© 2025, I.N. Pozharkova<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Siberian Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the EMERCOM of Russia, Zheleznogorsk, Russia

<sup>2</sup> Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

### Abstract

Computational fluid dynamics methods enable the estimation of gas-liquid flow characteristics, particularly free jets, while accounting for various phenomena. The jets analyzed in this paper exhibit significant geometric dimensions and high initial velocities, which increase the computational complexity of the models used and extend their calculation time. The selection of numerical methods and their tuning parameters is based on a step-by-step increase in computational complexity to a level that meets quality criteria: ensuring an acceptable calculation time relative to the problem being solved and achieving accuracy determined by the deviation of the obtained results from the experimental target characteristics of the jets. The selection stages are outlined, including an experiment to evaluate the accuracy of the considered methods and the principles for aligning experimental and calculated characteristics for validation. The efficiency of the proposed selection scheme is demonstrated using the example of modeling free jets of fire extinguishing agent from a fire nozzle. The results of full-scale tests and calculations based on the selected models, conducted at the testing ground, are presented. The novelty lies in the formalization of computational fluid dynamics methods that ensure acceptable accuracy and calculation time for determining the trajectories of free jets relative to target characteristics. These methods can be applied in the development of automated systems for guiding the flow of fire extinguishing agent from a fire robot nozzle to specified areas of the protected space.

**Keywords:** modeling, model accuracy, computation time, free jets, multiphase flows, computational fluid dynamics, fire extinguishing agent, fire nozzle.

**For citation:** Pozharkova IN. Selection of numerical methods for modeling free jets from a fire nozzle [In Russian]. *Ontology of designing*. 2025; 15(2): 270-280. DOI:10.18287/2223-9537-2025-15-2-270-280.

**Conflict of interest:** The author declares no conflict of interest.

### List of figures and tables

Figure 1 - Diagram of the free jet of fire extinguishing agent from a fire nozzle

Figure 2 - Diagram of selection of computational dynamics methods and their parameters for modeling free jets

Figure 3 - Diagram of the modeled space with division into cells of the computational grid

Figure 4 - Velocity fields of liquid and gas phases in the section of the vertical plane of symmetry of the PC-70 fire nozzle and flow line (red lines)

Figure 5 - Images of the fire extinguishing agent jet from the fire monitor after pretreatment (from above) and delineation (from below)

Figure 6 - Velocity fields of liquid and gas phases in the cross-section of the vertical plane of symmetry of the outlet branch pipe LS-P20U

Figure 7 - Upper jet limits obtained from experimental and modeling results

Table 1 - Target characteristics determined by the results of modeling and experiment

Table 2 - Results of modeling the water jet trajectory from the fire nozzle PC-70

Table 3 - Evaluation of modeling accuracy relative to the experimental results

### References

- [1] **Jankee GK, Ganapathisubramani B.** Scalings for rectangular synthetic jet trajectory in a turbulent boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics*. 2021. 915. P. A57. DOI: 10.1017/jfm.2020.1142.
- [2] **Pozharkova IN.** Evaluation of Kolmogorov-Arnold networks efficiency in fire control tasks [In Russian]. *Devices and Systems. Control, monitoring, diagnostics*. 2024. № 7. P. 33-41.

- [3] **Muralha A, Melo JF, Ramos HM.** Assessment of CFD solvers and turbulent models for water free jets in spillways. *Fluids*. 2020. 5(3). P. 104. DOI: 10.3390/fluids5030104.
  - [4] **Lee M, Park G, Park C, Kim C.** Improvement of grid independence test for computational fluid dynamics model of building based on grid resolution. *Advances in Civil Engineering*. 2020. 2020(1). P.8827936. DOI: 10.1155/2020/8827936.
  - [5] **Li SJ, Zhu LT, Zhang XB, Luo ZH.** Recent advances in CFD simulations of multiphase flow processes with phase change. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2023; 62(28): 10729-10786. DOI: 10.1021/acs.iecr.3c00706.
  - [6] **Liu Z. et al.** Numerical study on primary breakup of disturbed liquid jet sprays using a VOF model and LES method. *Processes*. 2022. 10(6). P.1148. DOI: 10.3390/pr10061148.
  - [7] **Shynybayeva A, Rojas-Solórzano LR.** Eulerian–Eulerian modeling of multiphase flow in horizontal annuli: Current limitations and challenges. *Processes*. 2020. 8(11). P.1426. DOI: 10.3390/pr8111426.
  - [8] **Octau C. et al.** Liquid–solid two-phase jet in a turbulent crossflow: Experiments and simulations. *Chemical engineering research and design*. 2020; 155: 156-171. DOI: 10.1016/j.cherd.2020.01.004.
  - [9] **Jin W. et al.** Three-dimensional simulation of impinging jet atomization of soft mist inhalers using the hybrid VOF-DPM model. *Powder Technology*. 2022; 407. P.117622. DOI: 10.1016/j.powtec.2022.117622.
  - [10] **Garooi F, Mahdi TF.** New benchmark problems for validation and verification of incompressible multi-fluid flows based on the improved Volume-Of-Fluid (VOF) method. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2022. 648. P.129313. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2022.129313.
  - [11] **Höhne T, Porombka P, Moya Sáez S.** Validation of AIAD sub-models for advanced numerical modelling of horizontal two-phase flows. *Fluids*. 2020. 5(3). P. 102. DOI: 10.3390/fluids5030102.
  - [12] **Setoodeh H. et al.** CFD-modelling of boiling in a heated pipe including flow pattern transition. *Applied Thermal Engineering*. 2022. 204. P.117962. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117962.
  - [13] **Gorban Yu.I.** Fire robots and barrel equipment in the fire department. [In Russian]. Moscow: Pozhnauka. 2013. 351 c.
  - [14] **Xiao J. et al.** Assessment of different CFD modeling and solving approaches for a supersonic steam ejector simulation. *Atmosphere*. 2022. 13(1). P.144. DOI: 10.3390/atmos13010144.
  - [15] **Lewak MW, Tepiński J, Klapsa W.** The use of the k- $\omega$  SST turbulence model for mathematical modeling of jet fire. *Safety & Fire Technology*. 2022. 59(1). P. 28-40. DOI: 10.12845/sft.59.1.2022.1.
  - [16] **Pozharkova I.N.** Algorithms for constructing flow characteristics of free jets based on the results of numerical modeling [In Russian]. *Information technology*. 2024; 9(30): 443-448. DOI: 10.17587/it.30.443-448.
  - [17] **Pozharkova I.N.** Recognition of fire extinguishing agent jet trajectories from a fire nozzle based on digital images [In Russian]. *Software products and systems*. 2024; 2: 262-269. DOI: 10.15827/0236-235X.142.262-269.
- 

## About the author

**Irina Nikolaevna Pozharkova** (b. 1981) graduated from Krasnoyarsk State Technical University (Krasnoyarsk, Russia) in 2003, PhD (2009). She is a Professor at Siberian Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergencies of Russia (Department of engineering and technical expertise and forensics). She is an associate professor at Siberian Federal University (Department of automation systems, automatic control and design). She is a co-author of about 150 scientific articles and abstracts. ORCID: 0000-0003-1153-350X; Author ID (RSCI): 501137; Author ID (Scopus): 55990913900; Researcher ID (WoS): A-7628-2015. [pozharkova@mail.ru](mailto:pozharkova@mail.ru).

---

Received November 5, 2024. Revised February 24, 2025. Accepted March 11, 2025.

---