

УДК 532.525.3

Методика упрощенного CFD-расчета распыла центробежной форсункой*

Ар.А. Дектерев^{1,2}, А.А. Дектерев^{1,2}

¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

²Сибирский федеральный университет, Красноярск

E-mail: dek_art@mail.ru

Представлена методика упрощенного CFD-моделирования распыла жидкости центробежной форсункой, основанная на VOF-методе и ряде допущений, позволяющая за приемлемое расчетное время определить набор характеристик распыла форсунки. Результаты первичного тестирования методики подтвердили возможность ее применения.

Ключевые слова: CFD-моделирование (Computational Fluid Dynamics modeling), VOF-метод (Volume of Fluid method), центробежная форсунка, распыл.

Введение

Центробежные форсунки широко используются для распыла жидкого топлива в камерах сгорания различного назначения. От параметров распыла топлива (угол раскрытия факела, плотность заполнения конуса распыла, скорости капель, их фракционный состав) существенно зависит характер горения.

Процесс распыла в центробежной форсунке схематически показан на рис. 1 [1]. Под действием давления жидкость через тангенциальный завихритель подается в вихревую камеру. За счет центробежных сил в центральной области формируется зона низкого давления и образуется вихревое ядро. Кольцевой поток жидкости движется вдоль стенок по направлению к соплу. После выхода из сопла жидкость представляет собой тонкую пленку, образующую полый конус. Под совместным действием аэродинамических сил и волн, образующихся на пленке жидкости, происходит ее распад на капли. Далее под воздействием окружающего потока происходит вторичное дробление капель [2].

Для оценки параметров распыла центробежных форсунок широко используют полуэмпирические модели [3], которые позволяют определить характеристики распыла форсунок, однако их применимость ограничена как режимными параметрами, так и геометрией форсунок. Тем не менее эти методики могут быть использованы на этапе предварительной оценки характеристик проектируемых форсунок.

* Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение от 24.04.2024 № 075-15-2024-543).

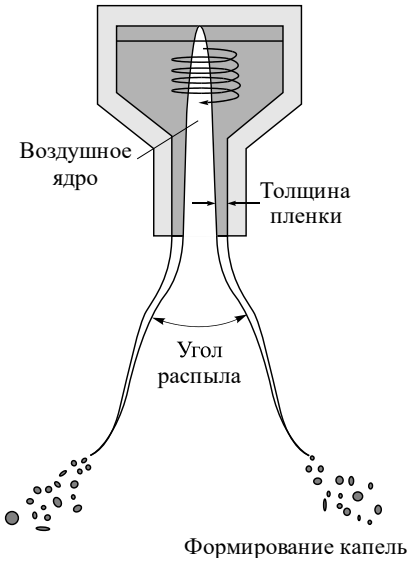


Рис. 1. Процесс распыла в центробежной форсунке [1].

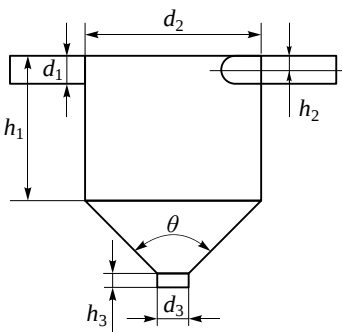
Наиболее детальное моделирование течения жидкости в элементах форсунки и распада струи может проводиться на основе двухфазного подхода VOF (Volume of Fluid) с применением вихреразрешающих моделей турбулентности [4]. Использование такого подхода для получения характеристик распыла требует сеточного разрешения всех масштабов капель, что приводит, соответственно, к измельчению шага по времени. Подобные расчеты требуют огромного количества вычислительных ресурсов и времени и не могут применяться для прикладных многовариантных расчетов, тем более в совокупности с моделированием процессов испарения и горения.

Для экономии ресурсов используется сопряженный эйлерово-лагранжевый подход моделирования распыла (ELSA) [5], при котором после моделирования первичного распыла с помощью VOF-метода отдельные капли преобразуются в дискретные частицы.

Для прикладных расчетов реальных устройств, особенно с процессами испарения и горения, используется экономный лагранжев метод дискретных частиц с применением моделей вторичного распыла, для которого необходимы начальные условия для источника капель: фракционный состав, скорости и угол распыла капель [6].

В настоящей работе предлагается методика упрощенного CFD (Computational Fluid Dynamics) расчета распыла, позволяющая получить набор характеристик распыла центробежной форсунки, который может быть использован для дальнейших расчетов лагранжевым методом.

Для тестирования методики были выбраны данные экспериментальных исследований распыла воды для набора центробежных форсунок с различными геометрическими параметрами [7]. Из всего разнообразия рассмотренных в работе форсунок были выбраны два варианта с разными диаметрами тангенциальных подводов. Эти варианты наиболее сильно различаются по фиксируемому в эксперименте углу распыла. Геометрические параметры рассмотренных форсунок представлены на рис. 2. В эксперименте исследовался диапазон давлений на входе в форсунки от 100 до 400 кПа. Было показано, что угол распыла слабо зависит от давления, расчеты выполнялись для давления 100 кПа.



Параметр	Вариант 1	Вариант 2
h_1	10 мм	10 мм
h_2	1 мм	1,5 мм
h_3	1 мм	1 мм
d_1	2 мм	3 мм
d_2	12 мм	12 мм
d_3	2 мм	2 мм
θ	90°	90°

Рис. 2. Геометрические параметры форсунок [7].

Численная модель

Двухфазный поток внутри и снаружи форсунки моделируется с помощью метода объема жидкости (VOF) [8], позволяющего отслеживать границу свободной поверхности. Газовая и жидкая фазы рассматриваются как несмешивающиеся несжимаемые вязкие жидкости. Для моделирования турбулентности применяется вихреразрешающий метод LES с моделью подсеточной вязкости WALE [9]. Связь полей скорости и давления осуществляется посредством процедуры SIMPLEC. Применяется схема интерполяции давления PRESTO. Для уравнения сохранения импульса применяется схема ограниченных центральных разностей. Задача решается в трехмерной нестационарной постановке. Шаг по времени на каждой итерации выбирается динамически исходя из заданного глобального числа Куранта.

Используется расчетная сетка гибридного типа (рис. 3), которая состоит из полиэдральных ячеек вблизи стенок и гексаэдральных ортогональных элементов на удалении от геометрических особенностей. Общее количество ячеек в начальной сетке около 1,6 млн. В ходе расчета в области раздела фаз производится автоматическая сеточная адаптация, при которой происходит дробление ячеек для более точного отслеживания свободной поверхности.

Методика расчета и результаты тестирования

Предлагаемая методика расчета состоит из нескольких этапов. Для формирования установившегося течения жидкости внутри центробежной форсунки требуется достаточно продолжительное время, в течение которого нецелесообразно рассчитывать внешнюю струю жидкости с детальным сеточным и временным разрешением.

На первом этапе предлагается проводить расчет с относительно крупным временным шагом. Глобальное число Куранта, по которому определяется временной шаг, может достигать 15–20 при условии устойчивости решения. На этом этапе автоматическая адаптация сетки не используется, расчет проводится на начальном варианте сетки. При этом для дополнительной экономии вычислительных ресурсов периодически производится удаление жидкой фазы во внешней области за пределами форсунки. На рис. 4а, 4б представлены картины течения в разные моменты времени в процессе первого этапа

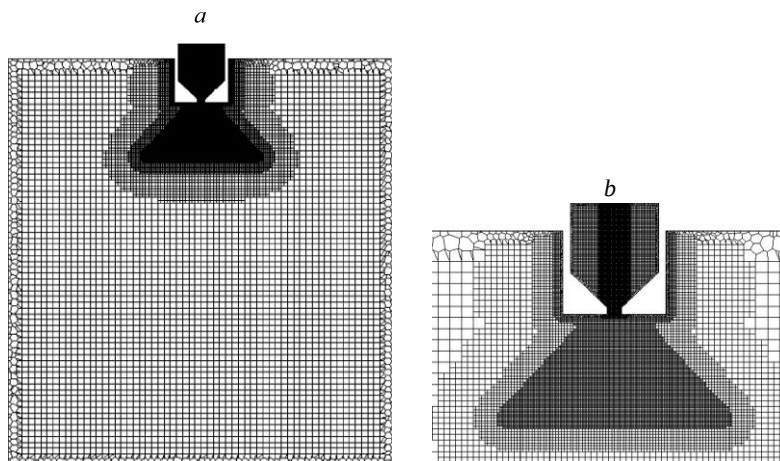


Рис. 3. Расчетная сетка в сечении расчетной области (а) и в зоне форсунки и начального участка распыла (б).

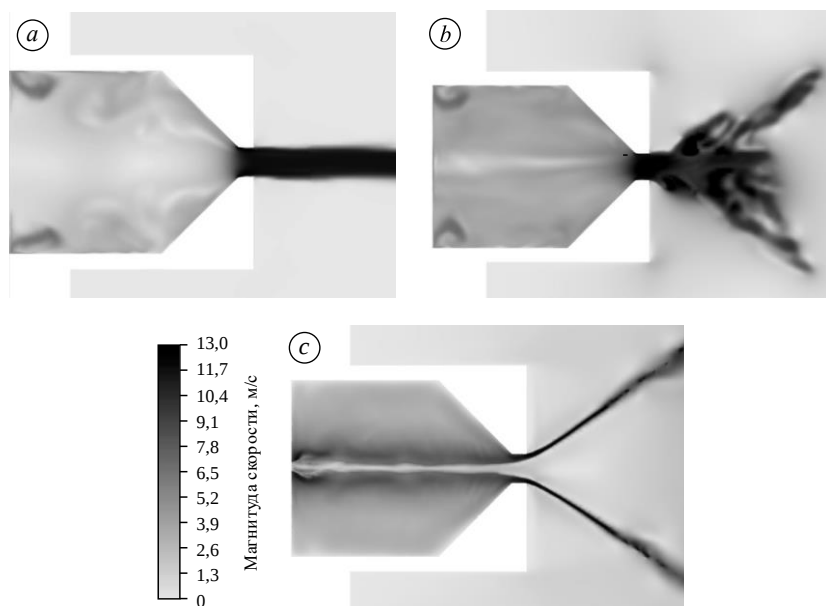


Рис. 4. Процесс формирования течения внутри форсунки и на выходе из сопла.

На первом этапе расчета (a, b) и на третьем этапе (c).

расчета. Таким образом, расчет в рамках первого этапа длится до достижения установившегося течения в форсунке и формирования воздушного ядра, приводящего к образованию конусной пленки жидкости. Для исследуемых форсунок необходимо рассчитать примерно 0,04–0,05 с физического времени процесса.

На втором этапе расчета включается автоматическая адаптация сетки с количеством уровней разбиения 1–2, число Куранта ограничивается величиной 5. Расчет проводится в течение некоторого времени до начала процесса отделения капель от конусной пленки жидкости.

Перед последним (третьим) этапом еще раз производится удаление жидкой фазы за пределами форсунки, количество уровней разбиения автоматической адаптации сетки увеличивается до 3–4, временной шаг ограничивается глобальным числом Куранта 1–3. Расчет выполнялся до установившегося распада жидкой пленки (см. рис. 4c), в данном случае понадобилось рассчитать около 0,1 с физического времени процесса.

Такая методика позволяет получить угол раскрытия, расстояние от среза сопла до начала разрыва пленки и скорость капель в зоне начала распыла, а также оценить расходные характеристики форсунки за приемлемое для инженерных многовариантных расчетов время. Но эта методика не позволяет получить достоверное распределение капель по фракциям. Для корректного разрешения фракционного состава капель VOF-методом требуется более подробная детализация расчетной сетки.

Однако на практике при расчетах реальных устройств с центробежными форсунками после распада пленки капли попадают в высокоскоростной внешний поток, в котором происходит интенсивный вторичный распад, формирующий конечный фракционный состав, что определяет процессы испарения и горения. Для таких расчетов точность распределения капель по диаметрам после первичного распыла не так важна.

На рис. 5, 6 представлены результаты моделирования процесса распыла для рассматриваемых форсунок вариантов 1 и 2 при давлении 100 кПа. Видно, что для обоих случаев формируется устойчивое воздушное ядро (см. рис. 5), распространяющееся

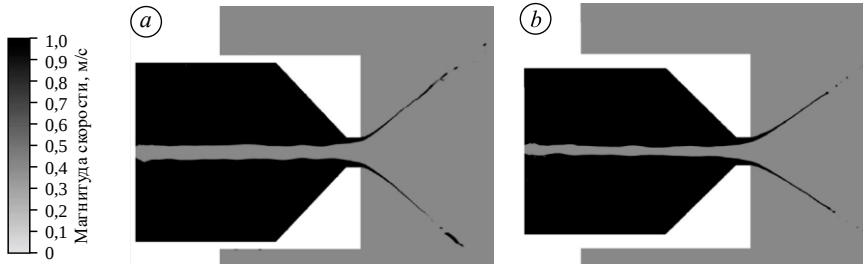


Рис. 5. Доля жидкой фазы в сечении для варианта 1 (a) и варианта 2 (b).

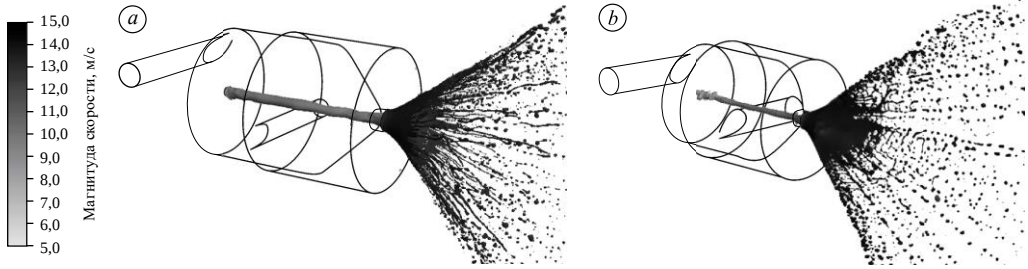


Рис. 6. Изоповерхности жидкой фазы для варианта 1 (a) и варианта 2 (b).

Таблица
Сравнение экспериментального [7] и рассчитанного угла распыла

Вариант	Угол распыла, град	
	Эксперимент	Расчет
1	72	74
2	62	63

до задней стенки форсунки. Тонкая пленка жидкости, выходя из сопла, формирует полный конус, отделение первых капель от пленки происходит на расстоянии 5–7 мм от среза сопла (см. рис. 6). Скорость капель 13 м/с. Число Рейнольдса в жидкости на выходе из сопла, рассчитанное по диаметру выходного сопла форсунки, получается около 20000, число Вебера, рассчитанное по толщине пленки, порядка 700. Расход воды составил 11,8 и 23,3 г/с для вариантов 1 и 2 соответственно.

Угол конуса распыла для варианта 1 составляет 74°, для варианта 2 равен 63°, что близко к средним экспериментальным данным (таблица). Максимальная скорость для обоих вариантов в сопле форсунки около 12 м/с, что также соответствует эксперименту [7].

Заключение

Предложена методика упрощенного CFD-расчета распыла жидкости центробежной форсункой, основанная на VOF-методе и допущении, что в процессе формирования структуры течения внутри форсунки нет необходимости детального расчета внешнего течения и распыла, требующего значительных вычислительных затрат. Вместо этого на относительно грубой расчетной сетке с большими временными шагами формируется течение внутри форсунки. После достижения течения с установившимся воздушным

ядром выполняется постепенная пространственная и временная детализация для разрешения фазовой границы жидкой пленки и начального участка распыла. Такая методика позволяет получить угол раскрытия, расстояние от среза сопла до начала разрыва пленки и скорость капель в зоне начала распыла, а также оценить расходные характеристики форсунки за приемлемое для инженерных многовариантных расчетов время. Результаты такого моделирования могут быть использованы для расчета горелочных устройств с центробежными форсунками в качестве исходных данных для расчета распыла лагранжевым методом.

Первичное тестирование методики расчета показало, что для получения корректных результатов по углу распыла и скорости капель необходимо не более суток расчетного времени на высокопроизводительной рабочей станции.

По-видимому, предлагаемая методика может использоваться для расчетов не только центробежных, но и других типов форсунок.

Список литературы

1. Yu D., Zhu Z., Zhou J., Liao D., Wu N. Influence of nozzle outlet diameter on the atomization process of zirconia dry granulation // *Advan. Mech. Engng.* 2021. Vol. 13, No. 6. P. 1–13.
2. Faeth G., Hsiang L.-P., Wu P.-K. Annual reviews in multiphase flow 1995 structure and breakup properties of sprays // *Intern. J. Multiphase Flow.* 1995. Vol. 21. P. 99–127.
3. Дитяткин Ю.Ф., Клячко Л.А., Новиков Б.В., Ягодкин В.И. Распыливание жидкостей. М.: Машиностроение, 1977. 208 с.
4. Вожakov И.С., Хребтов М.Ю., Мулляджанов Р.И. Моделирование распыления закрученной струи керосина // Сб. тр. конф. XXXVIII Сиб. теплофиз. семинара, Новосибирск, 2022. С. 36–40.
5. Vallet A., Burluka A.A., Borghi R. Development of a Eulerian model for the atomization of a liquid jet // *Atom. Sprays.* 2001. Vol. 11. P. 619–642.
6. Schmidt D.P., Nouar I., Senecal P.K., Rutland J., Martin J.K., Reitz R.D., Hoffman J.A. Pressure-Swirl Atomization in the Near Field // *SAE Technical Paper.* 1999. P. 471–484.
7. Liu J., Feng X., Liang H., Zhang W., Hui Y., Xu H., Yang C. Prediction of atomization characteristics of pressure swirl nozzle with different structures // *Chinese J. Chem. Engng.* 2023. Vol. 63. P. 171–184.
8. Hirt C., Nichols B. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries // *J. Comput. Phys.* 1981. Vol. 39. P. 201–225.
9. Nicoud F., Ducros F. Subgrid-scale stress modelling based on the square of the velocity gradient tensor // *Flow Turbulence, and Combustion.* 1999. Vol. 62, No. 3. P. 183–200.

*Статья поступила в редакцию 5 августа 2024 г.,
после доработки — 2 октября 2024 г.,
принята к публикации 8 ноября 2024 г.*