ГИДРОДИНАМИКА ЖИДКОСТИ В ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ФОРСУНКАХ
FLUID DYNAMICS IN CENTRIFUGAL NOZZLES

Мытько Дмитрий Юрьевич[1], Францкевич Виталий Станиславович[2], Нурмухамедов Хабибулла Сагдуллаевич[3], Ян Ян[4]

[1]Белорусский государственный технологический университет, Минск Беларусь, e-mail: dmitriimitko26@gmail.com.
orcid.0000-0002-9816-2539
[2]Белорусский государственный технологический университет, Минск Беларусь, e-mail: fvs2@tut.by.
orcid.0000-0002-4126-88509
[3]Ташкентский химико-технологический институт, Ташкент Узбекистан, e-mail: haasbek1952@gmail.com.
orcid.0000-0002-2868-31447
[4]Белорусский государственный технологический университет, Минск

Аннотация. *В представленной работе проведено исследование гидродинамических характеристик жидкости в центробежных форсунках. Авторы рассматривали форсунки с различным числом выходных каналов (один и четыре) при использовании воды в различных режимах работы. Центробежные форсунки широко применяются в авиации, энергетике, химическом производстве, сельском хозяйстве и других отраслях для распыления жидкостей в целях охлаждения, нанесения покрытий, распыления и решения многих других технологических задач. В отличие от пневматических форсунок, центробежные форсунки основаны на принципе закручивания жидкости, что позволяет получать более тонкий и равномерный спектр капель. Ключевыми характеристиками центробежных форсунок, определяющими их эффективность, являются размер и скорость капель, угол распыления и расход. Эти параметры существенно зависят от конструктивных особенностей форсунки, включая количество и угол наклона выходных каналов, размер сопла, частоту вращения и свойства используемой жидкости. Результаты проведенного исследования показали, что конструктивные особенности форсунок, такие как количество каналов и угол их наклона, оказывают значительное влияние на угол факела распыла. Полученные данные расширяют понимание физических процессов, протекающих в центробежных форсунках, и могут быть использованы для их более эффективного проектирования и внедрения в различных отраслях промышленности.*

Annotation: *The presented work studies the hydrodynamic characteristics of liquid in centrifugal nozzles. The authors considered nozzles with different numbers of outlet channels (one and four) when using water in different operating modes. Centrifugal nozzles are widely used in aviation, energy, chemical production, agriculture and other industries for spraying liquids for cooling, coating, spraying and solving many other technological problems. Unlike pneumatic nozzles, centrifugal nozzles are based on the principle of swirling the liquid, which allows you to get a thinner and more uniform spectrum of drops. The key characteristics of centrifugal nozzles that determine their efficiency are the size and velocity of the drops, the spray angle and the flow rate. These parameters significantly depend on the design features of the nozzle, including the number and angle of the outlet channels, the nozzle size, the rotation frequency and the properties of the liquid used. The results of the study showed that the design features of the nozzles, such as the number of channels and their angle of inclination, have a significant impact on the spray torch angle. The data obtained expand the understanding of the physical processes occurring in centrifugal nozzles and can be used for their more effective design and implementation in various industries.*

Ключевые слова: *химическая промышленность, центробежная форсунка, завихритель, гидродинамика, угол факела распыла, тангенциальная скорость.*

Keywords*: chemical industry, centrifugal nozzle, swirl, hydrodynamics, spray angle, tangential velocity.*

Введение. Центробежные форсунки широко используются в различных отраслях промышленности, включая авиацию, энергетику, химическое производство и сельское хозяйство. Они применяются для распыления жидкостей с целью охлаждения, нанесения покрытий, распыления и многих других задач. В отличие от традиционных щелевых или

пневматических форсунок, центробежные форсунки основаны на принципе вращения жидкости, что позволяет получать более тонкий и равномерный спектр капель.

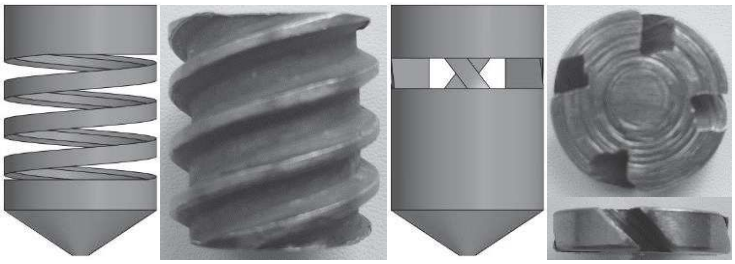
Характеристики распыления, такие как размер и скорость капель, угол распыления и расход, являются ключевыми параметрами, определяющими эффективность центробежных форсунок в различных технологических процессах. Эти характеристики в значительной степени зависят от конструктивных особенностей форсунки, включая размер сопла, частоту вращения и свойства используемой жидкости.

Существует обширная литература, посвященная экспериментальному и теоретическому изучению работы центробежных форсунок [1, 2]. Однако многие аспекты их поведения, особенно при использовании неньютоновских жидкостей, до сих пор не изучены в достаточной мере. Кроме того, большинство предыдущих исследований было сосредоточено на стационарных режимах работы форсунок, в то время как практически отсутствуют данные об их поведении при переходных процессах, таких как запуск или остановка.

Таким образом, целью данной работы является теоретическое исследование гидродинамических характеристик жидкости в центробежных. Полученные результаты позволят расширить понимание физических процессов, протекающих в центробежных форсунках, и будут способствовать их более эффективному проектированию и применению в промышленности.

Методы исследования и полученные результаты. В данной работе рассматриваются два варианта центробежных форсунок, которые представлены на рисунке 1. Первая модель (рисунок 1 *а*) имеет продолговатый завихритель с одним каналом, который выточен на поверхности под углом $\alpha = 6^{o}$ к основанию. Вторая модель (рисунок 1 *б*) имеет четыре канала с углом $\alpha = 54^{o}$. Дополнительно подготовлены идентичные модели с просверленным центральным отверстием через весь завихритель форсунки равным $d = 2$ мм.

Исследование гидродинамики воды в центробежных форсунках выполнялось в программном пакете ANSYS Fluent, который предназначен для моделирования и анализа широкого спектра задач, связанных с течением жидкостей и газов, а также сопутствующими физическими процессами.



а ***б***

а – с одним каналом; б – с четырьмя каналами

Рисунок 1 – Центробежные форсунки

Описанные выше модели были использованы для создания высококачественных расчетных сеток в программном комплексе ANSYS. Количество элементов варьировалось в пределах 500000-600000 штук. Каждый элемент сетки представлял полиэдр – произвольный многогранник.

Для моделирование турбулентного течения возникающего при движении жидкости в каналах завихрителя центробежной форсунки использовалась модель k-ε RNG (Renormalization Group). Эта модель основана на уравнениях Рейнольдса для осредненных по Рейнольдсу переменных (RANS – Reynolds Averaged Navier-Stokes). В ней используется два дополнительных уравнения переноса для моделирования турбулентной кинетической энергии k и скорости диссипации ε [3,4]. По сравнению с базовой k-ε моделью, модель RNG учитывает влияние вихревых структур меньшего масштаба на крупномасштабную турбулентность. Включает дополнительный член в уравнение диссипации ε, который улучшает моделирование областей с высокими скоростями сдвига и вращения. Модель k-ε RNG широко применяется для моделирования турбулентных течений жидкостей и газов в аэрокосмической, энергетической, автомобильной и других отраслях промышленности. Она обеспечивает хороший баланс между сложностью реализации и точностью решения.

Для моделирования гидродинамики в центробежных форсунках часто используется метод объема жидкости (Volume of Fluid, VOF). Это численный метод, который позволяет определять форму и положение свободной поверхности жидкости в многофазных потоках.

В методе VOF каждая ячейка расчетной сетки содержит объемную долю жидкости, обозначаемую как β. Значение β меняется от 0 (пустая ячейка) до 1 (ячейка полностью заполнена жидкостью).

Форма и положение свободной поверхности восстанавливаются по значениям β в соседних ячейках. Для аппроксимации производной по времени и конвективного члена используются специальные численные схемы, обеспечивающие минимальную численную диффузию.

Метод VOF применялся для моделирования различных процессов с участием многофазных потоков, включая распыление жидкостей в центробежных форсунках [5].

Нами было выполнено компьютерное моделирование движения воды через завихритель, где определялись тангенциальная скорость и угол распыления в зависимости от скорости воды на входе (0,089–0,113 м/с).

На рисунке 2 представлены контуры изменения тангенциальной скорости движения воды в центробежных форсунках при максимальной скорости 0,133 м/с.

Из рисунка 2 видно, что для центробежной форсунки без центрального отверстия максимальное значение тангенциальной скорости в восемь раз выше, чем у конструкции с дополнительным отверстием в центре завихрителя. Отсюда следует, что большая часть объема воды проходит через центральное отверстие, а ее мала часть через тангенциальные каналы завихрителя. Угол распыления воды в таком случае будет меньше у конструкции справа на рисунке 2.

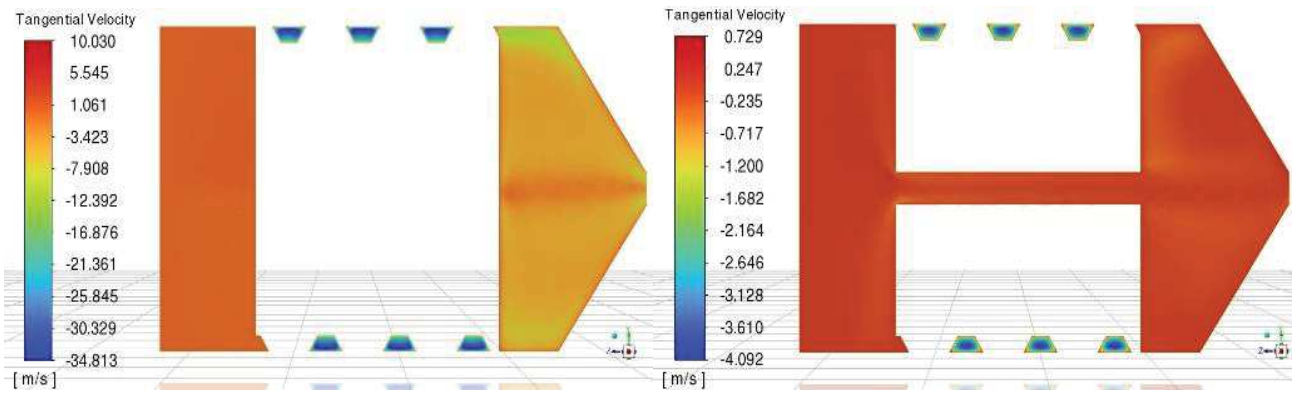


Рисунок 2 – Изменение тангенциальной скорости воды для центробежной форсунки с завихрителем с одним каналом и центральным отверстием

На рисунке 3 представлены контуры изменения тангенциальной скорости движения воды в центробежных форсунках при максимальной скорости 0,133 м/с.

Из рисунка 3 видно, что контуры изменения тангенциальной скорости не отличаются. Наличие отверстия в завихрителе уменьшает максимальное значение тангенциальной скорости на 0,4 м/с. Также стоит отметить, что по сравнению с завихрителем с одним тангенциальным каналом на рисунке 2 тангенциальная скорость меньше в 13 раз.

На рисунке 4 представлены контуры изменения угла распыления воды при различных скоростях воды на входе в центробежную форсунку с одним каналом Моделирование этого процесса было выполнено только для одной форсунки, чтобы продемонстрировать, как увеличение расхода воды влияет на угол распыла.

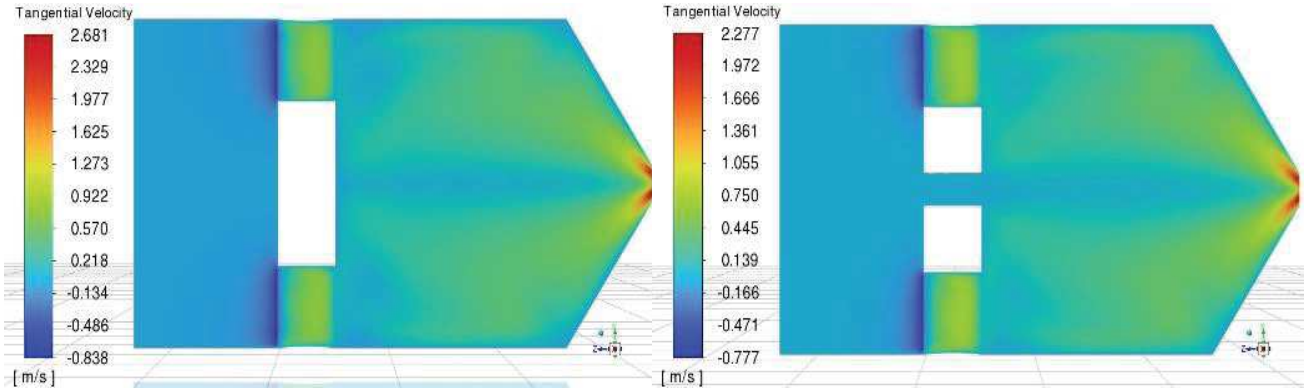


Рисунок 3 – Изменение тангенциальной скорости воды для центробежной форсунки с завихрителем с четырьмя каналами и центральным отверстием

Анализ рисунка 4 показывает, что максимальное значение угла распыления для воды, истекающей из центробежной форсунки с одним каналом, достигало 59 градусов. При этом с увеличением скорости потока на входе в форсунку, это значение угла распыления практически не менялось, оставаясь стабильным.

Данный результат можно объяснить тем, что радиальная и осевая составляющие скорости на выходе из сопла форсунки растут прямо пропорционально увеличению начальной скорости на входе в центробежную форсунку.

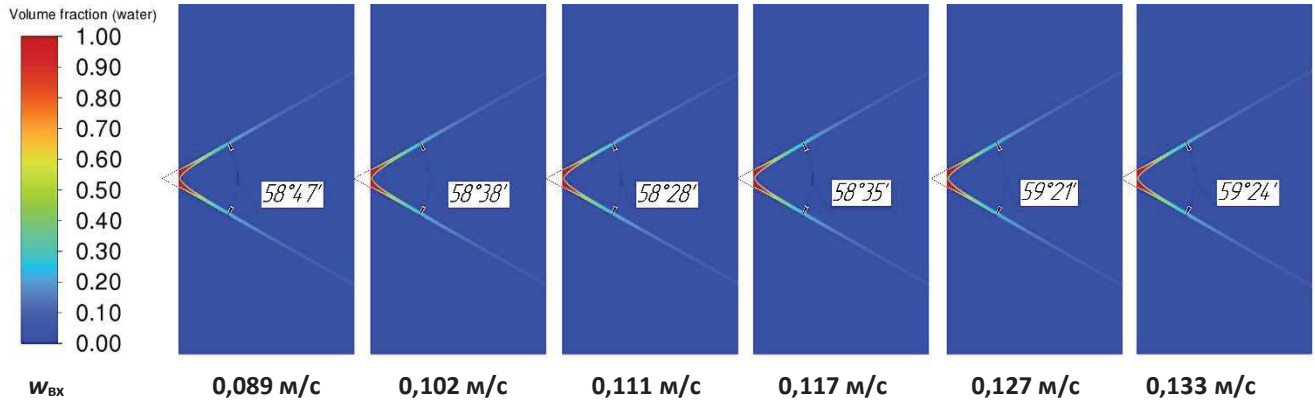


Рисунок 4 – Изменение угла распыления воды после центробежной форсунки с одним каналом без центрального отверстия

Исследование поведение угла распыления является важной характеристикой центробежных форсунок, поскольку позволяет прогнозировать и контролировать параметры распыленного потока жидкости в зависимости от режима работы форсунки.

Заключение. В данном исследовании были проведено моделирование гидродинамических характеристик воды в центробежных форсунках в различных режимах. Были рассмотрены два варианта центробежных форсунок – с одним и четырьмя каналами.

Результаты показали, что конструктивные особенности форсунок, такие как число каналов и угол наклона, оказывают значительное влияние на угол распыления и расход. Полученные в работе данные расширяют понимание физических процессов, протекающих в центробежных форсунках, и могут быть использованы для их более эффективного проектирования и применения в различных отраслях промышленности.

Список литературы

1. Dumouchel, C. On the Experimental Investigation on Primary Atomization of Liquid Streams // Experiments in Fluids. – 2008. No. 45. P. 371–422.

2. Chinn, J.J. Atomization and Sprays: Their Generation and Role in Combustion Systems. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A // Journal of Power and Energy. – 2009. – No. 223. P. 487–527.

3. Yakhot, V., Orszag, S.A. Renormalization Group Analysis of Turbulence. // Journal of Scientific Computing. – 1986. – No. 1. P. 3–51.

4. Shih, T.H., Liou, W.W., Shabbir, A., Yang, Z., Zhu, J. A New k-ε Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows // Computers & Fluids. – 1995. – No. 24. P. 227–238.

5. Versteeg, H.K., Malalasekera, W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. – Harlow: Pearson Education Limited, 2007. – 517 p.