

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРА ЭЛЕМЕНТОВ РАСЧЁТНОЙ СЕТКИ И ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ И УГЛА РАСПЫЛА ШНЕКОЦЕНТРОБЕЖНОЙ ФОРСУНКИ

Д. В. Якушкин, В. В. Ястребов

В работе представлены результаты моделирования процессов распыла жидкого топлива трёхзаходной шнекоцентробежной форсунки, применяемой в камере сгорания газотурбинного двигателя (ГТД). Изучено влияние минимального размера элемента расчётной сетки на результаты расчета методами CFD. Исследовались такие параметры как угол распыла топлива и расход жидкости в зависимости от перепада давления. Определен требуемый размер элемента в области распыла для расчета этих характеристик с помощью CFD при различных постановках (стационарная и нестационарная). Выявлена разница в результатах расчета при использовании стационарной и нестационарной постановок, преимущества каждой из них, а также область их применимости для задачи моделирования распыла в исследуемой форсунке. Представлено сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными.

Ключевые слова: топливная форсунка, процесс распыла, метод объёма жидкости, вычислительная газовая динамика, функция адаптации сетки.

Качество распыла жидкого топлива оказывает влияние на протекание процесса горения, а, следовательно, на основные характеристики камеры сгорания [1]. Поэтому, на этапе проектирования камер сгорания ГТД необходимо определять параметры топливных форсунок такие как расход топлива, угол распыла и других [1]. В данной работе представлены результаты отработки методики, основанной на методах вычислительной газовой динамики CFD в трёхмерной постановке, позволяющей рассчитывать характеристики форсунок без проведения экспериментальных исследований. Предметом исследования в данной работе является топливная центробежная форсунка с трёхзаходным шнеком и диаметром сопла форсунки $d_{\text{сопл.}}=350$ мкм (рис. 1). Расчёты выполнены в трёхмерной нестационарной и стационарной постановках. Использовалась модель турбулентности $k-\omega$ [2]. В нестационарной постановке расчет проводился с переменным шагом по времени с условием сохранения числа Куранта

[3], не превышающим единицу. На входе в расчётную область задавалось избыточное давление в диапазоне 0,5 – 10 кПа.

Для определения влияния размера элементов расчеты проводились с сеточными моделями с минимальными линейными размерами элемента (l_{min}), варьирующимися в пределах от 12,5 до 100 мкм. Измельчение сетки производилось во входных каналах, сопле, камере закручивания и области распыла. Минимальный размер достигался в последней, там, где образуется угол (рис. 2).

По данным расчетов построены графики, которые отображают зависимости расхода (рис. 3) и угла распыла топлива (рис. 4) от перепада давления при использовании сеток с различными размерами элемента.

Представленные на рисунке 3 данные показывают, что расхождение между расчетными и экспериментальными данными по расходной характеристике в среднем не превышают 2 % для всех исследуемых размеров элементов сетки.

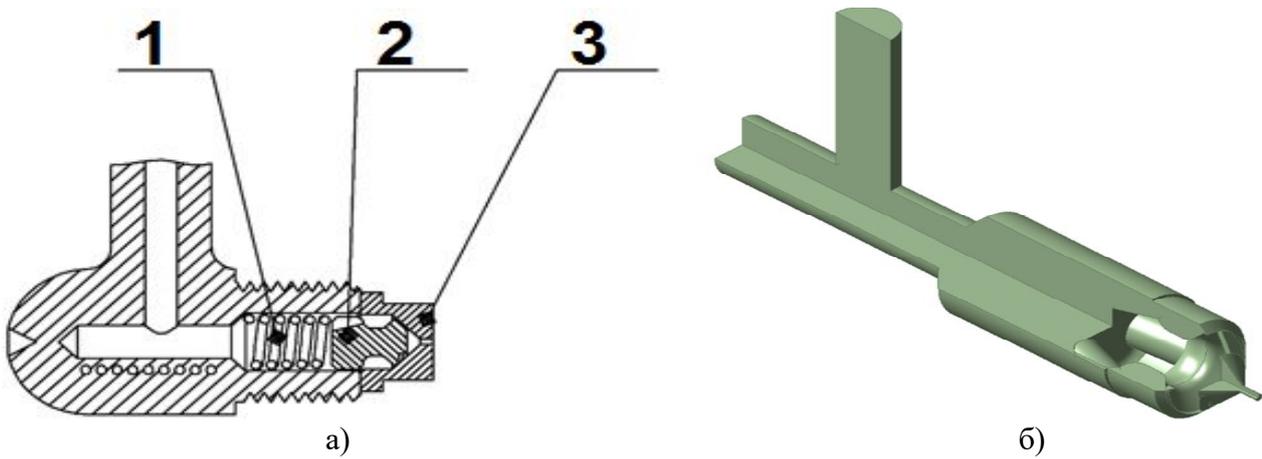


Рис. 1. Геометрическая модель трехзаходной шнекоцентриробежной форсунки
 а) – схема устройства форсунки, (1-пружина, 2-шнек, 3-сопло)
 б) – геометрическая модель проточной части внутри форсунки

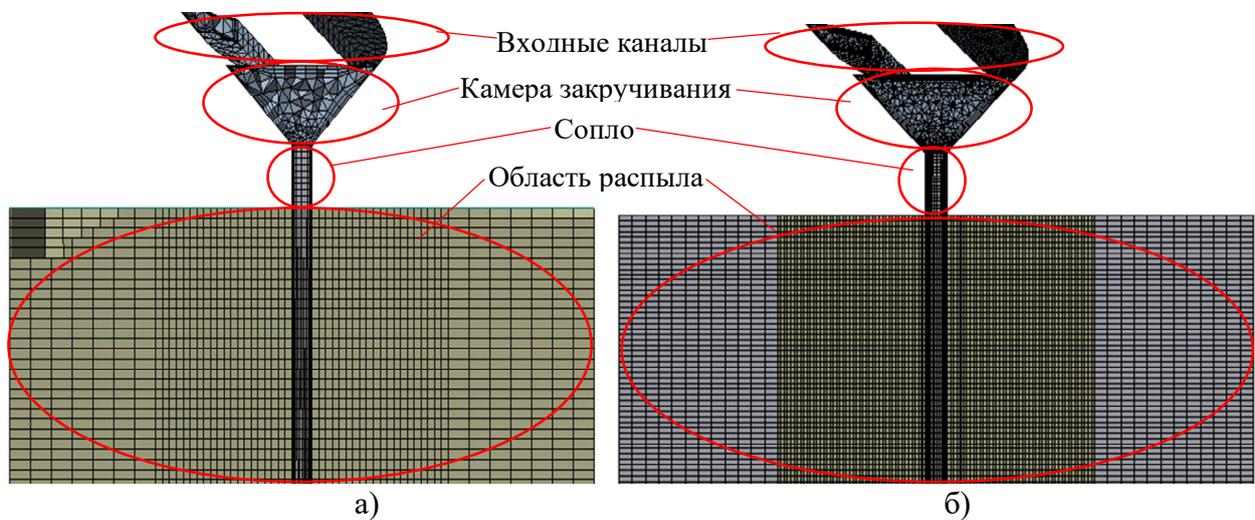


Рис. 2. Расчётная сеточная модель
 а) $l_{min}=100$ мкм, б) $l_{min}=55$ мкм

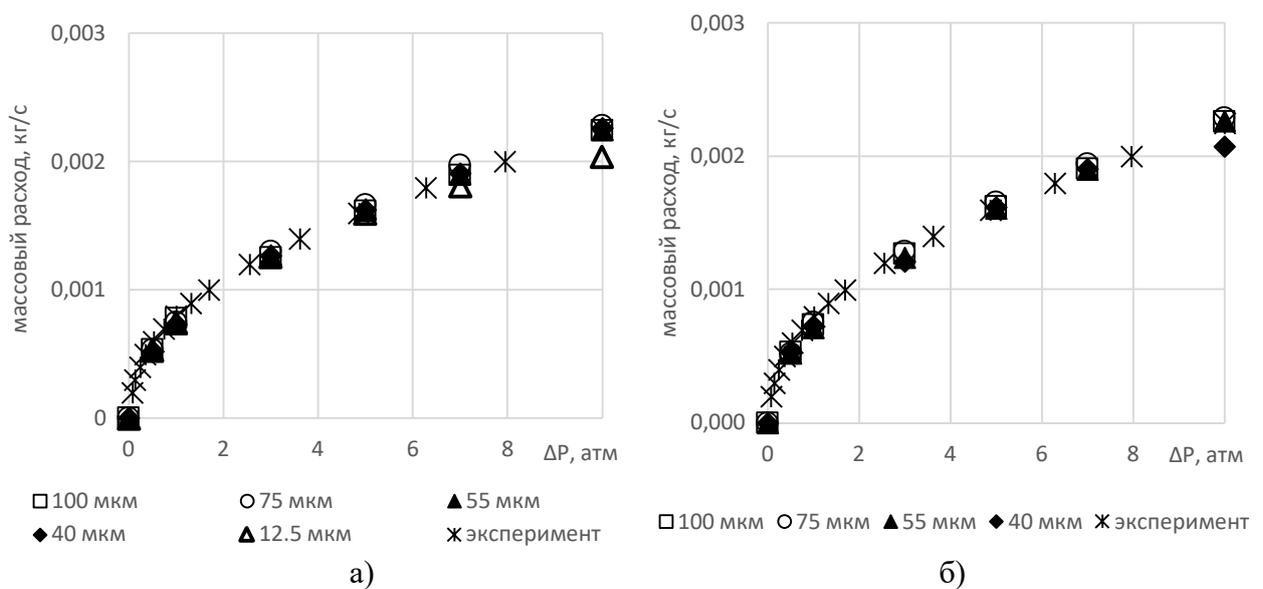


Рис. 3. Изменение массового расхода от перепада давления в стационарной (а) и нестационарной постановках (б)

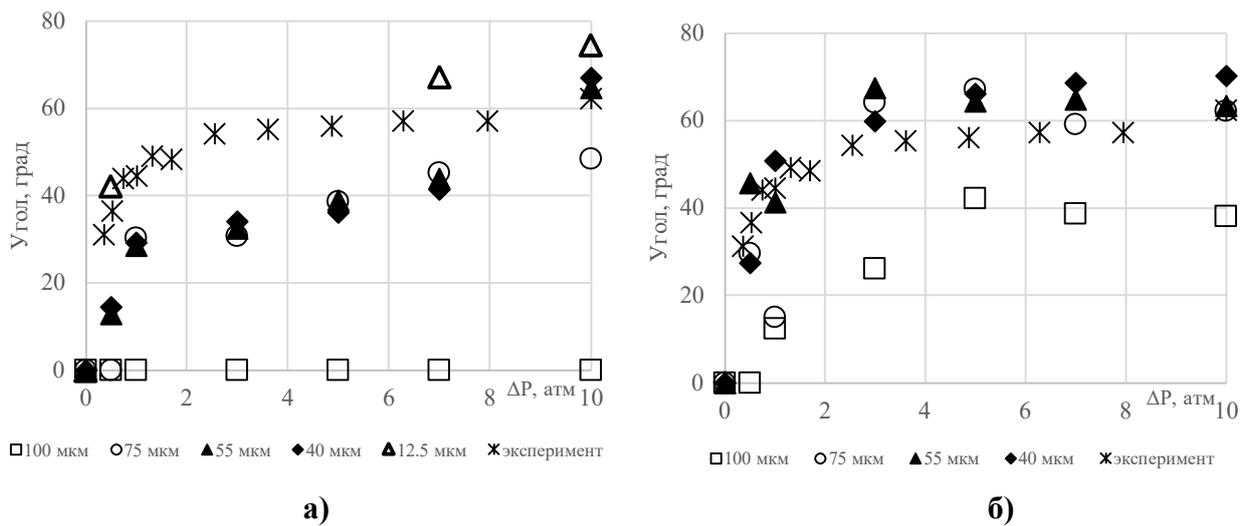


Рис. 4. Изменение угла распыла от перепада давления в стационарной (а) и нестационарной постановках (б)

Таблица 1

Среднеквадратичное отклонение результатов расчёта от данных эксперимента

l_{\min} , мкм	Среднеквадратичное отклонение, град		Среднеарифметическая относительная погрешность, %	
	стационарная постановка	нестационарная постановка	стационарная постановка	нестационарная постановка
12,5	11,9	—	17,7	—
40	16,5	9,4	26,4	16,4
55	18,9	8,9	33,1	14,6
75	23,8	15,1	42,5	21,0
100	57,6	29,3	100,0	53,4

Максимальное расхождение соответствует наиболее высокому перепаду давления ($\Delta P=10$ атмосфер) и равно 8%. Также показано, что результаты расчета расходов топлива в стационарной постановке относительно результатов при использовании нестационарной различаются не более чем на 0,5%. Таким образом для задач определения расходной характеристики форсунки можно использовать сеточную модель с относительно крупным размером элементов. Кроме этого, расчёты могут быть выполнены в стационарной постановке для уменьшения времени расчёта.

Получены результаты расчётов угла распыла топлива для разных сеток в зависимости от перепада давления.

В случае с углом распыла постановка задачи оказывает существенное влияние. Так, для $l_{\min}=100$ мкм при использовании стационарной постановки угол не образуется, данное явление отображено на графике нулевыми значениями

угла распыла. В итоге это приводит к большим отклонениям и погрешностям при использовании этой модели для расчета угла распыла и делает ее нерелевантной. При CFD расчете отклонение зависит от размера элементов, значения отклонений при разных l_{\min} сведены в таблицы, где результаты использования CFD метода сравниваются с данными эксперимента.

Таким образом, на результаты расчета угла распыла топлива существенное влияние оказывает как постановка задачи, так и размер элемента в расчётной области. Видна общая тенденция повышения отклонения при переходе к стационарной постановке и увеличении размера элемента.

Использование адаптации

Для уменьшения времени расчета использовалась динамическая адаптация расчетной сетки в области сопла форсунки. За счет ее использования было достигнуто семикратное

уменьшение количества элементов в расчетной сетке, использующей адаптацию для получения $l_{\min}=12,5$ мкм, по сравнению с сеткой, в которой данный размер был задан изначально. Адаптация проводилась по критерию, характеризующему поверхность раздела фаз – керосина и воздуха. На основе вышеизложенного можно сделать вывод о необходимости использования адаптации для оптимизации расчета, в случае необходимости малого минимального размера элемента.

Заключение

В результате работы показано, что минимальный размер элемента и постановка задачи оказывают существенное влияние на результаты расчёта угла распыла топлива. Так, при переходе к нестационарной постановке расхождение получаемых значений углов распыла с экспериментальными данными уменьшается. Уменьшение минимального размера элементов приводит к увеличению углов, получаемых с помощью CFD. В то же время оба фактора не оказывают существенного влияния на расход топлива и для его расчёта могут быть

использованы модели с меньшим количеством элементов и стационарная постановка для увеличения скорости расчёта. В связи с высоким расхождением результатов, полученных при использовании сеток с большим минимальным размером элементов, можно сделать вывод, что для определения угла распыла форсунки необходимо использовать сеточную модель с l_{\min} меньше 75 мкм. Необходимо дальнейшее расширение исследуемой области размеров элементов для определения максимального l_{\min} , после дальнейшего увеличения которого его влияние на расход становится ощутимым.

Литература

1. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД. М.: Мир, 1986. 566 с.
2. Rodrick V. Chima A $k-\omega$ Turbulence Model for Quasi-Three Dimensional Turbomachinery Flows. Ohio: Lewis Research Center Cleveland, 1996. 14с.
3. Храбрый А. И. Численное моделирование нестационарных турбулентных течений жидкости со свободной поверхности: дис. ... канд. физ.-мат. наук. СПб., 2014. 154 с.

DETERMINING THE DEPENDENCE OF THE CONSUMPTION CHARACTERISTICS OF THE SCREW-CENTRIFUGAL NOZZLE AND SPRAY ANGLE ON THE MINIMUM SIZE OF ELEMENTS AND SETTING

D. V. Yakushkin, V. V. Yastrebov

The paper presents the results of modeling the processes of liquid fuel atomization of a three-way centrifugal screw nozzle used in the combustion chamber of a gas turbine engine. The effect of the minimum size of a computational grid element on the calculation results by CFD methods is studied. Parameters such as the angle of fuel spray and liquid flow rate depending on the pressure drop were investigated. The required element size in the spray area was determined for calculating these characteristics using CFD for various settings (stationary and non-stationary). The difference in the calculation results when using stationary and non-stationary formulations, the advantages of each of them, as well as the area of their applicability for the problem of modeling the spray in the investigated nozzle are revealed. Comparison of calculation results with experimental data is presented.

Key words: fuel nozzle, atomization process, fluid volume method, computational gas dynamics, grid adaptation function.

Статья поступила в редакцию 08.07.2020 г.

© Yakushkin D. V., Yastrebov V. V., 2020.

Yakushkin Denis Vladimirovich (fs_barsa@mail.ru), student III course;

Yastrebov Vsevolod Vladimirovich (seva.yastrebov@yandex.ru), student III course of the Institute of Engine and Power Plant Engineering of the Samara University, 443086, Russia, Samara, Moskovskoye Shosse, 34.