

Применение численных методов для доводки камер сгорания авиационных двигателей по характеристикам распыла топлива

Мингалев С.В.^{1*}, Казимарданов М.Г.^{1,2}**

¹*АО «ОДК-Авиадвигатель»,*

Комсомольский проспект, 93, корп. 61, Пермь, 614990, Россия

²*Институт механики сплошных сред УрО РАН,*

ул. Академика Королёва, 1, Пермь, 614013, Россия

**e-mail: mingalev-sv@avid.ru*

***e-mail: kazimardanov-mg@avid.ru*

Статья поступила 23.12.2020

Аннотация

В статье рассматривается проблема моделирования распыла топлива в пневматических форсунках методом объема жидкости с динамическим дроблением сетки на границе раздела без использования моделей турбулентности на сетках, чье разрешение недостаточно для описания поведения мелких капель. Такой подход позволяет получать результаты, которые затем подтверждаются на испытаниях и используются для доводки камер сгорания, однако обоснование его требует определения влияния размера ячейки расчетной сетки на результаты. Именно такое исследование описано в настоящей статье, в которой сравниваются результаты, полученные в результате моделирования распыла топлива на сетках с разным разрешением. Было найдено, что при уменьшении размера ячейки сетки полученные из расчета значения угла распыла почти не меняются, а диаметры капель уменьшаются более чем в четыре раза.

Ключевые слова: пневматическая форсунка, вычислительная механика, моделирование, камера сгорания, авиационный двигатель, метод объема жидкости

Введение

Исследование посвящено разработке подходов к моделированию образования топливовоздушного аэрозоля в пневматической форсунке, чей принцип работы основан на распыливании пленки топлива закрученными коаксиальными потоками воздуха. Для моделирования этого процесса применяют методы: VOF (volume of fluid) [1-7], LS (level-set) [8-10], SPH (smoothed particle hydrodynamics) [11] и лагранжевых частиц [12]. В последнем случае первичный распад пленки не моделируется и необходимо задавать начальные координаты капель и их распределение по размерам, полученные напрямую из эксперимента [12, 13, 14], либо с помощью полуэмпирических моделей PAMELA (Primary Atomization Model for prEfilming airbLAsT injectors) [15, 16] или LISA (Linearized Instability Sheet Atomization) [17], которые содержат подгоночные параметры, определяемые на основании эмпирических данных.

Оставшиеся три метода VOF, LS и SPH напрямую моделируют распад топливной пленки, что позволяет получать углы распыла [2-4, 7-10], окружную неравномерность [3] и распределение капель по размерам [1, 3, 6-9, 11] без необходимости предварительно проводить эксперименты. Наиболее значимым недостатком этих методов для применения в инженерных расчетах является их чрезвычайная требовательность к вычислительным ресурсам. Обойти это ограничение можно упростив задачу [18, 19, 20] или проводя расчеты на сетках,

которые не позволяют моделировать поведение мелких капель [21]. В инженерную практику вошел именно последний подход, однако обоснование использования полученных с его помощью результатов требует того, чтобы их зависимость от размера ячеек расчетной сетки была пренебрежимо слабой [22]. Цель настоящего исследования состояла в том, чтобы понять какие результаты этому требованию удовлетворяют, а какие нет.

Метод объема жидкости

Идея метода объема жидкости основана на введении скалярной функции, которая, изменяясь от нуля до единицы, определяет долю объема ячейки расчетной сетки занятую жидкостью. В рамках такого подхода вместо нахождения точного положения границы раздела, определяется содержащая её ячейка сетки. Одним из приближений этого метода является решение для всех фаз одного уравнения моментов, значения плотности и вязкости для которого находятся как взвешенные суммы их значений для каждой компоненты смеси.

Исследование распыла топлива методом объема жидкости проводились с помощью коммерческого лицензионного программного обеспечения ANSYS Fluent, в котором численно решается система уравнений в частных производных, состоящая из уравнения для импульса смеси,

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho v_i + \sum_{j=1}^3 \nabla_j (\rho v_j v_i) = -\nabla_i p + \sum_{j=1}^3 \nabla_j \eta (\nabla_i v_j + \nabla_j v_i) + F_i,$$

и для объемной доли жидкости,

$$\frac{\partial}{\partial t} \alpha \rho_w + \sum_{j=1}^3 \nabla_j \alpha \rho_w v_j = 0,$$

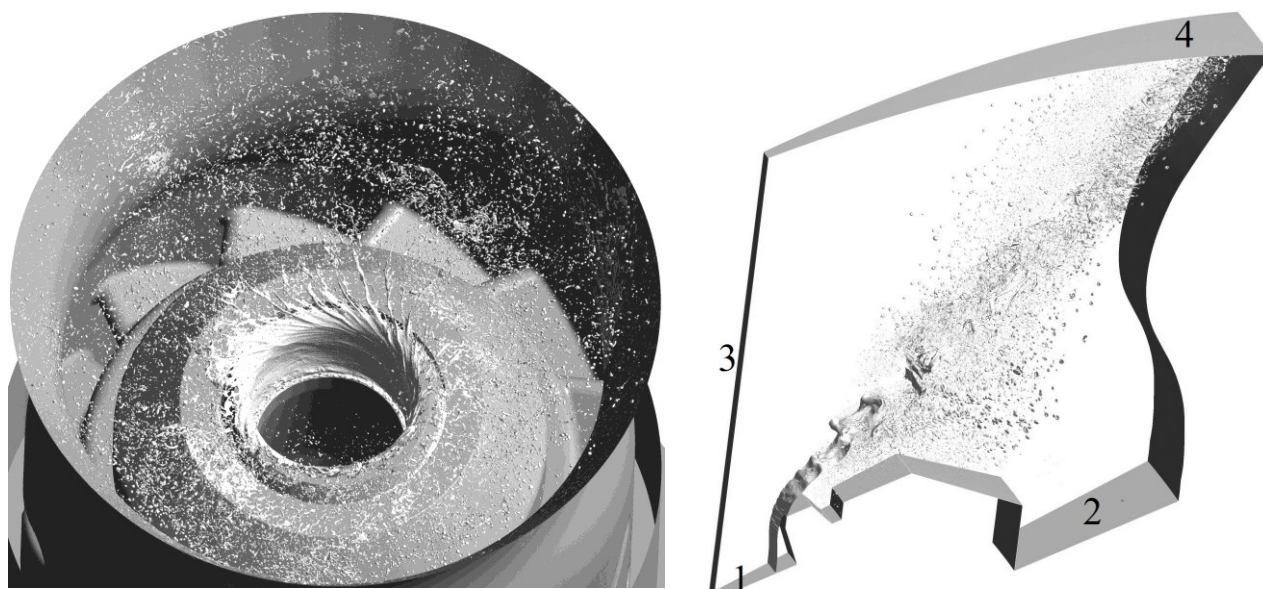
где ρ – плотность смеси, v_i – скорость смеси, p – давление, η – динамическая вязкость смеси, F_i – сила поверхностного натяжения, ρ_w – плотность жидкости, α – объемная доля жидкости. Физические параметры смеси определяются как взвешенная сумма параметров компонент,

$$\rho = \alpha \rho_w + (1 - \alpha) \rho_g, \quad \eta = \alpha \eta_w + (1 - \alpha) \eta_g.$$

где ρ_w и ρ_g – плотности жидкости и воздуха, η_w и η_g – динамические вязкости жидкости и воздуха.

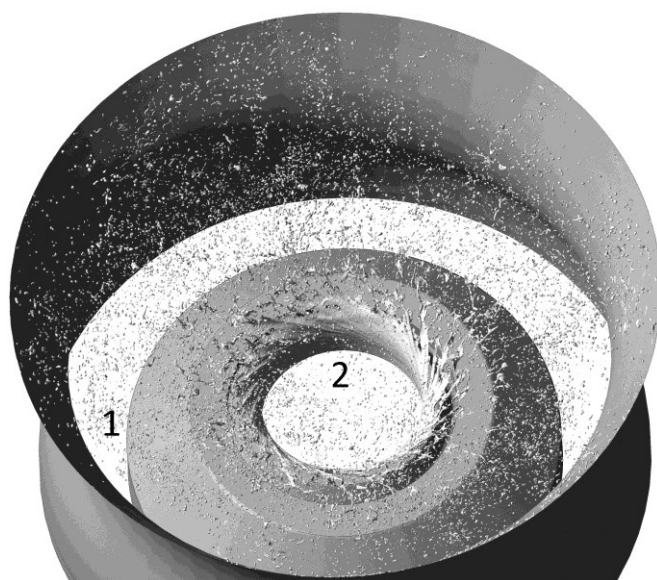
Геометрия исследуемой форсунки

Исследуемая форсунка, описанная в [23], показана на Рисунке 1а. Формирование спрея капель в ней происходит в результате взаимодействия топливной пленки и двух закрученных потоков воздуха, поступающих из центрального и внешнего каналов.



а

б



в

Рисунок 1 – Распад топливной пленки в форсунке, полученный в расчете в несимметричной полной постановке (а), на 5-градусном секторе (б) и в осесимметричной полной постановке (в). 1 и 2 – граничные условия на скорость, 3 – условие симметрии, 4 – условие на давление

Как правило, исследование распыла топлива в форсунках проводится в полной трехмерной постановке на сетках с размером ячейки порядка 100 мкм и их

двукратным дроблением. Выбор такого разрешения обусловлен имеющимся объемом вычислительных ресурсов и обойти это ограничение для исследования влияния размеров ячейки сетки невозможно без упрощения геометрии задачи. По этой причине исследование влияния размеров ячеек расчетной сетки проводилось на 5-градусном секторе (Рисунок 1б) форсунки. Эта геометрия была получена путем отсечения у форсунки, показанной на Рисунке 1а, несимметричной относительно оси части (со шнеками и завихрителями), на месте которой задано граничное условие на скорость. Также убрана часть около оси симметрии и на её месте поставлено условие симметрии. Это сделано из-за того, что в треугольной призме с углом, равным 5 градусам, невозможно построить хорошую сетку. Также для исследования влияния введенного осесимметричного упрощения проведен расчет распыла в осесимметричной полной (360 градусов) постановке (Рисунок 3в). Подробнее постановка задачи описана в [20].

Сравнение проводилось между результатами пяти расчетов. Расчеты в несимметричной и осесимметричной полных постановках (Рисунок 1а и 1в) проводились на сетках с размером ячейки 125 мкм и двукратным её дроблением на границе раздела до 31.25 мкм. В случае 5-градусного сектора (Рисунок 1б) расчеты проводились в трех постановках: с размером ячейки сетки – 25 мкм с 2-кратным дроблением до 6.25 мкм, с 3-кратным – до 3.125 мкм и с 4-кратным – до 1.5625 мкм.

Размеры капель

Размеры капель характеризуются функцией распределения $f(d)$, значение которой равно расходу проходящих через поперечное сечение форсунки капель с

диаметром меньше d . Зная эту характеристику и общий расход топлива Q_Σ , можно определить часть расхода, связанную с каплями, чьи диаметры находятся в интервале от d_i до d_{i+1} , по формуле

$$Q_i = Q_\Sigma (f(d_{i+1}) - f(d_i)).$$

Влияние расчетной сетки на функцию распределения $f(d)$ демонстрирует Рисунок 2, на котором изображена её плотность, полученная из расчета на полной геометрии форсунки в осесимметричной и несимметричной постановках (31.25 мкм) и в 5-градусном секторе при 2-, 3- и 4-кратном дроблении сетки на межфазной

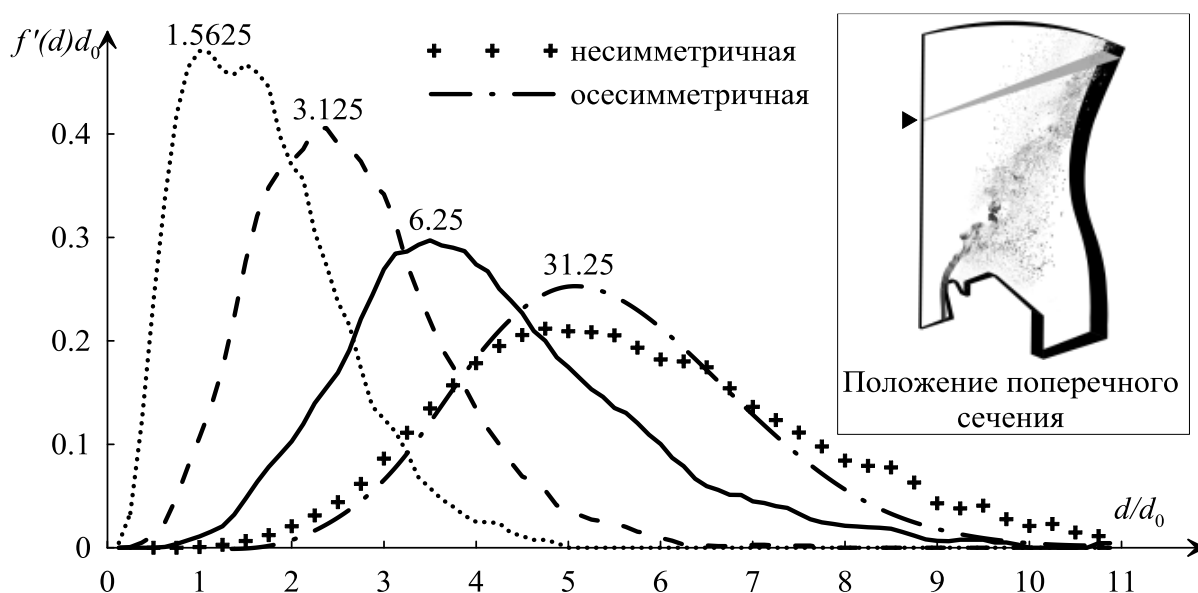


Рисунок 2 – Плотность функции распределения в зависимости от диаметра капли в сечении на выходе из форсунки для сеток с минимальным размером ячейки 31.25 (расчет в полной осесимметричной и несимметричной постановке), 6.25, 3.125 и 1.5625 мкм. Единица измерения диаметров капель d_0 равна наиболее вероятному диаметру в расчете с минимальной ячейкой 1.5625 мкм

границе (6.25, 3.125, 1.5625 мкм). Первый вывод, который можно сделать из Рисунка 2, состоит в том, что введение осесимметричного приближения привело к тому, что разброс в размерах капель оказался немного меньше, чем в несимметричной постановке, при этом их наиболее вероятный диаметр почти не изменился. Это указывает на возможность использования осесимметричного приближения для определения размеров капель в исследуемой форсунке в осесимметричном приближении. Второй вывод состоит в том, что изменение размера ячейки расчетной сетки приводит к значительному уменьшению размера капель по сравнению с расчетами на грубых сетках в случае полной трехмерной геометрии. На первый взгляд такой результат указывает на то, что размеры капель, полученные из полного трехмерного расчета, не представляют никакой ценности. Однако из Рисунка 2 можно сделать вывод о том, что при уменьшении размера ячейки расчетной сетки происходит уменьшение размеров капель. Это значит, что ценность расчета, проводимого на грубых сетках, состоит в том, что он дает верхнюю оценку размеров капель.

Уменьшение размера капли приводит к тому, что она быстрее испаряется и при каком-то значении её существование станет настолько малым, что дальнейшее уменьшение размера перестанет оказывать заметное влияние на горение в камере сгорания. К аналогичному выводу пришел Ю.Г. Куценко [24] на основании результатов моделирования горения в камере сгорания. Отсюда можно сделать вывод, что если в расчете на грубой сетке получена оценка диаметра капель ниже некоторого зависящего от конструкции конкретной камеры сгорания значения, то

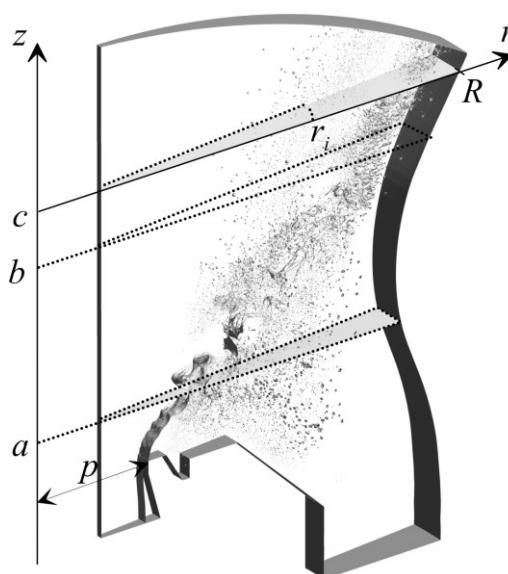


Рисунок 3 – Положения секущих поверхностей

отсутствует практический смысл в дальнейшем дроблении сетки с целью определения точного значения размеров капель, так как это не приведет к значительному изменению ни эмиссии NO_x , ни профиля температуры на выходе из жаровой трубы.

Пространственное расположение потоков керосина

Пространственное расположение потоков керосина характеризуется нормированным расходом топлива $F_z(r)$ через секущие поверхности, заданные значениями осевой z и радиальной r координат. Для получения этой величины суммируется объем топлива $V_z(r_i)$, прошедший за время расчета через поверхность, ограниченную окружностью $r = r_i$ (Рисунок 3), и делится на общий объем топлива прошедший через поперечное сечение форсунки $V_z(R)$,

$$F_z(r_i) = \frac{V_z(r_i)}{V_z(R)}.$$

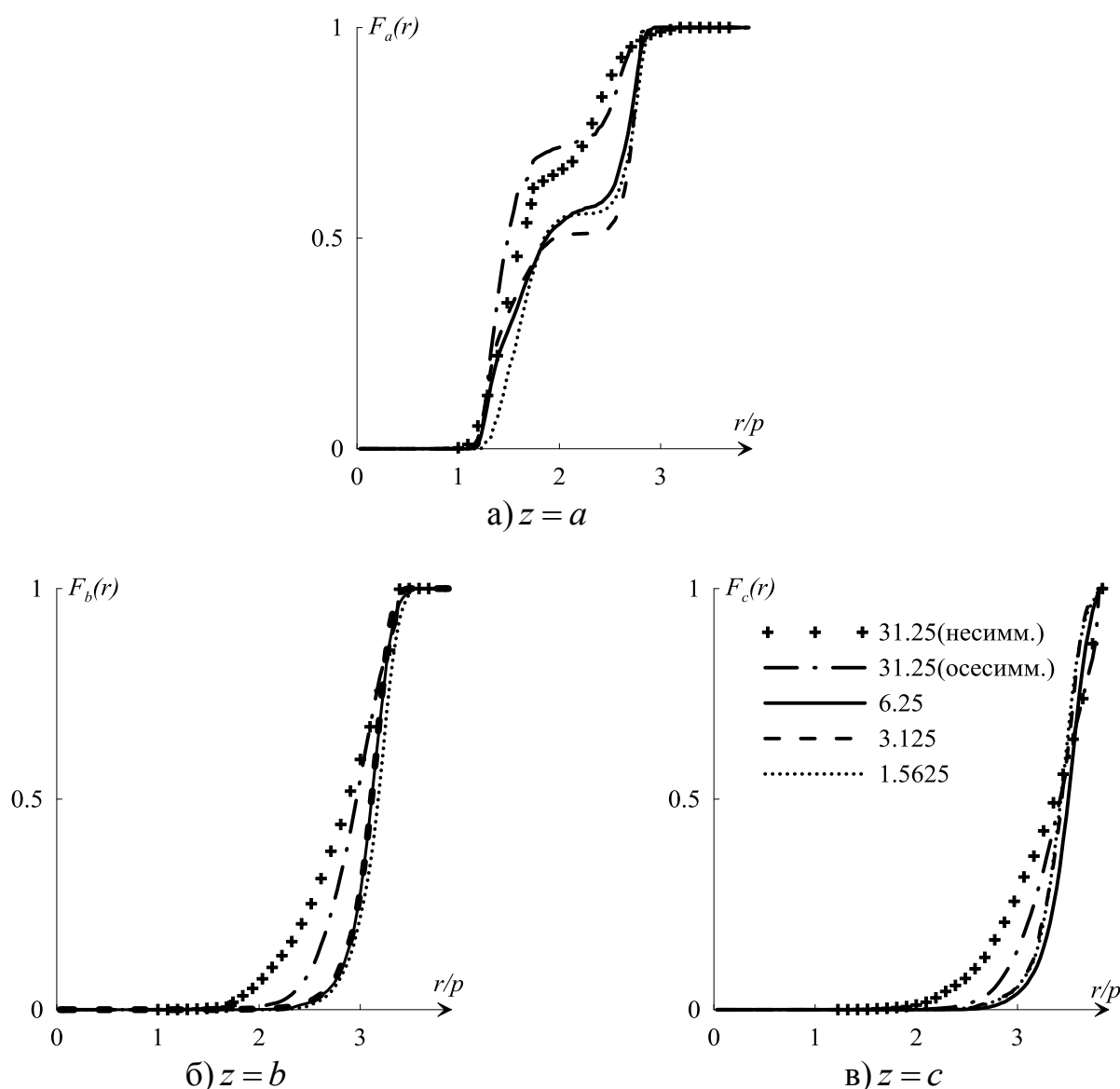


Рисунок 4 – Зависимости нормированного расхода керосина от радиальной координаты для сеток с минимальным размером ячейки 31.25 (расчет в полной осесимметричной и несимметричной постановках), 6.25, 3.125 и 1.5625 мкм в случае поперечного сечения вблизи точки распада пленки ($z = a$) и на выходе из форсунки ($z = b$ и c). Единица измерения – радиус кромки пленкообразующей поверхности p (показан на Рисунке 3)

В результате получается изменяющаяся от нуля до единицы в зависимости от значения $r = r_i$ величина, которая приведена на Рисунке 4 для сечений, показанных

на Рисунке 3. Из Рисунка 4а можно сделать вывод о том, что после первичного распада пленки около сечения с $z = a$ капли во всех расчетах оказываются примерно в одном и том же месте. Двухступенчатый характер зависимости отражает наличие двух потоков керосина (ранее описанных в [25]), появление которых связано с особенностью исследуемой форсунки. Влияние осесимметричного приближения проявляется в том, что внутренний поток капель в такой постановке переносит на примерно 5% больший объем керосина.

В случае пространственного расположения капель в форсунке практический интерес представляет угол распыла. Как правило, его определяют визуально по изображению, показывающему положения капель, для чего проводится линия, отделяющая область, содержащую их, от области, где они отсутствуют. Однако концентрация капель при удалении от оси симметрии изменяется непрерывно, в результате, такой подход вносит субъективность в процесс определения значения угла распыла. Чтобы этого избежать, здесь эта величина определялась по медианным значениям r_m , для которых

$$F_z(r_m) = 0.5.$$

Углы распыла, полученные таким образом по показанным на Рисунке 4 зависимостям нормированных расходов в сечениях с $z = b$ и c , во всех пяти расчетах оказались отличающимися не больше чем на 3 градуса, что можно считать небольшим отличием. При этом разница между значениями этой величины, полученными из расчета в осесимметричной и несимметричной полных (360°) постановках, получилась пренебрежимо малой. Таким образом несмотря на наличие

влияния сетки на пространственное расположение потоков капель керосина, угол распыла, имеющий практическое значение, оказывается примерно одинаковым как в расчете на грубой сетке в полной постановке, так и на мелких сетках в пятиградусном секторе.

Заключение

Найдено, что значение угла распыла, полученного из расчета, слабо зависит от разрешения расчетной сетки для исследуемой форсунки (если минимальный размер ячейки меньше 30 мкм). Этот результат позволяет обосновать использование расчетов распыла топлива методом объема жидкости на грубых сетках по крайней мере для получения этой величины.

Показано, что изменение размера ячейки расчётной сетки приводит к изменению размера капель более чем в 4 раза. Несмотря на это, ценность результата, полученного на грубых сетках, состоит в том, что таким образом определяется верхняя оценка этой величины.

Получено, что использование осесимметричного приближения почти не оказывает влияния на получаемые из расчетов значения угла распыла и наиболее вероятного диаметра капель, что подтверждает возможность использования этого приближения для исследования распыла в пневматических форсунках.

Предложен способ нахождения угла распыла по зависимости нормального расхода топлива от радиальной координаты. Такой подход позволяет устранить элемент субъективности из процесса определения этой величины.

Библиографический список

1. Shao C., Luo K., Chai M., Fan J. Sheet, ligament and droplet formation in swirling primary atomization // AIP Advances, 2018, vol. 8 (4), URL: <https://doi.org/10.1063/1.5017162>
2. Сипатов А.М., Карабасов С.А., Гомзиков Л.Ю., Абрамчук Т.В., Семаков Г.Н. Применение методов трехмерного моделирования при конструировании пневматических форсунок // Вычислительная механика сплошных сред. 2013. Т. 6 (3). С. 346 - 353. URL: <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2013.6.3.39>
3. Сипатов А.М., Модорский В.Я., Бабушкина А.В., Колодяжный Д.Ю., Нагорный В.С. Расчетное исследование влияния конструктивных параметров на характеристики распыла топлива пневматической форсунки // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2017. № 3. С. 101 - 105. URL: <https://doi.org/10.3103/s1068799817030151>
4. Zhao W., Cao F., Ning Z., Zhang G., Li Z., Sun J. A computational fluid dynamics (CFD) investigation of the flow field and the primary atomization of the close coupled atomizer // Computers & Chemical Engineering, 2012, vol. 40 (3), pp. 58 – 66. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2012.02.014>
5. Li X., Fritsching U. Process modeling pressure-swirl-gas-atomization for metal powder production // Journal of Materials Processing Technology, 2017, vol. 239, pp. 1 – 17. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.08.009>
6. Ma P., Esclape L., Carbajal S., Ihme M., Buschhagen T., Naik S., Gore J, Lucht R. High-fidelity simulations of fuel injection and atomization of a hybrid air-blast atom-izer //

Proc. of the 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting, American Institute of Aeronautics and Astronautics, San Diego, California, USA, January 4-8, 2016. URL:

<https://doi.org/10.2514/6.2016-1393>

7. Сёмкин Е.В. Исследование процессов истечения жидкости из малорасходных центробежных форсунок жидкостного ракетного двигателя малой тяги // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. Т. 15. № 4. С. 150 - 161. URL: <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2016-15-4-150-161>

8. Shao C., Luo K., Yang Y., Fan J. Detailed numerical simulation of swirling primary atomization using a mass conservative level set method // International Journal of Multiphase Flow, 2016, vol. 89, pp. 57 - 68. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.10.010>

9. Shao C., Luo K., Yang J., Chen S., Fan J. Accurate level set method for simulations of liquid atomization // Chinese Journal of Chemical Engineering, 2015, vol. 23 (4), pp. 597 – 604. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.10.010>

10. Desjardins O., McCaslin J, Owkes M, Brady P. Direct numerical and large-eddy simulation of primary atomization in complex geometries // Atomization and Sprays, 2013, vol. 23 (11), pp. 1001 – 1048. URL: <https://doi.org/10.1615/atomizspr.2013007679>

11. Simon H. New Insights in the Primary Breakup Process of Prefilming Airblast Atomizers by SPH Predictions // Proc. of ICLASS 2018: 14th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, University of Illinois, Chicago, USA, July 22-26, 2018. URL: <https://doi.org/10.5445/IR/1000084439/pub>

12. Grech N., Mehdi A., Zachos P.K., Pachidis V., Singh R. Effect of Combustor Geometry on Performance of Airblast Atomizer Under Sub-Atmospheric Conditions // Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2012, vol. 6 (2), pp. 203 – 213. URL: <https://doi.org/10.1080/19942060.2012.11015415>
13. Баталов В.Г., Степанов Р.А., Сухановский А.Н. Применение прямых оптических методов для исследования характеристик двухфазного потока // Труды МАИ. 2014. № 76. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=50074>
14. Ланский А.М., Лукачев С.В., Матвеев С.Г. Исследование распыливания топлива пневмомеханическими форсунками // Труды МАИ. 2012. № 57. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=31093>
15. Chaussonnet G., Vermorel O., Riber E., Cuenot B. A new phenomenological model to predict drop size distribution in Large-Eddy Simulations of airblast atomizers // International Journal of Multiphase Flow, 2016, vol. 80, pp. 29 - 42. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2015.10.014>
16. Holz S., Chaussonnet G., Gepperth S., Koch R., Bauer H.J. Comparison of the Primary Atomization Model PAMELA with Drop Size Distributions of an Industrial Prefilming Airblast Nozzle // In Proc. of the 27th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Brighton, UK, 4–7 September 2016. URL: <http://www.ilasseurope.org/ICLASS/ilass2016.zip>
17. E A.I., Ayedh Al., Zhiyin Y. Numerical study of the combustion of conventional and biofuels using reduced and advanced reaction mechanisms // Thermal Science, 2015, vol. 19 (6), pp. 2171 - 2184. URL: <https://doi.org/10.2298/TSCI141106038A>

18. Sauer B., Sadiki A., Janicka J. Numerical Analysis of the Primary Breakup Applying the Embedded DNS Approach to a Generic Prefilming Airblast Atomizer // The Journal of Computational Multiphase Flows, 2014, vol. 6 (3), pp. 179 - 192. URL: <https://doi.org/10.1260/1757-482X.6.3.179>
19. Warncke K., Gepperth S., Sauer, B. Sadiki A., Janicka J., Koch R., Bauer H.-J. Experimental and numerical investigation of the primary breakup of an airblasted liquid sheet // International Journal of Multiphase Flow, 2017, vol. 91, pp. 208 - 224. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.12.010>
20. Mingalev S., Inozemtsev A., Gomzиков L., Sipatov Al., Abramchuk T. Simulation of Primary Film Atomization in Prefilming Air-assisted Atomizer Using Volume-of-Fluid Method // Microgravity Science and Technology, 2020, vol. 32, pp. 465 – 476. DOI: [10.1007/s12217-020-09782-3](https://doi.org/10.1007/s12217-020-09782-3)
21. Kazimardanov M., Zagitov R. Numerical Simulation of Kerosene Atomization in Injector of a Gas Turbine Engine // AIP Conference Proceedings, 2019, vol. 2125, URL: <https://doi.org/10.1063/1.5117432>
22. Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer, ASME V&V 20-2009, New York, ASME, 2009, 100 p.
23. Нагорный В.С., Колодяжный Д.Ю., Сипатов А.М., Хрящиков М.С., Семаков Г.Н. Топливная форсунка газотурбинного двигателя. Патент № 2615618 РФ. Бюлл. № 10, 05.04.2017.

24. Куценко Ю.Г. Методология проектирования малоэмиссионных камер сгорания газотурбинных двигателей на основе математических моделей физико-химических процессов: Дисс..... д.т.н. – Пермь: ПНИПУ, 2010, - 298 с.

25. Mingalev S.V., Inozemtsev A.A., Gomzikov L.Y., Sipatov A.M., Abramchuk T.V. The Numerical Simulation of the Atomization of a Kerosene Film in an Air-Assist Atomizer with a Prefilmer // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2020, vol. 61, pp. 1059 - 1067. URL: <https://doi.org/10.1134/S0021894420070081>

Application of numerical method in improvement of fuel atomization characteristics of combustion chamber

Mingalev S.V.^{1*}, Kazimardanov M.G.^{1,2}**

¹*UEC-Aviadvigatel JSC, 93, Komsomolsky Prospect, Perm, 614990, Russia*

²*Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of Russian Academy of Science, 1, Academician Korolev str., 614013, Perm, Russia*

*e-mail: mingalev-sv@avid.ru

**e-mail: kazimardanov-mg@avid.ru

Abstract

The article is devoted to the research of approach to getting the drop-diameter distribution, the spray angle and the localization of kerosene flow inside an air-assisted atomizer by simulations performed with the coarse meshes, which are not fine enough to accurately imitate turbulence and with the level of mesh refinement that are not high enough to make the value of drop diameter independent on the mesh cell size. The simulation of fluid in the air-assisted atomizer, which was patented under the number

RU2615618, was performed using ANSYS Fluent by the volume of fluid method in two configurations: 1) The five-degree sector on the mesh with minimal cell size 25 μm and 2-time, 3-time and 4-time adaptive mesh refinements at the gas-liquid interface, 2) The full geometry with fuel channels and swirlers on the mesh with minimal cell size 125 μm and 2-time adaptive mesh refinement. The last approach is the main way to simulate the atomization of fuel in air-assisted atomizers in UEC-Aviadvigatel JSC. Comparison of the results reveals that the value of spray angle doesn't substantially depend on the minimum mesh cell size. Regarding the diameters of droplets, it plunged by more than 70% with the reduction of mesh cell size. Consequently, the simulation of atomization with coarse meshes gives the upper estimate of droplet radius and this result can be of practical use, if the value is so small, that its reduction wouldn't substantially influence emissions of NO_x and the gas temperature after combustion chamber being yielded by the combustion simulation.

Keywords: air-blast atomizer, computational fluid dynamics, simulation, combustion chamber, aircraft engine, volume of fluid method.

References

1. Shao C., Luo K., Chai M., Fan J. Sheet, ligament and droplet formation in swirling primary atomization, *AIP Advances*, 2018, vol. 8 (4), URL: <https://doi.org/10.1063/1.5017162>

2. Sipatov A.M., Karabasov S.A., Gomzikov L.Yu., Abramchuk T.V., Semakov G.N. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred*, 2013, vol. 6 (3), pp. 346 - 353. URL: <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2013.6.3.39>
3. Sipatov A.M., Modorskii V.Ya., Babushkina A.V., Kolodyazhnyi D.Yu., Nagornyi V.S. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviatsionnaya tekhnika*, 2017, no. 3, pp. 101 - 105. URL: <https://doi.org/10.3103/s1068799817030151>
4. Zhao W., Cao F., Ning Z., Zhang G., Li Z., Sun J. A computational fluid dynamics (CFD) investigation of the flow field and the primary atomization of the close coupled atomizer, *Computers & Chemical Engineering*, 2012, vol. 40 (3), pp. 58 – 66. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2012.02.014>
5. Li X., Fritsching U. Process modeling pressure-swirl-gas-atomization for metal powder production, *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, vol. 239, pp. 1 – 17. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.08.009>
6. Ma P., Esclape L., Carbajal S., Ihme M., Buschhagen T., Naik S., Gore J, Lucht R. High-fidelity simulations of fuel injection and atomization of a hybrid air-blast atom-izer, *Proc. of the 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, San Diego, California, USA, January 4-8, 2016. URL: <https://doi.org/10.2514/6.2016-1393>
7. Semkin E.V. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie*, 2016, vol. 15, no. 4, pp. 150 - 161. URL: <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2016-15-4-150-161>

8. Shao C., Luo K., Yang Y., Fan J. Detailed numerical simulation of swirling primary atomization using a mass conservative level set method, *International Journal of Multiphase Flow*, 2016, vol. 89, pp. 57 - 68. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.10.010>
9. Shao C., Luo K., Yang J., Chen S., Fan J. Accurate level set method for simulations of liquid atomization, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2015, vol. 23 (4), pp. 597 – 604. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.10.010>
10. Desjardins O., McCaslin J, Owkes M, Brady P. Direct numerical and large-eddy simulation of primary atomization in complex geometries, *Atomization and Sprays*, 2013, vol. 23 (11), pp. 1001 – 1048. URL: <https://doi.org/10.1615/atomizspr.2013007679>
11. Simon H. New Insights in the Primary Breakup Process of Prefilming Airblast Atomizers by SPH Predictions, *Proc. of ICLASS 2018: 14th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, University of Illinois, Chicago, USA, July 22-26, 2018. URL: <https://doi.org/10.5445/IR/1000084439/pub>
12. Grech N., Mehdi A., Zachos P.K., Pachidis V., Singh R. Effect of Combustor Geometry on Performance of Airblast Atomizer Under Sub-Atmospheric Conditions, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2012, vol. 6 (2), pp. 203 – 213. URL: <https://doi.org/10.1080/19942060.2012.11015415>
13. Batalov V.G., Stepanov R.A., Sukhanovskii A.N. *Trudy MAI*, 2014, no. 76. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=50074>
14. Lanskii A.M., Lukachev S.V., Matveev S.G. *Trudy MAI*, 2012, no. 57. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=31093>

15. Chaussonnet G., Vermorel O., Riber E., Cuenot B. A new phenomenological model to predict drop size distribution in Large-Eddy Simulations of airblast atomizers, *International Journal of Multiphase Flow*, 2016, vol. 80, pp. 29 - 42. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2015.10.014>
16. Holz S., Chaussonnet G., Gepperth S., Koch R., Bauer H.J. Comparison of the Primary Atomization Model PAMELA with Drop Size Distributions of an Industrial Prefilming Airblast Nozzle, *In Proc. of the 27th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, Brighton, UK, 4–7 September 2016. URL: <http://www.ilasseurope.org/ICLASS/ilass2016.zip>
17. E A.I., Ayedh Al., Zhiyin Y. Numerical study of the combustion of conventional and biofuels using reduced and advanced reaction mechanisms, *Thermal Science*, 2015, vol. 19 (6), pp. 2171 - 2184. URL: <https://doi.org/10.2298/TSCI141106038A>
18. Sauer B., Sadiki A., Janicka J. Numerical Analysis of the Primary Breakup Applying the Embedded DNS Approach to a Generic Prefilming Airblast Atomizer, *The Journal of Computational Multiphase Flows*, 2014, vol. 6 (3), pp. 179 - 192. URL: <https://doi.org/10.1260/1757-482X.6.3.179>
19. Warncke K., Gepperth S., Sauer, B. Sadiki A., Janicka J., Koch R., Bauer H.-J. Experimental and numerical investigation of the primary breakup of an airblasted liquid sheet, *International Journal of Multiphase Flow*, 2017, vol. 91, pp. 208 - 224. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.12.010>
20. Mingalev S., Inozemtsev A., Gomzikov L., Sipatov Al., Abramchuk T. Simulation of Primary Film Atomization in Prefilming Air-assisted Atomizer Using Volume-of-Fluid

Method, *Microgravity Science and Technology*, 2020, vol. 32, pp. 465 – 476.

DOI: [10.1007/s12217-020-09782-3](https://doi.org/10.1007/s12217-020-09782-3)

21. Kazimardanov M., Zagitov R. Numerical Simulation of Kerosene Atomization in Injector of a Gas Turbine Engine, *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2125, URL:

<https://doi.org/10.1063/1.5117432>

22. *Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer*, ASME V&V 20-2009, New York, ASME, 2009, 100 p.

23. Nagornyi V.S., Kolodyazhnyi D.Yu., Sipatov A.M., Khryashchikov M.S., Semakov G.N. *Patent 2615618 SU*, no. 10, 05.04.2017.

24. Kutsenko Yu.G. *Metodologiya proektirovaniya maloemissionnykh kamer sgoraniya gazoturbinnnykh dvigatelei na osnove matematicheskikh modelei fiziko-khimicheskikh protsessov* (Methodology of Low-emission Combustion Chamber Development on the Basis of Simulation of Physicochemical Processes), Doctor's thesis, Perm', PNIPU, 2010, 298 p.

25. Mingalev S.V., Inozemtsev A.A., Gomzиков L.Y., Sipatov A.M., Abramchuk T.V. The Numerical Simulation of the Atomization of a Kerosene Film in an Air-Assist Atomizer with a Prefilmer, *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2020, vol. 61, pp. 1059 - 1067. URL: <https://doi.org/10.1134/S0021894420070081>