DOI: 10.15593/2224-9982/2016.45.11

УДК 621.45.034.3

А.М. Сипатов, В.Я. Модорский, А.В. Бабушкина

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АЭРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ РАСПЫЛА ЖИДКОЙ ПЛЕНКИ

Одной из основных задач при разработке элементов энергетических установок и газотурбинных двигателей является создание эффективных устройств, обеспечивающих распыл жидкого топлива. Разработка эффективных современных распыливающих устройств и их оптимизация значительно упрощаются при сочетании методов экспериментального и численного исследования, так как именно численные методы позволяют лучше понять структуру потока и выявить факторы, влияющие на качество распыла топлива. Разработана инженерная методика расчета двухфазных потоков при распыле жидкой пленки под действием набегающего потока воздуха. В ходе численных экспериментов проведена оценка влияния аэрогидродинамических параметров на характеристики распыла жидкой пленки. Проведены численные расчеты для экспериментального образца форсунки и получены результаты относительно траектории струи, ее профиля и распределения капель в пространстве, в продольном и поперечном сечениях, при изменении аэродинамических характеристик газового потока и гидродинамических характеристик жидкого потока. Выявлено, что на траекторию струи и характер распределения капель жидкости влияет соотношение импульсов взаимодействующих потоков. Данные вычислительные эксперименты проведены с применением высокопроизводительных вычислительных систем Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Ключевые слова: газогидродинамика, вычислительный эксперимент, пневматическая форсунка, распыл, модель свободной поверхности.

A.M. Sipatov, V.Ya. Modorsky, A.V. Babushkina

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

RESEARCH OF INFLUENCE AEROHYDRODYNAMIC PARAMETERS ON THE CHARACTERISTICS OF LIQUID FILM SPRAY

One of the important tasks in the development of power plant and gas turbine engine elements is creating efficient devices for spraying liquid fuel. The development of effective modern sprayer devices and their optimization is greatly simplified by combining the methods of experimental and numerical studies. Numerical methods make it possible to better understand the flow structure and identify the factors that affect the quality of the spray. Engineering method for calculating the two-phase flow at the

spray liquid film under the influence of the incoming flow was developed. During numerical experiments the effect of aerohydrodynamic parameters on the characteristics of the spray liquid film was evaluated. Numerical calculations for the experimental sample injector were performed and the following results were obtained: identified the jet trajectory, its profile and distribution of droplets in the space, in the longitudinal and transverse sections. It was revealed that the ratio of pulses interacting flows impact on the trajectory of the jet and the distribution pattern of liquid droplets. The computational experiments were carried out in the PNRPU Center of high performance computing systems.

Keywords: gas-hydrodynamic processes, computing experiment, pneumatic nozzle, spray, model volume of fluid.

Введение

Одной из основных задач при разработке элементов энергетических установок и газотурбинных двигателей является создание эффективных устройств, обеспечивающих распыл жидкого топлива. Моделирование формирования и распада жидких пленок и струй – достаточно сложная исследовательская задача, различные пути решения которой [1–3] пока не гарантируют получения правильного распределения капель по размерам, вследствие чего достаточной достоверностью при определении характеристик распыла на данный момент обладают только экспериментальные исследования. Разработка эффективных современных распыливающих устройств и их оптимизация значительно упрощаются при сочетании методов экспериментального и численного исследования, так как именно численные методы позволяют лучше понять структуру потока и выявить факторы, влияющие на качество распыла в областях, где экспериментальное наблюдение недоступно. Отработанную методику по верификации аналитической задачи распада жидкой колонны под действием набегающего потока воздуха можно использовать при решении прикладных задач по оптимизации пневматических форсунок для камер сгорания газотурбинных двигателей [4]. В литературе рассмотрен пример, используемый для исследования процесса распада струи жидкости на капли, – задача о распаде струйки жидкости, попадающей из круглого отверстия в скоростной перпендикулярный поток [5]. Детальные экспериментальные исследования процесса распада жидкой колонны выполнены в работах Ву и др. [6–8].

В данной статье представлены результаты исследования влияния аэрогидродинамических параметров на характеристики распыла жидкой пленки на основе доработанной методики расчета [9].

Математическая реализация задачи

Двухфазное течение моделируется набором уравнений газовой динамики. Система уравнений включает в себя уравнения неразрывности, импульса, состояния и турбулентности¹. При небольших дозвуковых скоростях потока все уравнения будут одностепенными для обеих фаз. При этом свойства среды зависят от объемной доли жидкости. За счет дробления сетки происходит улавливание границы раздела фаз. Граница раздела фаз будет присутствовать лишь в небольшой доле ячеек очень малого размера, в которых скорости жидкости и воздуха допустимо считать равными. Исходя из этого используем один набор уравнений, в котором уравнение неразрывности становится уравнением переноса α (объемной доли жидкости в ячейке), а плотность определяется как

$$\rho = \alpha \rho_{\text{ж}} + (1 - \alpha) \rho_{\text{г}},$$

где α – объемная доля жидкости в ячейке; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости; $\rho_{\text{г}}$ – плотность газа.

Межфазовое взаимодействие определяется силой поверхностного натяжения F в уравнении моментов

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \nabla \cdot (\rho v) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla v + \nabla v^T)] + \rho g + F,$$

задающей градиент давления на поверхности раздела фаз через ее кривизну, находимую по производным концентрации [10]:

$$F = \sigma \frac{\rho \Delta \alpha \nabla \alpha}{\frac{1}{2} |\nabla \alpha| (\rho_{\text{г}} + \rho_{\text{ж}})},$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения; v – скорость; p – давление; μ – динамическая вязкость; g – ускорение свободного падения.

Для замыкания системы уравнений использовалась модель турбулентности *LES* (модель крупных вихрей). Данная модель занимает промежуточное положение между моделями, использующими осредненные уравнения Рейнольдса (*RANS*) и методом прямого моделирования *DNS*. Здесь крупные вихри рассчитываются, а мельчайшие вихри

¹ ANSYS FLUENT-Solver Theory Guide. ANSYS FLUENT release 15.0.

подсеточного масштаба моделируются. Модель *LES* более требовательна к расчетной сетке и вычислительным ресурсам. При проведении вычислительных экспериментов были использованы мощности Центра высокопроизводительных вычислительных систем, поэтому расчеты с применением модели *LES* были доступными для решения данной инженерной задачи.

Построение сеточной модели и задание граничных условий

Твердотельная модель расчетной области представляет собой объем (параллелепипед), где имеется отверстие для подачи воды (диаметр 1,3 мм). С торца объема подается набегающий поток воздуха (рис. 1). Расчетная сетка была создана с учетом локальной адаптации с висящими узлами с помощью средств ANSYS ICEM CFD². Применение данного алгоритма позволяет получить удовлетворительную точность определения границ жидкой пленки и размеров, получаемых при ее дроблении на капли. На основе предварительных вариантов расчета [9] для дальнейших вычислительных экспериментов была выбрана регулярная гексаэдрическая сетка. Она позволяет удовлетворительно разрешить границы раздела фаз и получить траекторию струи, наиболее приближенную к траектории по натурному эксперименту.

Рис. 1. Твердотельная и сеточная модели, граничные условия

² ANSYS ICEM CFD Theory Guide. ANSYS ICEM CFD release 15.0.

Для отработки инженерной методики распыла жидкой пленки и оценки влияния на ее характер и траекторию движения аэрогидродинамических характеристик были проведены вычислительные эксперименты с учетом следующих граничных условий.

План проведения вычислительных экспериментов заключался в варьировании граничных условий относительно скоростных потоков на входных границах подачи газа (воздуха) и потока жидкой колонны (воды). Скорость потока подачи воздуха $v_{\text{возд}}$ (на границе Inlet) варьировалась от 110 до 140 м/с. Скорость подачи воды $v_{\text{воды}}$ (на границе Inlet) варьировалась от 5 до 20 м/с. За основу, согласно ранее проведенным аналитическим и экспериментальным расчетам, были взяты варианты граничных условий для скорости воды 10,83 м/с и для скорости воздушного потока 120,4 м/с [5–9].

На выходной границе (Outlet) реализуется условие свободного выхода в окружающую среду с нормальными условиями. Стенка расчетной области непроницаемая, гладкая, нетеплопроводная. Коэффициент поверхностного натяжения $\sigma = 0,07$ Н/м, соотношение импульсов потоков $q = 6,6$.

Анализ результатов вычислительных экспериментов

На рис. 2 и 3 представлены результаты вычислительных экспериментов при варьировании скорости подачи струи воды (при этом скорость воздушного потока не изменялась и равна базовому значению 120,4 м/с.) Приведены поля распределения объемной доли жидкости в различных сечениях и плоскостях визуализаций. Базовым (эталонным) является решение для варианта 2, для него имеется аналитическое решение [5–9]. Соотношение импульсов потоков и число Вебера представлены в табл. 1.

Таблица 1

Соотношение импульсов потоков и число Вебера действующих потоков
(при $v_{\text{возд}} = 120,4$ м/с)

Параметр	Вариант			
	1	2	3	4
Соотношение импульсов потоков q	1,4	6,6	12,7	22,5
Число Вебера для набегающего потока	330	330	330	330
Число Вебера для струи жидкости	464	2178	4179	7429

Рис. 2. Изоповерхность объемной доли жидкости 0,5 (вид сбоку): *a* – вариант 1 – $V_{\text{воды}} = 5$ м/с; *б* – вариант 2 – $V_{\text{воды}} = 10,83$ м/с; *в* – вариант 3 – $V_{\text{воды}} = 15$ м/с; *г* – вариант 4 – $V_{\text{воды}} = 20$ м/с

Рис. 3. Изоповерхность объемной доли жидкости 0,5 (вид со стороны воздушного потока): *a* – вариант 1 – $v_{\text{воды}} = 5$ м/с; *б* – вариант 2 – $v_{\text{воды}} = 10,83$ м/с; *в* – вариант 3 – $v_{\text{воды}} = 15$ м/с; *г* – вариант 4 – $v_{\text{воды}} = 20$ м/с

На рис. 4 и 5 представлены результаты вычислительных экспериментов при варьировании скорости подачи воздушного потока (при этом скорость воды не изменялась и равна 10,83 м/с). Приведены поля распределения объемной доли жидкости в различных сечениях и плоскостях визуализаций. Базовым (эталонным) является решение для варианта 6, для него имеется аналитическое решение [5-9]. Соотношение импульсов потоков и число Вебера представлены в табл. 2.

Таблица 2

Соотношение импульсов потоков и число Вебера
действующих потоков (при $v_{\text{воды}} = 10,83$ м/с)

Параметр	Вариант			
	5	6	7	8
Соотношение импульсов потоков q	7,9	6,6	5,7	4,9
Число Вебера для набегающего потока	275	330	385	446
Число Вебера для струи жидкости	2178	2178	2178	2178

При изменении скоростей подачи жидкости и воздушного потока заметно меняется траектория струи, распределение капель при распыле по количеству и пространству. На траекторию струи и характер распределения капель жидкости влияет значение соотношения импульсов взаимодействующих потоков.

Анализ полученных результатов (см. рис. 2, 3) позволяет отметить следующее. Соотношение импульсов водной струи и набегающего потока воздуха имеет значительное влияние на характер распыла жидкости, на дальнейшее формирование капель и их траектории полета. С изменением числа Вебера для струи жидкости, при его значительном увеличении или уменьшении, происходит качественное изменение траектории струи жидкости. При этом изменяется размер капель, их количество и область распространения. Но форма струи сохраняется, явные срывы струи отсутствуют. Исключение составляют результаты, полученные для варианта 1. При низкой скорости потока жидкости (при малых значениях числа Вебера) струя воды смазывается под действием набегающего потока воздуха и не имеет развитую траекторию движения (как у базового варианта 2). Для больших значений скоростей и чисел Вебера струя воды имеет характерную траекторию, однако при этом количество капель и области их распространения значительно уменьшаются. Анализ полученных результатов (рис. 4, 5) позволяет

Рис. 4. Исоповерхность объемной доли жидкости 0,5 (вид сбоку): *a* – вариант 5 – $v_{\text{возд}} = 110$ м/с; *б* – вариант 6 – $v_{\text{возд}} = 120,4$ м/с; *в* – вариант 7 – $v_{\text{возд}} = 130$ м/с; *г* – вариант 8 – $v_{\text{возд}} = 140$ м/с

Рис. 5. Исоповерхность объемной доли жидкости 0,5 (вид со стороны воздушного потока): *a* – вариант 5 – $V_{\text{возд}} = 110$ м/с; *б* – вариант 6 – $V_{\text{возд}} = 120,4$ м/с; *в* – вариант 7 – $V_{\text{возд}} = 130$ м/с; *г* – вариант 8 – $V_{\text{возд}} = 140$ м/с

отметить следующее. Для вариантов 5, 7, 8 (отличных от базового варианта 6) наблюдается характерный срыв струи жидкости под действием набегающего потока, формирование более крупных капель и «размазанный» профиль струи у ее основания.

Сравнение результатов вычислительных экспериментов с эталонными вариантами 2 и 6 соответственно показало, что изменение соотношения импульсов потоков выше значения 6,6 приводит к изменению характера распыла жидкости в объеме, наблюдается характерный срыв струи и менее качественное распределение капель жидкости по пространству, что необходимо учитывать при моделировании работы пневматических форсунок энергетических установок и газотурбинных двигателей.

При проведении вычислительных экспериментов использовались мощности Центра высокопроизводительных вычислительных систем Пермского национального исследовательского политехнического университета. Характеристики кластера: 88 вычислительных узлов; 128 четырехъядерных процессоров Barcelona-3 (всего 512 ядер); 48 восьмиядерных процессоров Intel Xeon E5-2680 (всего 384 ядра); пиковая производительность 20 Тфлопс; производительность в тестовом пакете Linpack 78 %; объем системы хранения информации 12 Тбайт; объем памяти 2816 Гбайт (32 Гбайт/узел).

Заключение

Проведено вычислительное моделирование вдува струи жидкости в воздушный поток при различных граничных условиях, описывающих подачу газовой смеси (воздух) и жидкого потока (топливо) при работе пневматической форсунки.

При изменении скоростей подачи топлива и воздушной смеси заметно меняется траектория струи, распределение капель при распыле по количеству и пространству. На траекторию струи и характер распределения капель жидкости влияет значение соотношения импульсов взаимодействующих потоков.

При постоянном значении скорости воздушного потока (при изменении скорости воды) уменьшение соотношения импульсов потоков (по сравнению с базовым значением 6,6) более чем в 4,7 раза или увеличение более чем 3,4 раза приводит к значительному изменению профиля (траектории) струи, к изменению количества и качества распределения капель жидкости.

Для наилучшего распределения необходимо соблюдать соотношение импульсов потоков в пределах близких к базовому значению 6,6 при постоянном значении скорости жидкости (при изменении скорости потока воздуха). При большем отклонении наблюдается характерный срыв струи и менее качественное распределение капель жидкости по пространству.

Библиографический список

1. Menard T., Tanguy S., Berlemont A. Coupling level set/VOF/ghost fluid methods: Validation and application to 3d simulation of primary break-up of a liquid jet // *International Journal of Multiphase Flow*. – 2007. – Vol. 33, № 5. – P. 510–524.
2. Movassat M., Maftoon N., Dolatabadi A. A three-dimensional numerical study of the breakup length of liquid sheets // *ILASS Americas, 21th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Orlando, May 18–21, 2008*. – URL: <http://www.lass.org/recent/conferencepapers/Paper%20T2-A-2.pdf> (дата обращения: 27.03.2016).
3. Scardovelli R., Zaleski S. Direct numerical simulation of free-surface and interfacial flow // *Annual Review of Fluid Mechanics*. – 1999. – Vol. 31. – P. 567–603.
4. Lefebvre H.A., Dilip R.B. Gas turbine combustion: alternative fuels and emissions. – Third ed. – New York: CRC Press, Taylor and Francis Group, 2010. – 558 p.
5. Brown C.T., McDonell V.G. Near field behavior of a liquid jet in a crossflow // *19th Annual ILASS-Americas Conference Institute for Liquid Atomization and Spray Systems, Toronto, May 23–26, 2006*. – URL: <http://www.lass.org/2006/May24.htm> (дата обращения: 27.03.2016).
6. Wu P.K., Miranda R.F., Faeth G.M. Effect of initial inflow conditions on primary break-up of nonturbulent and turbulent jets // *Atomization and Sprays*. – 1995. – Vol. 5. – P. 175–196.
7. Wu P.K., Kirkendall K.A., Fuller R.P. Break-up processes of liquid jets in subsonic crossflows // *Journal of Propulsion and Power*. – 1997. – Vol. 13, № 1. – P. 64–73.
8. Spray structures of liquid jets atomized in subsonic cross flows / P.K. Wu, K.A. Kirkendall, R.P. Fuller, A.S. Nejad // *Journal of Propulsion and Power*. – 1998. – Vol. 14, № 2. – P. 173–182.

9. Моделирование процесса распыла с использованием адаптивных сеточных моделей / А.М. Сипатов, С.А. Карабасов, Л.Ю. Гомзииков, Т.В. Абрамчук, Г.Н. Семаков // Вычислительная механика сплошных сред. – 2015. – Т. 8, № 1. – С. 93–101.

10. Brackbill J.U., Kothe D.B., Zemach C.A. Continuum method for modeling surface tension // J. Comput. Phys. – 1992. – Vol. 100, № 2. – P. 335–354.

References

1. Menard T., Tanguy S., Berlemont A. Coupling level set/VOF/ghost fluid methods: Validation and application to 3d simulation of primary break-up of a liquid jet. *International Journal of Multiphase Flow*. 2007, vol. 33, no. 5, pp. 510-524.

2. Movassat M., Maftoon N., Dolatabadi A. A three-dimensional numerical study of the breakup length of liquid sheets. *ILASS Americas, 21th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, Orlando, May 18-21, 2008, available at: <http://www.iclass.org/recent/conferencepapers/Paper%20T2-A-2.pdf> (accessed 27 March 2016).

3. Scardovelli R., Zaleski S. Direct numerical simulation of free-surface and interfacial flow. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1999, vol. 31, pp. 567-603.

4. Lefebvre H.A., Dilip R.B. Gas turbine combustion: alternative fuels and emissions. Third ed. New York: CRC Press, Taylor and Francis Group, 2010. 558 p.

5. Brown C.T., McDonell V.G. Near field behavior of a liquid jet in a crossflow. *19th Annual ILASS-Americas Conference Institute for Liquid Atomization and Spray Systems*, Toronto, May 23-26, 2006, available at: <http://www.iclass.org/2006/May24.htm> (accessed 27 March 2016).

6. Wu P.K., Miranda R.F., Faeth G.M. Effect of initial inflow conditions on primary break-up of nonturbulent and turbulent jets. *Atomization and Sprays*, 1995, vol. 5, pp. 175-196.

7. Wu P.K., Kirkendall K.A., Fuller R.P. Break-up processes of liquid jets in subsonic crossflows. *Journal of Propulsion and Power*, 1997, vol. 13, no. 1, pp. 64-73.

8. Wu P.K., Kirkendall K.A., Fuller R.P., Nejad A.S. Spray structures of liquid jets atomized in subsonic cross flows. *Journal of Propulsion and Power*, 1998, vol. 14, no. 2, pp. 173-182.

9. Sipatov A.M., Karabasov S.A., Gomzikov L.Yu., Abramchuk T.V., Semakov G.N. Modelirovanie protsessa raspyla s ispolzovaniem adaptivnykh setochnykh modeley [Atomization modeling using adaptive mesh refinement]. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred*, 2015, vol. 8, no. 1, pp. 93-101.

10. Brackbill J.U., Kothe D.B., Zemach C.A. Continuum method for modeling surface tension. *J. Comput. Phys*, 1992, vol. 100, no. 2, pp. 335-354.

Об авторах

Сипатов Алексей Матвеевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Авиационные двигатели» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: sipatov@avid.ru).

Модорский Владимир Яковлевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Механика композиционных материалов и конструкций» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: modorsky@pstu.ru).

Бабушкина Анна Викторовна (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика композиционных материалов и конструкций» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: annvikoz@mail.ru).

About the authors

Aleksey M. Sipatov (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Aircraft Engines, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: sipatov@avid.ru).

Vladimir Ya. Modorsky (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Mechanics of Composite Materials and Structures, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: modorsky@pstu.ru).

Anna V. Babushkina (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Mechanics of Composite Materials and Structures, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: annvikoz@mail.ru).

Получено 04.05.2016