

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ И РАСПАДА ТОПЛИВНОЙ ПЛЕНКИ, СОЗДАВАЕМОЙ ФОРСУНКОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ*

К.Г. Костарев, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

В.Г. Баталов, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

А.И. Мизев, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

А.Н. Сухановский, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

А.В. Шмыров, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

Представлены результаты экспериментального исследования распыла модельной жидкости форсункой авиационного двигателя с целью оптимизации ее работы. В частности, с помощью оптических методов изучены процессы формирования и последующего распада жидкой пленки на отдельные капли, выяснены причины возникновения ряда неустойчивостей формы пленки, приводящих к ее преждевременному и несимметричному разрушению, определено влияние числа инжекторов распылителя, степени смачивания материала форсунки, давления жидкости в магистрали форсунки, а также интенсивности ее внешнего обдува.

Ключевые слова: пневматическая форсунка, распад жидкой пленки, поверхностное натяжение, распределение капель в факеле распыла пленки, оптические методы, высокоскоростная видеосъемка, метод двух бликов.

Несмотря на возрастающие возможности математического и компьютерного моделирования процессов формирования и распыла жидкой пленки, натурный эксперимент остается основным путем повышения эффективности работы форсунок. В свою очередь, современное развитие эксперимента предполагает одновременное изучение как пленки жидкости, так и пространственно-дисперсионного распределения капель с целью выяснения взаимосвязи их характеристик, а также их связи с геометрическими параметрами форсунки и режимами подачи жидкости. В рамках этого подхода разработан и изготовлен ла-

бораторный стенд для изучения факела распыла жидкости центробежными и пневматическими форсунками.

Гидравлическая часть стенда включала систему подачи жидкости при постоянном давлении до 10 атм, оснащенную датчиками статического и динамического давления с регистрацией данных на ПК. Во избежание несимметричности факела в поле тяжести форсунка зафиксирована в вертикальном положении (ось симметрии форсунки расположена вертикально, направление распыла – вниз). Для изучения возможной ассиметрии характеристик факела использовано специальное крепление фор-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Пермского края (грант № 13-01-96015) и Программы ОФИ УрО РАН (проект № 13-1-005-АВД).

сунки для ее контролируемого поворота относительно измерительной аппаратуры.

Измерительная часть стенда включала в себя систему Particles Image Velocimetry (PIV) и комплект цифровых видеокамер с высоким пространственным и временным разрешением, позволявших проводить совместное изучение рельефа пленки жидкости и пространственного распределения возникающих в результате разрыва пленки капель по размерам в различных азимутальных и радиальных сечениях факела распыла. Для организации съемки выбранной области факела использована система точного позиционирования. Измерение полей скорости капель в факеле распыла производилось системой PIV «Полис» (ИТФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия). Комплект камер и сменной оптики позволял исследовать распределение скорости капель на разных пространственных масштабах задачи (рис. 1, а). Для изучения дисперсного состава капель выбран модифицированный метод двух бликов, который за счет регистрации двух последовательных кадров существенно увеличивал эффективность процесса идентификации капель в случае их большой пространственной концентрации. Использование скоростной камеры позволяло исследовать форму жидкой пленки вплоть до ее распада, включая определение пространственно-временных характеристик волн, возникающих на поверхности пленки при различных режимах работы форсунки (рис. 1, б).

Все опыты выполнены с использованием пневматических форсунок, предоставленных ОАО «Авиадвигатель» (г. Пермь). В качестве рабочих жидкостей выбраны вода, как наиболее часто используемая жидкость для моделирования распыла авиационного керосина, и водные растворы этилового спирта – как жидкости, наиболее близкие к нему по ряду физико-химических свойств. Основные серии опытов проведены для трех режимов работы форсунок: (I и II) – при давлениях $P = 6,4$ атм и $P_0 = 10$ атм в системе подачи рабочей жидкости и без внешнего обдува (аналог центробежной форсунки); (III) – при $P_0 = 10$ атм и внешнем обдуве (штатный режим форсунки). Для указанных режимов выяснен рельеф пленки распыляемой жидкости и прослежена его эволюция, определены такие характеристики факела распыла, как поля скоростей возникающих капель, их средний и заутеровский диаметры, распределения числа капель и относительного объема переносимой жидкости по размеру капель. Последняя характеристика, предложенная в ходе выполнения проекта, оказалась наиболее информативной при выяснении особенностей различных режимов работы форсунок.

При исследовании первого режима работы форсунки с двумя диаметрально расположенными инжекторами обнаружена явная асимметрия пленки распыляемой жидкости (рис. 2, а). Из-за эллиптического вида пленки изучение ее рельефа и распределения капель выполнено по четырем ор-

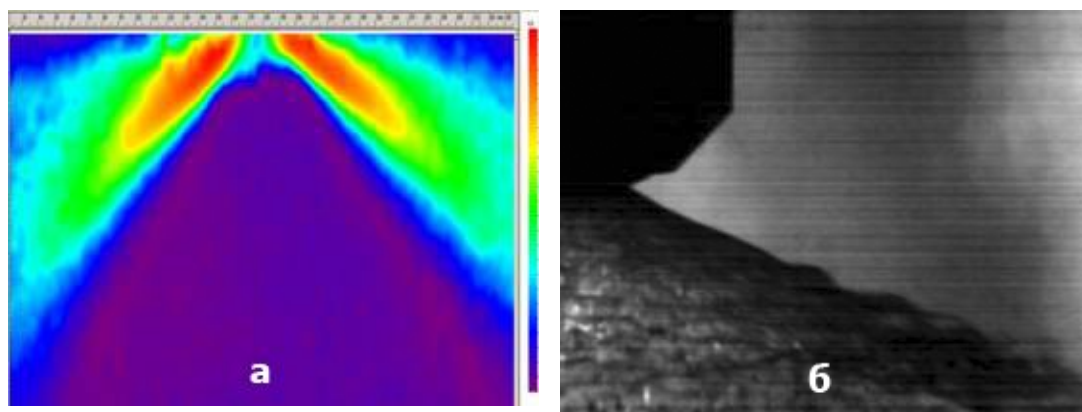


Рис. 1. Поле скорости в факеле распыла дистиллята; $P_0 = 10$ атм, без внешнего обдува (а); вид жидкой пленки сбоку вблизи торца распылителя (б)

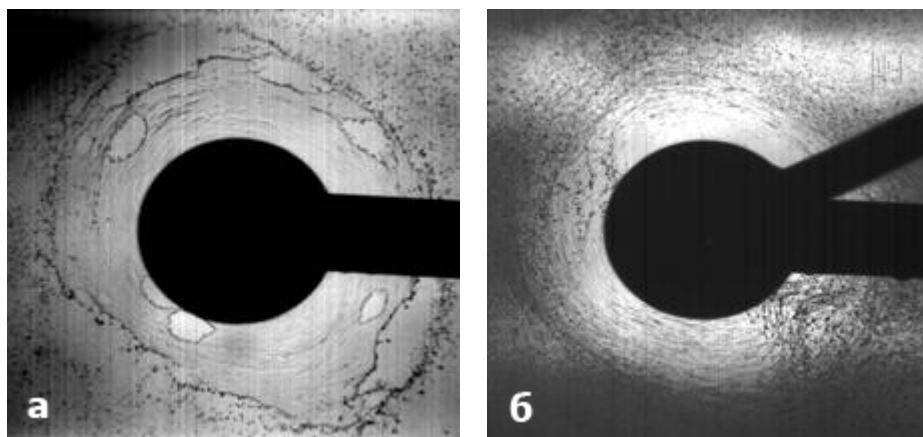


Рис. 2. Вид сверху на форсунку с распыляемой пленкой дистиллированной воды: а – отдельный кадр, б – результат суммирования 115 кадров. Хорошо видны два направления преимущественного формирования досрочных разрывов пленки. Давление 4 атм, частота съемки 500 кадров/с

тогональным направлениям, совпадающим с большими и малыми полуосями эллипса. Поскольку мгновенное положение границы распада пленки все время менялось, то для определения формы пленки и направления полуосей эллипса использовано осредненное положение границы, получаемое суммированием большого (от 100 и выше) количества кадров (рис. 2, б). Установлено, что пространственная ориентация осей эллипса не зависит от давления в системе подачи жидкости (в использованном диапазоне от 4 до 10 атм) и связана с ориентацией инжекторных каналов распылителя. Отношение длин большой и малой полуосей поверхности пленки слабо увеличивается с ростом давления и достигает 15% при 10 атм. Отметим, что и средний диаметр капель в направлении большой полуоси также превосходит размер капель на малой полуоси на 15%.

Опыты данной серии продемонстрировали зависимость факела распыла от степени смачиваемости распылителя форсунки и его геометрии. Сравнение гистограмм показало, что при почти полном совпадении вида распределений числа капель по их размерам для воды и водных растворов спирта в последнем случае относительный объем переносимой жидкости возрастает с диаметром капель, в то время как для воды относительный объем практически не

зависит от размера капель.

При переходе ко второму режиму размер возникающих капель уменьшается, а их скорость резко вырастает. Последний эффект сводит на нет действие вариаций степени смачивания и геометрии торца распылителя. Вид распределений количества капель по их диаметру для воды и растворов спирта остается одинаковым (максимум в области капель минимально измеряемого размера), но распределения оказываются сдвинутыми как единое целое относительно друг друга на ~20%, при этом капли растворов оказываются крупнее (рис. 3, а). Аналогичный сдвиг становится характерным и для распределения относительного объема, в то время как сами распределения для воды и растворов приближаются друг к другу по внешнему виду (рис. 3, б).

Включение штатного режима работы форсунки приводит к дальнейшему уменьшению среднего размера капель. Рост скорости вызывает распад значительной части больших капель на мелкие (при достижении критического значения числа Вебера). В результате факел распыла приобретает вид двух вложенных друг в друга кольцевых конуса, дающих в вертикальном сечении систему двух симметричных «рукавов» (рис. 4). Внутренний «рукав» почти параллелен оси симметрии факела и состоит из мелких капель, увлекаемых

воздушным потоком. Внешний «рукав» направлен под значительным углом к оси факела и состоит из крупных капель. Относительно низкое поверхностное натяжение растворов спирта приводит к тому, что во внешнем «рукаве» преобладают капли среднего размера, а крупные встречаются в единичных экземплярах.

Как видно из приведенных результатов, совместное использование скоростной видеозаписи и восстановления распределений капель по размерам и скоростям позволяет существенно сократить время для получения данных, достаточ-

ных для анализа и оценки перспективности разрабатываемой форсунки. Установление факта, что больший относительный объем распыляемой жидкости переносят капли с диаметром выше среднего, приводит к выводу, что при проектировании форсунок и камер сгорания в расчетах времени и положения области максимального тепловыделения при сгорании топлива надо ориентироваться не на капли среднего или заутеровского размера, как предсказывает моделирование с водой, а на капли максимального размера.

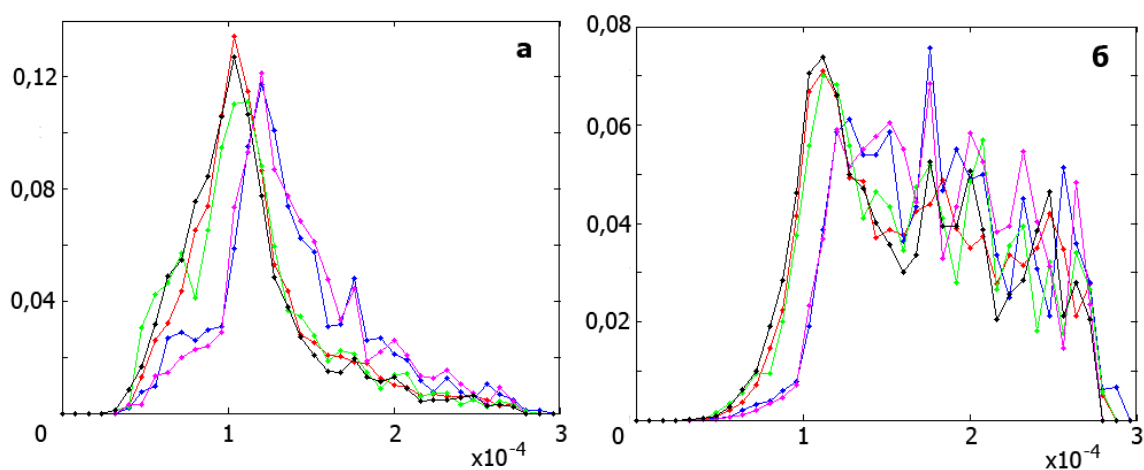


Рис. 3. Нормированные распределения количества капель (а) и относительного объема переносимой жидкости (б) по размерам капель. $P = 10$ атм, без внешнего обдува: красная линия (точки) – дистиллят, распылитель с гидрофобным покрытием, зеленая линия – дистиллят, распылитель без гидрофобного покрытия, черная линия – дистиллят, модификация кромки распылителя; синяя линия – 30% водный раствор спирта, распылитель с гидрофобным покрытием; розовая линия – 30% водный раствор спирта, распылитель без гидрофобного покрытия

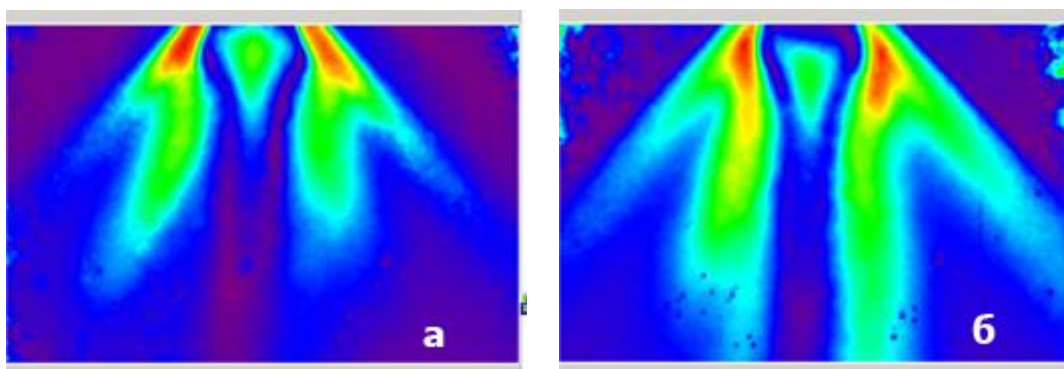


Рис. 4. Поле модуля скорости в факеле распыла (распылитель без гидрофобного покрытия): а – дистиллят, $P_0 = 10$ атм, внешний обдув $P = 0,08$ атм; б – водный раствор этилового спирта с $C = 30\%$, $P_0 = 10$ атм, внешний обдув $P = 0,08$ атм

Библиографический список

1. Баталов В.Г., Степанов Р.А., Сухановский А.Н. Применение прямых оптических методов измерений для исследования характеристик двухфазного потока // Труды МАИ. – 2014. – № 76.
2. Баталов В.Г., Костарев К.Г., Мизев А.И., Сухановский А.Н., Шмыров А.В. Стенд для исследования факела распыла пневматических и центробежных форсунок // Материалы X междунар. конф. по неравновесным процессам в соплах и струях, 25-31 мая 2014, Алушта. – М., 2014. – С. 26–28.
3. Баталов В.Г., Костарев К.Г., Мизев А.И., Сухановский А.Н., Шмыров А.В. Поверхностное натяжение и адекватность моделирования характеристик факела распыла авиационного топлива // Там же. – С. 23–26.
4. Batalov V., Stepanov R., Sukhanovskii A. Comparison of direct optical and IPI methods in real flow measurements // Proc. 26th European Conf. Liquid Atomization & Spray Systems, Bremen, Germany, 2014, Ed.: L. Achelis & U. Fritsching. Bremen, Germany, 2014. – P. 1–9.
5. Баталов В.Г., Костарев К.Г., Мизев А.И., Сухановский А.Н., Шмыров А.В. Оптимизация форсунки авиадвигателя: отработка методики оптических измерений характеристик факела распыла // Материалы XIX междунар. конф. по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2015), 24-31 мая 2015, г. Алушта. – М., 2015. – С. 566–568.

**HYDRODYNAMIC ASPECTS OF THE FORMATION AND DISINTEGRATION
PROCESSES OF FUEL FILM CREATED BY THE INJECTOR
OF THE COMBUSTION CHAMBER OF AN AIRCRAFT ENGINE**

K.G. Kostarev, V.G. Batalov, A.I. Mizev, AN. Sukhanovskii, A.V. Shmyrov

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS

The paper presents the results of an experimental study of a model liquid dispersion by the injector of an aircraft engine with the aim of improving its operation. Particular attention is focused on the processes of formation and subsequent disintegration of the liquid film into isolated droplets, which are investigated by optical techniques. The investigation conducted allowed us to determine the reasons for the onset of different types of instabilities of the film shape leading to its premature and asymmetric destruction and to assess the influence of such factors as the number of atomizer injectors, the degree of wetting the inner injector surface, the pressure of the liquid in the trunk of the injector and the intensity of its external air blowing.

Keywords: pneumatic nozzle, disintegration of the liquid film, surface tension, droplet distribution in the spray plume, optical methods of investigations, high-speed camera, the method of two reflected light glares.

Сведения об авторах

Костарев Константин Геннадьевич, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией гидродинамической устойчивости, Институт механики сплошных сред УрО РАН (ИМСС УрО РАН), 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1; e-mail: kostarev@icmm.ru

Баталов Владимир Геннадьевич, кандидат физико-математических наук, ведущий инженер лаборатории физической гидродинамики, ИМСС УрО РАН; e-mail: vbatalov@icmm.ru

Мизев Алексей Иванович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории гидродинамической устойчивости, ИМСС УрО РАН; e-mail: alex_mizev@icmm.ru

Сухановский Андрей Николаевич, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории физической гидродинамики, ИМСС УрО РАН; e-mail: san@icmm.ru

Шмыров Андрей Викторович, младший научный сотрудник лаборатории гидродинамической устойчивости, ИМСС УрО РАН; e-mail: shmyrov@icmm.ru

Материал поступил в редакцию 21.10.2016 г.