

ХАРАКТЕРИСТИКИ ФАКЕЛА РАСПЫЛИВАНИЯ ЗА ЦЕНТРОБЕЖНЫМИ ФОРСУНКАМИ ПРИ ПОВЫШЕННОМ ДАВЛЕНИИ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ

© 2016

А. А. Свириденков старший научный сотрудник, Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, г. Москва, sviriden@ciam.ru

В. В. Третьяков кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, г. Москва, tretjak@ciam.ru

Проведены численные расчёты факела распыливания за центробежной форсункой при различных давлениях в камере сгорания с использованием модели движения жидкой плёнки. В модели предполагается, что закрученное течение жидкости одномерно и стационарно. Жидкость считается несжимаемой с нулевым градиентом давления в направлении движения плёнки и в тангенциальном направлении. Влияние сил вязкости на движение жидкости пренебрегается, но учитывается вязкое взаимодействие на границе раздела газа и жидкости. Так как на практике толщина плёнки значительно меньше радиуса факела распыливания, то изменение скорости в окружном и нормальном направлении пренебрегается. Показано, что повышение давления в камере сгорания существенным образом изменяет характеристики факела распыливания по сравнению с наблюдаемыми при атмосферном давлении. Повышение давления увеличивает толщину плёнки топлива и уменьшает угол распыливания факела. Это приводит к увеличению среднего заутеровского диаметра в факеле распыленного топлива центробежной форсункой. Поток воздуха за завихрителем оказывает противоположное воздействие на размер капель при повышении давления в камере.

Камера сгорания; давление; центробежная форсунка; плёнка; распыливание.

Цитирование: Свириденков А.А., Третьяков В.В. Характеристики факела распыливания за центробежными форсунками при повышенном давлении в камере сгорания // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. Т. 15, № 4. С. 143-149. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-4-143-149

Введение

Топливные форсунки в двигателях работают при высоком давлении в камере сгорания. Большинство данных о факелах распыливания получено при атмосферном давлении. К сожалению, довольно трудно экстраполировать критерии распыления к условиям высокого противодавления. Выяснение различий между распыливанием при атмосферном давлении и при высоком противодавлении имеет важное как научное, так и практическое значение. Экспериментальные данные о факелах распыливания при высоком противодавлении весьма противоречивы. Проведённый в [1] анализ данных показал, что при распыливании пневматическими форсунками независимо от того, распыляется ли плёнка жидкости или струя, измеренные средние размеры капель SMD уменьшаются с увеличением противодавления. Для центробежных форсунок данные о размерах капель в факеле распыливания находятся в противоречии. Ряд авторов получили результаты, которые показали, что с увеличением воздушного противодавления (или плотности воздуха) SMD уменьшается. Однако авторы других работ пришли к заключению, что значения среднего диаметра увеличиваются при увеличении воздушного противодавления. Влияние высокого противодавления на характеристики факела при распыливании центробежными форсунками до сих пор не определено в полном объёме. Рассмотрим некоторые аспекты влияния большого давления в камере сгорания на размеры капель топлива, распылённого центробежными форсунками.

В [2] проведены расчёты коагуляции капель, образующихся за форсунками. Приведённые на рис.1 данные о влиянии давления окружающей среды на коагуляцию капель распылённого керосина показывают, что при изменении давления от 1 до 25 бар средний размер капель в результате коагуляции за время 0,01 с увеличивается приблизительно на 30%.

В [3] показано, что уменьшение угла распыливания топлива при одной и той же начальной концентрации капель и их размеров приводит к двойному эффекту. С одной стороны, коагуляция капель приводит к смещению максимума распределения концентрации топлива в сторону больших размеров, а с другой стороны, уменьшение угла раскрытия факела увеличивает значение численной концентрации топлива как в области больших капель, так и в области мелких капель.

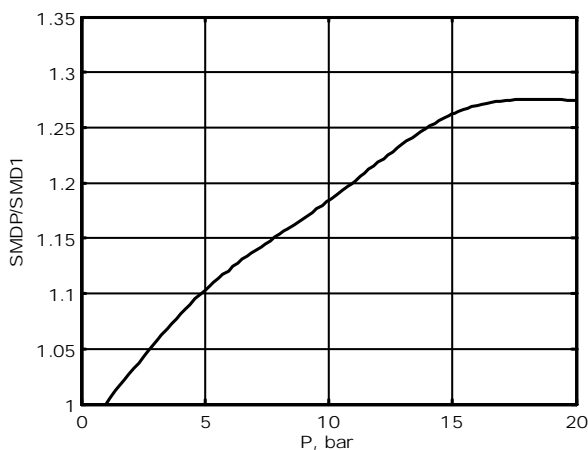


Рис. 1. Зависимость относительного размера капель в факеле распыливания от давления в камере сгорания

Исследование

Для исследования влияния давления на толщину плёнки и угол раскрытия факела распыливания за центробежной форсункой использовалась математическая модель движения плёнки в криволинейной системе координат, связанных с поверхностью плёнки [4; 5]. В модели предполагается, что закрученное течение жидкости одномерно и стационарно. Жидкость считается несжимаемой с нулевым градиентом давления в направлении движения плёнки и в тангенциальном направлении. Значения перепада давления в нормальном к поверхности плёнки направлении определяется из условия равновесия сил давления и поверхностного натяжения. Влияние сил вязкости на движение жидкости пренебрегается, но учитывается вязкое взаимодействие на границе раздела газа и жидкости. Так как на практике толщина плёнки значительно меньше радиуса факела распыливания, то изменением скорости в окружном и нормальном направлении можно пренебречь. При таких предположениях можно записать уравнения сохранения массы и импульса с учётом гравитации, в которых все переменные являются функцией одной координаты, отсчитываемой вдоль поверхности плёнки. Эти уравнения можно проинтегрировать и получить зависимости толщины и скорости плёнки, а также угла раскрытия факела как функции расстояния от центробежной форсунки.

Расчёты характеристик факела распыливания проведены для центробежной форсунки с внешним диаметром сопла 22 мм. Расход топлива составлял 17 г/с. Толщина плёнки топлива на выходе из сопла равнялась 0,260 мм, корневой угол факела распыливания составлял 147°. В качестве горючего рассматривалось биотопливо. Эти пара-

метры, используемые в качестве начальных данных для системы уравнений, описывающих движение плёнки, получены по теории центробежных форсунок [6].

На рис. 2 приведена динамика изменения толщины плёнки за центробежной форсункой при различных давлениях в камере сгорания.

Расчёты приведены для топливной плёнки, которая подавалась в неподвижный воздух барокамеры при различных давлениях окружающей среды. Как видно из графиков, при давлении 48 бар толщина плёнки в несколько раз больше, чем при атмосферном давлении, а следовательно и размеры капель при этих условиях будут увеличиваться.

В [7] показано, что при повышенном давлении окружающей среды перепад давления в направлении, нормальном по отношению к жидкой плёнке, вниз по течению от выхода сопла форсунки увеличивается. Это препятствует расширению жидкости в радиальном направлении и, следовательно, уменьшает угол факела распыливания.

Для центробежной форсунки с увеличением противодействия воздуха угол распыливания уменьшается (рис. 3) и капли концентрируются в меньшем пространстве. Это увеличивает вероятности соударения капель и их агломерации [3]. На рис. 3 тип линий соответствует величинам давлений на рис. 2.

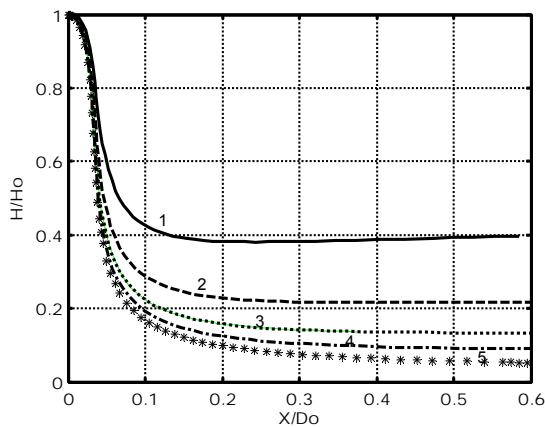


Рис. 2. Влияние противодействия в камере сгорания на изменение относительной толщины плёнки топлива в зависимости от расстояния до сопла форсунки:
 $P = 48$ бар – кривая 1, 24 – 2, 12 – 3, 6 – 4, 1 – 5

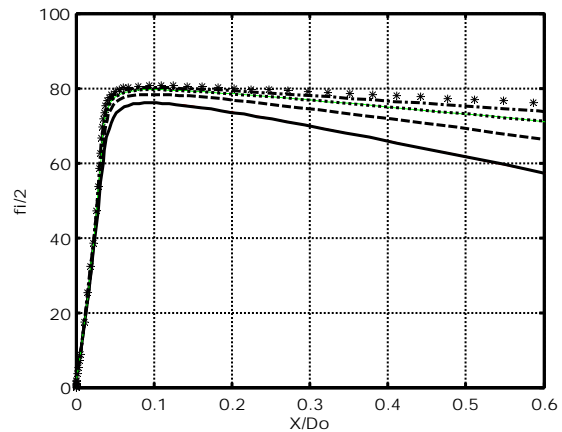


Рис. 3. Влияние противодействия в камере на изменение угла раскрытия факела топлива в зависимости от расстояния до сопла форсунки

На рис. 4, где представлено изменение угла факела распыливания на расстоянии $X / D_0 = 0,5$ от сопла форсунки, кривая * соответствует приведённым расчётам, прямая линия – интерполяционная зависимость $f_i / 2 = f_{i0} / 2 - 0,31P$. Отметим, что в [7] приведены результаты расчётов изменения угла распыливания в зависимости от давления для совершенно другой форсунки и там же проведено сравнение с экспериментальными данными, показавшее приемлемое совпадение расчётов и экспериментов. Несмотря на то, что расчёты проводились по другой модели, зависимость угла раскрытия факела от давления аналогична приведённой в данной работе.

Обычно плёнка топлива, образуемая в центробежной форсунке, попадает в поток воздуха за завихрителем. При этом радикальным образом меняется влияние давления на толщину плёнки топлива.

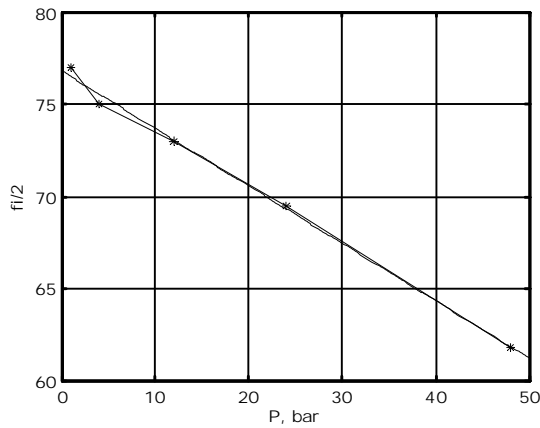


Рис. 4. Зависимость угла факела от давления в камере сгорания

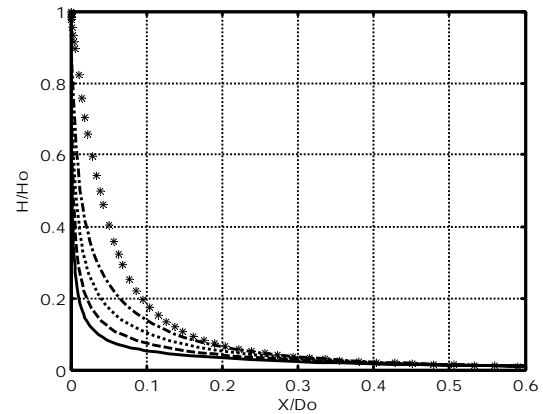


Рис. 5. Влияние противодействия в камере сгорания на изменение относительной толщины плёнки топлива при её движении в закрученном потоке воздуха в зависимости от расстояния от сопла форсунки

На рис. 5 приведены результаты расчётов при тех же условиях, что и на рис. 3, но при наличии потока воздуха за завихрителем (тип линий соответствует давлениям на рис. 2). Как видно из рисунка, на небольших расстояниях от форсунки происходит заметное уменьшение толщины плёнки. Это, в общем, очевидный факт, так как при повышении давления при постоянной скорости воздуха увеличивается аэродинамическое воздействие на плёнку жидкости.

Более интересным представляется влияние давления в камере на развитие факела распыливания при сохранении массового потока воздуха.

Результаты такого расчёта показаны на рис. 6. Отчётливо видно, что поток воздуха уменьшает расслоение кривых по сравнению с рис. 2 (отсутствие воздушного потока). Тем не менее, при больших давлениях на расстоянии $X / D_0 = 0,5$ толщина топливной плёнки больше. Однако вблизи сопла форсунки не наблюдается выраженной зависимости толщины плёнки от давления за исключением давления 48 бар (рис. 7).

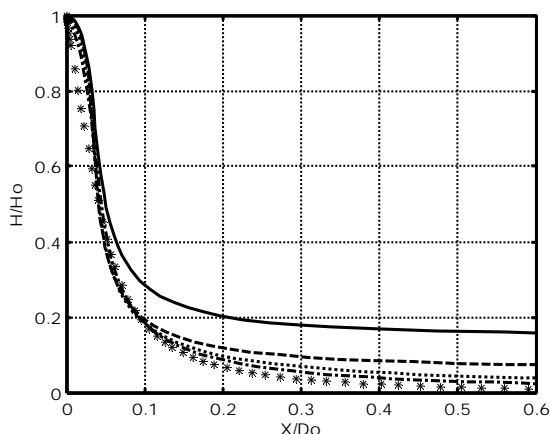


Рис. 6. Зависимость относительной толщины плёнки от давления при постоянном расходе воздуха

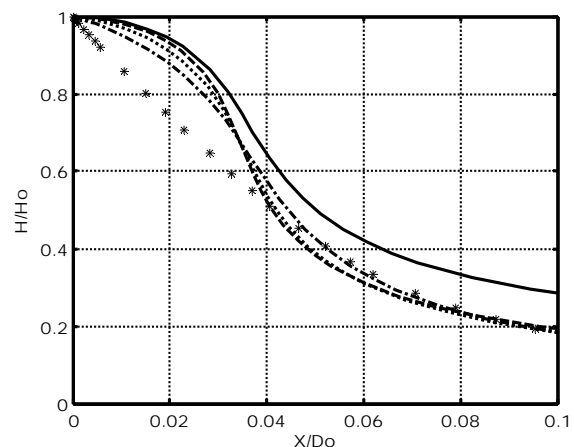


Рис. 7. Зависимость относительной толщины плёнки от давления при постоянном расходе воздуха

На расстоянии $X/D_0 > 0,04$ и $X/D_0 < 0,5$ толщина плёнки при повышенном давлении даже меньше, чем при атмосферном давлении. В непосредственной близости от форсунки наблюдается и немонотонная зависимость угла факела распыливания от давления в камере сгорания (рис. 8).

На рис. 9 представлено изменение угла факела распыливания на расстоянии $X/D_0 = 0,5$ от сопла форсунки. В отличие от результатов расчётов угла раскрытия факела при отсутствии распыляющего воздуха зависимость угла факела от давления описывается кривой, имеющей максимум вблизи давления 10 бар.

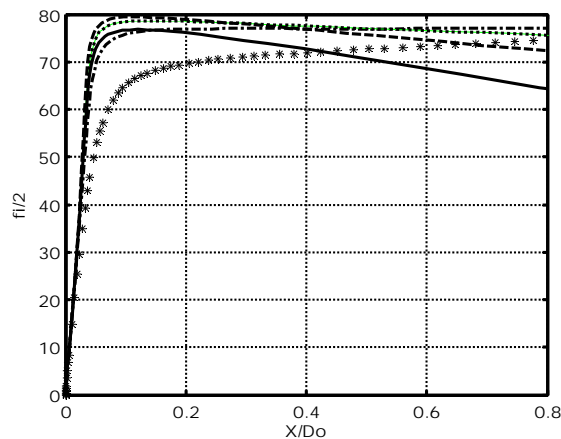


Рис. 8. Зависимость угла раскрытия факела распыливания от давления при постоянном расходе воздуха

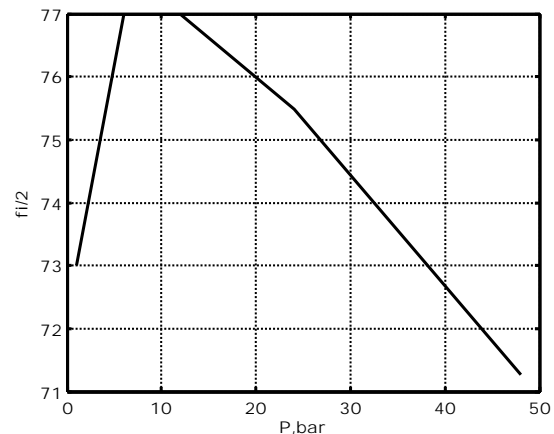


Рис. 9. Зависимость угла раскрытия факела топлива на расстоянии $X/D_0 = 0,5$ до форсунки от давления в камере сгорания при постоянном расходе топлива

Заключение

Проведённое исследование характеристик факела распыливания за центробежной форсункой показало, что толщина плёнки и угол факела распыливания, которые определяют размеры капель распылённого топлива, зависят от давления в камере сгорания. Эта зависимость является немонотонной и определяется параметрами течения жидкой плёнки и воздуха. На различных расстояниях от форсунки повышение давления может приводить как к увеличению размеров капель распылённого топлива, так и к их уменьшению. Этими факторами и объясняются противоречивые экспериментальные данные о влиянии давления на размеры капель, создаваемых центробежными форсунками.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проекты № 14-01-00325 и № 15-08-06293.

Библиографический список

1. Suo J., He L. Theoretical Study on the Spray Characteristics of Plain Jet Atomization Under High Back Pressure // 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. 2007. DOI: 10.2514/6.2007-5689
2. Свириденков А.А., Третьяков В.В. Влияние коагуляции капель на характеристики факела распыливания за форсунками // Вестник Самарского государственного

аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2009. № 3 (19), ч. 2. С. 157-161.

3. Свириденков А.А., Третьяков В.В. Моделирование коагуляции капель в закрученных нестационарных потоках применительно к камерам сгорания ГТД // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2013. № 3(41), ч. 1. С. 230-234.

4. Chuech S.G. Numerical Simulation of Nonswirling and Swirling Annular Liquid Jets // AIAA Journal. 1993. V. 31, Iss. 6. P. 1022-1027. DOI: 10.2514/3.11724

5. Васильев А.Ю., Майорова А.И., Свириденков А.А., Ягодкин В.И. Формирование жидкой пленки за форсункой и ее распад в газовой среде // Теплоэнергетика. 2010. № 2. С. 54-57.

6. Дитякин Ю.Ф., Клячко Л.А., Новиков Б.В., Ягодкин В.И. Распыливание жидкостей. М.: Машиностроение, 1977. 208 с.

7. Chen X., Yanga V. Effect of ambient pressure on liquid swirl injector flow dynamics // Physics of Fluids. 2014. V. 26, Iss. 10. DOI: 10.1063/1.4899261

CHARACTERISTICS OF A FUEL SPRAY DOWNSTREAM THE PRESSURE ATOMIZERS UNDER HIGH PRESSURE IN THE COMBUSTION CHAMBER

© 2016

A. A. Sviridenkov senior research scientist, Central Institute of Aviation Motors, Moscow, Russian Federation, sviriden@ciam.ru

V. V. Tretyakov Candidate of Science (Physics and Mathematics), Associate Professor, leading research scientist, Central Institute of Aviation Motors, Moscow, Russian Federation, tretjak@ciam.ru

The paper presents numerical calculations of a fuel spray downstream a swirl-type fuel injector carried out for various pressures in the combustion chamber using the model of liquid film motion. The effect of the chamber pressure, or, to be more exact, the air density in the pressure chamber on the fuel spray characteristics is investigated. The mathematical model was constructed on the assumption of one-dimensional and steady swirling flow. The liquid is considered to be incompressible and have zero pressure gradient in the direction of the film motion and in the tangential direction. The influence of viscous forces on the motion of liquid is neglected, but the viscous interaction at the interface between liquid and gas is taken into account. The change of velocity in the circumferential and normal directions can be neglected, because in practice the film thickness is considerably smaller than the spray radius. It is shown that the pressure increase in the combustion chamber makes spray characteristics significantly different from those observed at atmospheric pressure. An increase of pressure results in increasing the thickness of the fuel film and decreasing the spray-cone angle. It leads to an increase in the average Sauter diameter in the spray of fuel atomized by the pressure atomizer. The air flow downstream the swirl nozzle has the opposite influence on the size of drops in case of increased pressure in the chamber.

Combustion chamber; pressure; swirl atomizer; fuel film; spray.

Citation: Sviridenkov A.A., Tretyakov V.V. Characteristics of a fuel spray downstream the pressure atomizers under high pressure in the combustion chamber. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2016. V. 15, no. 4. P. 143-149. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-4-143-149

References

1. Suo J., He L. Theoretical Study on the Spray Characteristics of Plain Jet Atomization Under High Back Pressure. *43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*. 2007. DOI: 10.2514/6.2007-5689
2. Sviridenkov A.A., Tretiyakov V.V. Effect of coagulation of drops on fuel spray characteristics behind atomizers. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2009. No. 3 (19), part 2. P. 157-161. (In Russ.)
3. Sviridenkov A.A., Tretiyakov V.V. Simulation of drop coagulations in swirled time dependent streams with reference to gas turbine engine combustion chambers. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2013. No. 3 (41), part 1. P. 230-234. (In Russ.)
4. Chuech S.G. Numerical Simulation of Nonswirling and Swirling Annular Liquid Jets. *AIAA Journal*. 1993. V. 31, Iss. 6. P. 1022-1027. DOI: 10.2514/3.11724
5. Vasil'ev A.Yu., Maiorova A.I., Sviridenkov A.A., Yagodkin V.I. Formation of liquid film downstream of an atomizer and its disintegration in gaseous medium. *Thermal Engineering*. 2010. V. 57, Iss. 2. P. 151-154. DOI: 10.1134/s0040601510020114
6. Dityakin Yu.F., Klyachko L.A., Novikov B.V., Yagodkin V.I. *Raspylivanie zhidkostey* [Atomization of liquids]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1977. 208 p.
7. Chen X., Yanga V. Effect of ambient pressure on liquid swirl injector flow dynamics. *Physics of Fluids*. 2014. V. 26, Iss. 10. DOI: 10.1063/1.4899261