

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ТОПЛИВА ЗА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИМ СТАБИЛИЗАТОРОМ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ЕГО ВПРЫСКА

© 2018

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

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

Рассматриваются вопросы распыливания и распространения жидкого топлива в закрученном потоке за фронтальным газодинамическим стабилизатором, предназначенным для использования в камерах сгорания газотурбинных двигателей. Ставится задача сравнения распределений капельно-жидкого топлива в следе за стабилизатором при впрыске топлива с боковой и торцевой поверхностей рассматриваемого устройства. Показано, что расчёты, выполненные по стационарной модели, качественно отличаются от нестационарных в обоих вариантах топливоподачи. Вместе с тем, в первом приближении распределения капельно-жидкого топлива при его подаче с боковой и торцевой поверхностей стабилизатора являются близкими. Методом Shadowgraphy диагностики потоков капельно-воздушной среды проведено экспериментальное исследование характеристик факелов распыливания при подаче топлива под азимутальным углом 45° с боковой поверхности газодинамического стабилизатора. Показано, что вдув топлива под углом приводит к изменению распределения скоростей в следе за стабилизатором. При этом закрутка потока, противоположная направлению азимутальной подачи топлива, расширяет факел распыливания.

Камера сгорания; моделирование; распыливание; топливовоздушная смесь.

Цитирование: Третьяков В.В., Свириденков А.А. Сравнительный анализ распределений топлива за газодинамическим стабилизатором при различных способах его впрыска // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17, № 4. С. 155-164.
DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-4-155-164

Введение

Объектом исследования является газодинамический стабилизатор, предназначенный для работы в составе фронтального завихрительного устройства камер сгорания газотурбинных двигателей (ГТД). Идея использования таких стабилизаторов связана с возможностью управления рабочим процессом в камерах путём регулирования размеров зон обратных токов (ЗОТ) за стабилизатором в зависимости от режима работы камеры. Это регулирование осуществляется поперечной подачей воздушных струй в основной закрученный поток. На рис. 1 представлена схема модели фронтального стабилизатора, на рис. 2 – фотографии этой модели: рис. 2, *a* – стабилизатор в сборке с завихрителем; рис. 2, *b* – стабилизатор, установленный в рабочем отсеке для проведения экспериментальных исследований.

На представленной схеме основной воздушный поток поступает в рабочий объём камеры сгорания через осевой завихритель 1. Газодинамическая стабилизация осуществляется в зоне обратного тока за торцом стабилизатора, которая формируется взаимодействием закрученного потока воздуха, вытекающего из завихрителя, с воздушными струями, поступающими из центрального канала 4. Эти струи вдуваются в камеру сгорания перпендикулярно её оси через систему из шести отверстий.

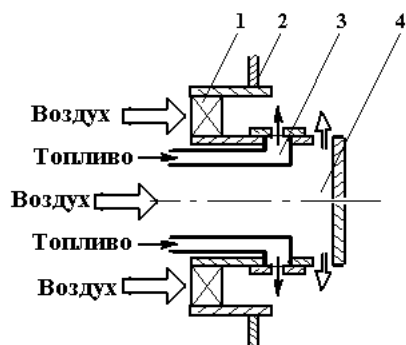


Рис. 1. Схема газодинамического стабилизатора с поперечной подачей топлива

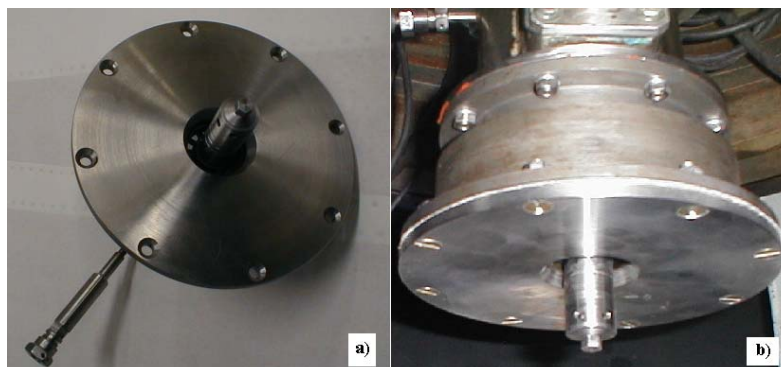


Рис. 2. Фотография стабилизатора

Подача топлива также осуществляется через систему из шести отверстий, находящихся на цилиндрической поверхности стабилизатора; топливо поступает по каналу подачи 3. Отверстия располагаются в непосредственной близости от фронтальной плиты 2 камеры сгорания перед отверстиями вдува воздуха.

В работах [1; 2] показано, что основными параметрами, определяющими гидродинамику течения и распределение топлива в рассматриваемом устройстве, являются закрутка основного воздушного потока:

$$S_w = U_\varphi / U_0$$

и интенсивность вдува поперечных воздушных струй:

$$V_j = U_r / U_0,$$

где U_0 – среднерасходная скорость течения через завихритель; U_r – скорость воздушных струй в канале подачи; U_φ – вращательный компонент скорости на входе в рабочий объем модели. Оказалось, что распределение топлива по поперечному сечению струи за завихрителем достаточно равномерное, при этом размеры капель в факеле составляют около 50 мкм, а средние размеры капель в выходной струе – 30...40 мкм. Последнее связано с процессом вторичного дробления капель. Расчёты показали, что в рассмотренном диапазоне изменения управляющих параметров наиболее приемлемой величиной закрутки является $S_w \approx 0,6$ (30°). При такой закрутке воздушного потока и изменении параметра интенсивности поперечной подачи воздуха через стабилизатор в диапазоне $V_j = 0,4 \div 1,2$ имеет место заметное влияние параметра V_j на структуру течения, а также на распределения концентраций капельно-жидкого и парообразного топлива в следе за стабилизатором. Расчёты двух вариантов: $S_w = 1,0$; $V_j = 1,0$ и $S_w = 0,6$; $V_j = 0,6$ показали, что их результаты с приемлемой для практики точностью согласуются с данными опытов и по профилям скорости воздушного потока, и по размерам образующихся в потоке капель, и по распределениям их концентраций [1; 2]. Отметим, что в этих работах рассматривалась радиальная подача топлива с боковой цилиндрической поверхности стабилизатора.

Постановка задачи

В данной работе рассматриваются два варианта впрыска топлива: с боковой и торцевой поверхностей стабилизатора. Ставится задача сравнения описанных способов топливоподачи в отношении распределения топлива в пространстве следа за стабилизатором. Проведённое исследование состоит из определения гидродинамической структуры течения, расчёта характеристик движения и распада подаваемых в воздушный поток струй и плёнок, анализа движения топливных капель в этом потоке и получения на этой основе распределений концентраций топливных капель в рабочем объёме модели. Работа носит расчётно-экспериментальный характер. При этом необходимо подчеркнуть, что в рассматриваемых случаях сравниваются по существу два различных механизма распыливания: с боковой поверхности стабилизатора топливо подаётся в виде отдельных струй, а с его торцевой поверхности (традиционный способ топливоподачи в камерах сгорания) – из центробежной форсунки в виде жидкой плёнки. На данном этапе исследования сравнение процессов смесеобразования проводится в упрощающем предположении об одинаковости дисперсных характеристик распыливания, т.е. считается, что распределения капель по размерам и среднезаулеровские диаметры капель в обоих случаях одинаковы. Поскольку экспериментальные исследования распределений топлива внутри камеры сгорания представляют собой чрезвычайно сложную задачу, то настоящее исследование ограничивается случаем истечения топливовоздушной смеси в открытое (затопленное) пространство. В качестве примера приводятся результаты расчётов для режима $S_w = 0,6$; $V_j = 0,6$. Для других режимов результаты сравнительного анализа качественно не отличаются от приведённых.

Результаты расчётного исследования полей скорости

Методика расчёта полей скорости воздушного потока связана с моделированием нестационарного характера течения воздуха и топливных капель. Это моделирование и соответствующие расчёты в данной работе проводятся по методике [2]. Рассматривается истечение воздуха из завихрителя в открытое пространство. На рис. 3, а – 3, в представлены примеры «мгновенных» распределений скорости воздушного потока, а на рис. 3, г – осреднённое распределение в продольном сечении стабилизатора для режима $S_w = 0,6$; $V_j = 0,6$. На рисунках и далее все линейные размеры отнесены к характерному размеру задачи ($H_0 = 10$ мм – внутренний радиус завихрителя), а скорости – к характерной скорости воздушного потока ($V_0 = 20$ м/с).

Соответствующие рис. 3 распределения компонентов скорости представлены на рис. 4.

Из рисунков видно, что осреднённые распределения скоростей могут существенно отличаться от «мгновенных». Вместе с тем оказалось, что осреднённая картина течения весьма близка к рассчитанной по стационарной модели.

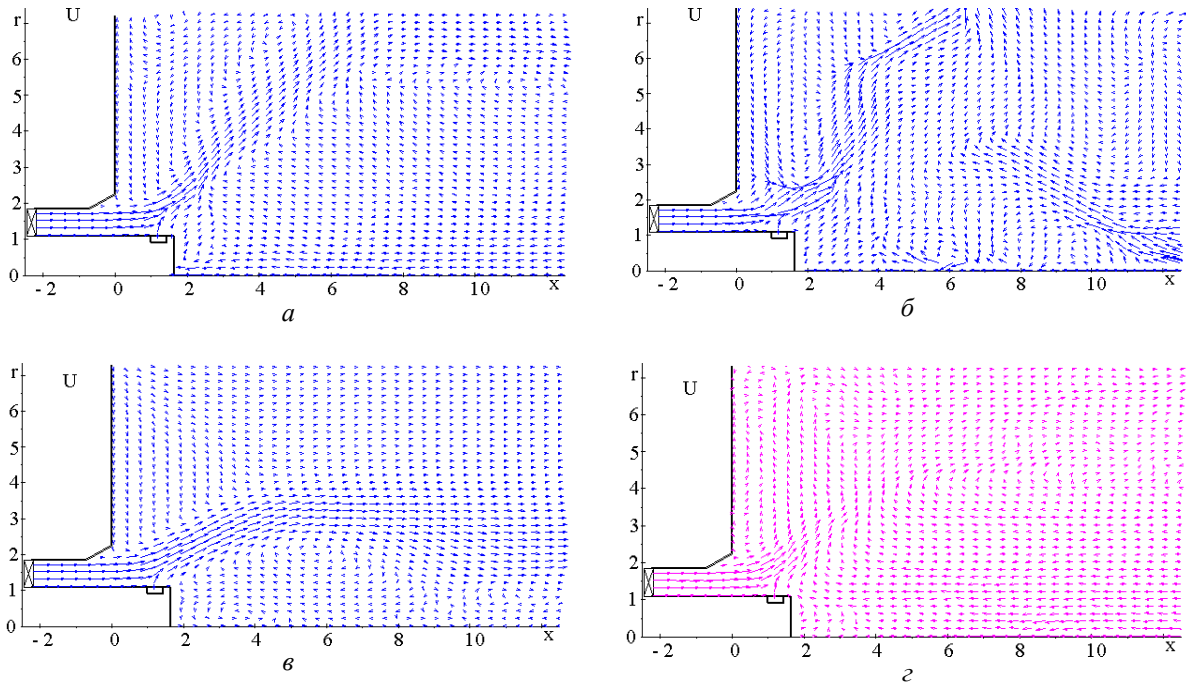


Рис. 3. Распределения скорости воздушного потока в продольном сечении стабилизатора:
а, б, в – «мгновенные», г – осреднённые распределения

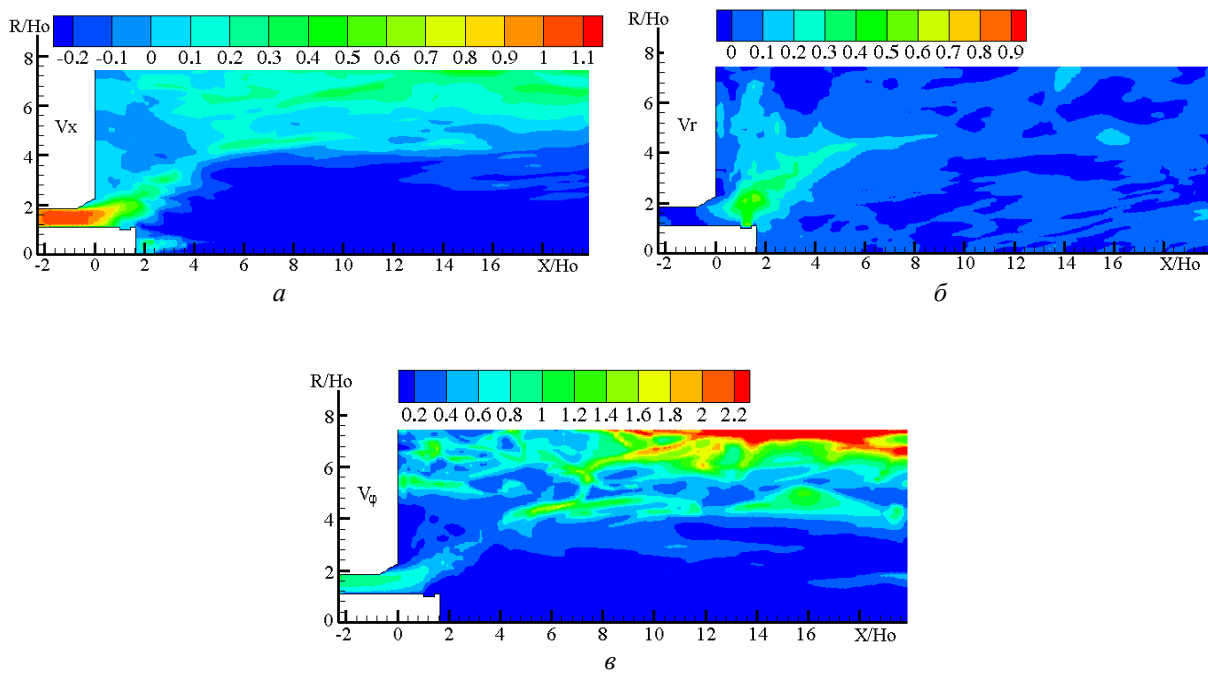


Рис. 4. Осреднённые распределения компонентов скорости в продольном сечении стабилизатора:
а – продольного V_x ; б – радиального V_r ; в – вращательного V_ϕ .
Режим $S_w = 0,6$; $V_j = 0,6$

Распад топливных струй и плёнок в воздушном потоке

Эксперименты показали, что во всех исследованных режимах работы завихрительного устройства факелы распыливания при истечении в открытое пространство являются существенно нестационарными. При этом топливная струя, попадающая в закрученный воздушный поток, совершает вращательно-колебательные движения с амплитудой пространственных колебаний примерно равной выходному сечению завихрителя. Частота и амплитуда этих колебаний достаточно высоки, и эти колебания могут наблюдаться только при импульсном освещении факела.

Измерения характеристик факела распыливания показали, что в результате взаимодействия топливных капель с закрученным воздушным потоком в устье потока размеры образующихся капель составляют от 30 до 100 мкм. При дальнейшем развитии течения происходит выравнивание концентрации топлива, но существенных уменьшений размеров капель не происходит. Отмеченные особенности поведения топливного факела с приемлемой для практики точностью описываются упрощённой моделью [3].

Согласно этой модели конфигурация жидкой струи, впрыскиваемой по нормали к оси стабилизатора, рассчитывается в предположении, что форма поперечного сечения струи остаётся постоянной вдоль направления её распространения и при этом силами поверхностного натяжения жидкости можно пренебречь по сравнению с аэродинамическими силами.

Результаты расчётов для струйной форсунки с диаметром выходного сопла 0,4 мм, выполненных в этих предположениях, показали, что распад топливной струи происходит на расстоянии X^* , равном $3 \div 4$ мм. При этом угол наклона струи к оси стабилизатора составляет $\psi_m \approx 30^\circ$. В целом распад струи качественно описывается кривой устойчивости, приведённой в [4]. Расчёты, выполненные по методике [3], показали, что в рассматриваемых случаях среднемедианный диаметр образующихся капель составляет $D_m \approx 50$ мкм.

На рис. 5 приведены результаты измерений размеров капель (D_{32}) на различных расстояниях от торца стабилизатора для 30° закрутки воздушного потока.

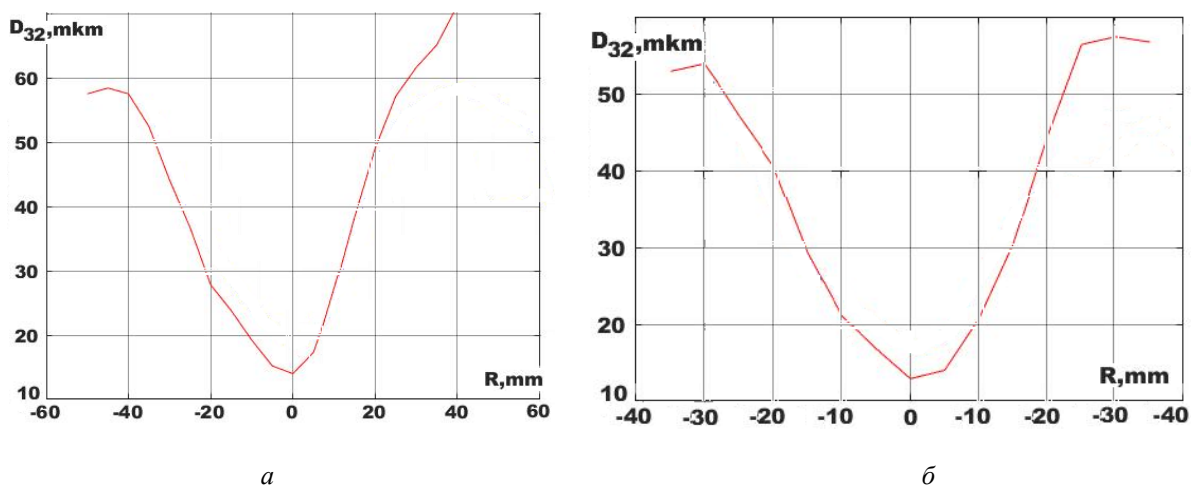


Рис. 5. Размеры капель D_{32} при 30° закрутке воздушного потока на расстояниях $X = 10$ мм (а) и $X = 30$ мм (б) от торца стабилизатора

Отметим, что наличие границ потока (стенок камеры сгорания) существенно меняет характер распространения струи и механизм её распада. При распаде струи внутри камеры она не совершает заметных колебаний, хотя на её поверхности и образуются волны, обусловленные неустойчивостью Релея. Эксперименты показали, что при истечении воздуха в свободное пространство воздушная струя совершает прецессионное движение, в то время как в камере сгорания прецессия потока является либо очень слабой, либо вообще отсутствует.

Расчёт распределения концентраций капельно-жидкого топлива

Методика расчётов полей концентраций капельно-жидкого топлива основана на моделях распада топливных струй и плёнок на капли, дробления капель в воздушном потоке и анализе движения отдельных капель. Предполагается, что начальное распределение капель по размерам подчиняется закону Розина-Раммлера с показателем $n = 3$: $\Omega = 1 - \exp\left[-(D/D_m)^n\right]$, а распределение капель в окружном (по углу φ) и продольном (по углу ψ) направлениях подчиняется нормальному закону. Здесь Ω – относительная доля капель, диаметр которых меньше D ; D_m – среднемедианный диаметр капель. Начальные скорости вылета капель V_0 задаются модулем скорости V_0 и значениями продольного и окружного углов: ψ_k и φ_k . Начальные координаты вылета капель определяются из решения задачи о распаде топливной струи, впрыскиваемой в воздушный поток; углы вылета – по экспериментальным данным распыливания в открытом пространстве; начальная температура капель принята равной 300 К. Среднемедианный диаметр капель в факеле распыливания D_m рассчитывается по методике [5], расход топлива G_T для исследованного режима принят равным $G_T = 2,5$ г/с. Топливо – керосин ТС-1. Результаты расчётов распределений топлива в целом соответствуют описанному в [2;3].

Расчёт смесеобразования при использовании стационарной и нестационарной моделей движения капель

Необходимо сравнение результатов расчётов распределения топлива в следе за газодинамическим стабилизатором при двух вариантах его подачи: с боковой поверхности стабилизатора и с его торцевой поверхности непосредственно в зону обратных токов. На настоящем этапе ограничимся разработкой методики этих расчётов, учитывающей нестационарный характер течения воздуха. Этот учёт производится следующим образом. Предполагается, что нестационарное движение воздушного потока связано с его неустойчивостью, приводящей при численных расчётах к полям скоростей, имеющих хаотичный характер. Пример таких распределений скоростей представлен на рис. 3. Считается, что подобные хаотичные поля представляют собой реальные «мгновенные» распределения. Осреднение по реализациям совокупности полученных на различных стадиях итерационного процесса «мгновенных» распределений скорости будем считать представляющими осреднённое поле течения (рис. 3, з). Результаты расчёта концентраций топлива в осреднённом поле течения будут представлять собой стационарное распределение концентраций. Методика учёта влияния нестационарности воздушного потока на движение топливных капель состоит в следующем. Вначале, как и в стационарном случае, рассчитываются «мгновенные» поля скоростей. В каждом из этих мгновенных полей рассчитываются траектории движения капель и определяются поля концентраций, условно называемые мгновенными полями концентраций. На по-

следнем этапе полученная совокупность мгновенных полей концентраций осредняется по реализациям и принимается в качестве осреднённого нестационарного поля концентраций. Отметим, что степень адекватности описанной методики расчёта полей скорости реальности установлена сравнением результатов расчётов и опытов в [2].

В данной работе при расчётах по описанной методике начальные координаты капель и их распределения по размерам берутся из результатов расчёта распада топливных струй и плёнок, а начальные скорости капель и углы их вылета – из анализа экспериментов по формированию топливных факелов.

На рис. 6 в качестве примера представлены распределения концентраций капельно-жидкого топлива, полученные в расчётах по стационарной модели для режима течения $S_w = 0,6$; $V_j = 0,6$.

Рис. 6, а соответствует подаче топлива с боковой поверхности стабилизатора, рис. 6, б – с его торцевой поверхности. Соответствующие распределения, полученные в расчётах по нестационарной модели, приведены на рис. 7.

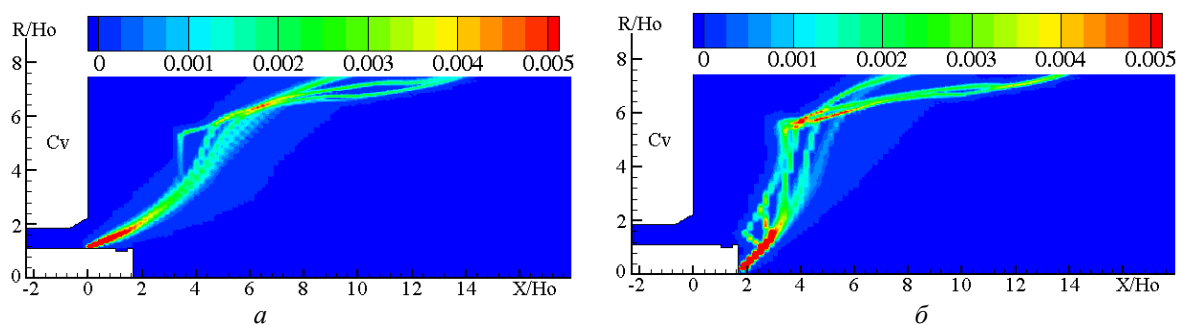


Рис. 6. Осреднённые распределения концентраций капельно-жидкого топлива в продольном сечении стабилизатора. Стационарная модель. Режим $S_w = 0,6$; $V_j = 0,6$.
Подача топлива: а – с боковой, б – с торцевой поверхности

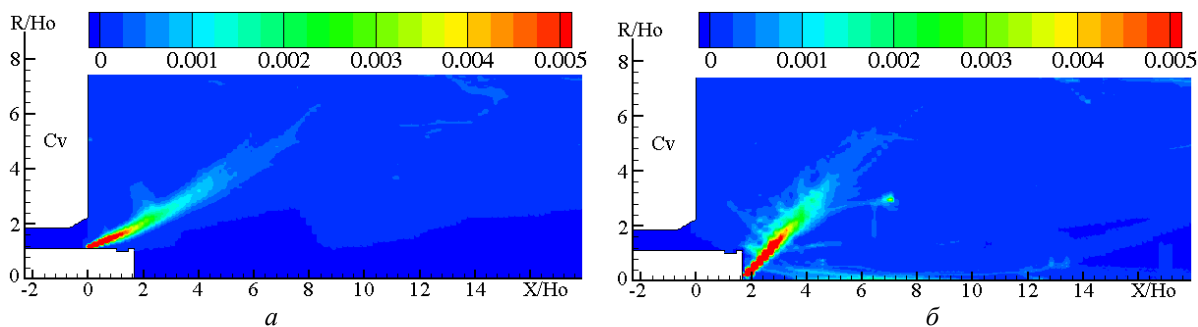


Рис. 7. Осреднённые распределения концентраций капельно-жидкого топлива в продольном сечении стабилизатора. Нестационарная модель. Режим $S_w = 0,6$; $V_j = 0,6$.
Подача топлива: а – с боковой, б – с торцевой поверхности

Сравнение результатов расчётов, выполненных по стационарной и нестационарной моделям, показывает, что полученные распределения концентраций различаются даже качественно. Стационарные расчёты указывают на существенную сепарацию капель на внешнюю границу течения. При нестационарном подходе топливо концентрируется в центральной области, причём в обоих рассматриваемых вариантах подачи топлива картины распределения концентраций капель оказываются похожими (рис. 7, а и 7, б). Из этих рисунков видно, что основная часть капельно-жидкого топлива нахо-

дится в пределах 40 мм радиального расстояния от оси стабилизатора и 50 мм от его торца вдоль продольной оси. Объёмная концентрация капель на этих расстояниях составляет $C_v = 3 \cdot 10^{-3}$.

Таким образом, в первом приближении можно считать, что оба варианта подачи топлива (с боковой и торцевой поверхностями стабилизатора) с точки зрения распределения концентраций топливных капель являются эквивалентными.

Заключение

Экспериментальное исследование характеристик факелов распыливания, проведённое современным методом Shadowgraphy диагностики потоков капельно-воздушной среды, при подаче топлива под углом 45° с боковой поверхности газодинамического стабилизатора показало следующее.

1. Вдвиг топлива под углом приводит к изменению распределения скоростей в следе за газодинамическим стабилизатором. Противоположная закрутка расширяет факел распыливания, что приводит к смещению основного расхода топлива к периферии факела и вызывает уменьшение продольного компонента скорости капель.

2. Распределения размеров капель по радиусу факела распыливания при подаче топлива вдоль и против направления воздушного потока и перпендикулярно к нему оказались близкими.

3. Основной процесс дробления капель осуществляется на расстояниях до 10 мм от торца стабилизатора. Максимальные размеры капель в факеле распыливания на этом расстоянии составляют приблизительно 80 мкм. Вниз по потоку происходит частичное вторичное дробление капель, и на периферии топливного факела размеры капель составляют около 60 мкм.

Решена задача о распределении капельно-жидкого топлива в следе за газодинамическим стабилизатором для режима течения $S_w = 0,6$; $V_j = 0,6$ при подаче топлива с боковой и торцевой поверхностей стабилизатора.

Показано, что расчёты, выполненные по стационарной модели, качественно отличаются от нестационарных.

В первом приближении оба варианта подачи топлива (с боковой и торцевой поверхностями стабилизатора) с точки зрения распределения топлива являются эквивалентными.

Расчёты, проведённые по нестационарной модели, показали, что основная часть капельно-жидкого топлива находится в пределах 40 мм радиального расстояния от оси стабилизатора и 50 мм – от его торца вдоль продольной оси в обоих вариантах топливоподачи. Объёмная концентрация капель на этих расстояниях составляет приблизительно $C_v = 3 \cdot 10^{-3}$.

Работа поддержана РФФИ. Проект № 17-01-00213.

Библиографический список

1. Третьяков В.В., Свириденков А.А., Токталиев П.Д. Распыливание топлива и смесеобразование в нестационарных закрученных течениях за газодинамическим стабилизатором // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2017. № 3. С. 106-112.

2. Свириденков А.А., Токталиев П.Д., Третьяков В.В. Моделирование распыливания и распределения капельно-жидкого топлива в нестационарных закрученных потоках в камере сгорания и открытом пространстве // Сборник докладов Шестой всероссийской конференции с международным участием «Теплообмен и гидродинамика в закрученных потоках» (21-23 ноября 2017 г., Новосибирск). Новосибирск: ИТ СО РАН, 2017. С. 86.

3. Свириденков А.А., Третьяков В.В. Модель движения и распада плёнки топлива за форсункой в воздушном потоке // Материалы VI Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики «АНТЭ-2011» (12-14 октября 2011 г., Казань). Т. 1. Казань: Казанский государственный технический университет, 2011. С. 242-248.

4. Ashgriz N. Handbook of Atomization and Sprays. Theory and Applications. Springer, 2011. 951 с.

5. Третьяков В.В. Расчёт распределения капельно-жидкого и парообразного топлива в трёхъярусном модуле камеры сгорания // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва. 2006. № 2 (10), ч. 2. С. 136-142.

COMPARATIVE ANALYSIS OF FUEL DISTRIBUTION DOWNSTREAM OF THE GAS-DYNAMIC FLAME HOLDER WITH VARIOUS METHODS OF INJECTION

©2018

V. V. Tretyakov Candidate of Science (Phys. & Math.), Associate Professor,
Leading Research Associate;
Central Institute of Aviation Motors, Moscow, Russian Federation;
tretjak@ciam.ru

A. A. Sviridenkov Senior Research Associate;
Central Institute of Aviation Motors, Moscow, Russian Federation;
sviriden@ciam.ru

The article deals with the problems of atomization and distribution of liquid fuel in a swirling flow downstream of the front-end gas-dynamic stabilizer designed for the use in gas turbine engine combustion chambers. The task is to compare the distributions of droplet-liquid fuel in the wake of the stabilizer when the fuel is injected from the side and end surfaces of the device in question. It is shown that the calculations performed according to a stationary model are qualitatively different from the non-stationary ones in both fuel supply options. However, in the first approximation, the distributions of liquid droplet fuel fed from the side and end surfaces of the stabilizer are similar. An experimental study of the spray characteristics was conducted by the Shadowgraphy method of diagnosing droplet-air fluxes with the fuel supplied at an azimuthal angle of 45° from the side surface of the gas-dynamic stabilizer. It is shown that if the fuel is injected at an angle it leads to a change in the velocity distribution in the wake of the stabilizer, and the flow swirl opposite to direction of azimuth fuel supply expands the spray pattern.

Combustion chamber; simulation; spraying; fuel-air mixture.

Citation: Tretyakov V.V., Sviridenkov A.A. Comparative analysis of fuel distribution downstream of the gas-dynamic flame holder with various methods of injection. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2018. V. 17, no. 4. P. 155-164. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-4-155-164

References

1. Tret'yakov V.V., Sviridenkov A.A., Toktaliev P.D. Fuel atomization and mixing in unsteady swirling flows behind the gas-dynamic stabilizer. *Russian Aeronautics*. 2017. V. 60, Iss. 3. P. 106-112. P. 434-441. DOI: 10.3103/S1068799817030163
2. Sviridenkov A.A., Toktaliev P.D., Tret'yakov V.V. Modelling of liquid fuel atomization and distribution in unsteady swirling flow under combustion chamber and free conditions. *Proceedings of the 6th International Conference «Heat and Mass Transfer and Hydrodynamics in Swirling Flows» (November, 21-23, 2017, Novosibirsk)*. Novosibirsk: IT SO RAN Publ., 2017. P. 83. (In Russ.)
3. Sviridenkov A.A., Tret'yakov V.V. Model of motion and disintegration of the fuel film downstream of the atomizer. *Proceedings of the VI International Conference «Problems and Prospects for the development of Aviation, Land Transport and Power Engineering» (October, 12-14, 2011, Kazan)*. V. 1. Kazan: Kazan State Technical University Publ., 2011. P. 242-248. (In Russ.)
4. Ashgriz N. Handbook of Atomization and Sprays. Theory and Applications. Springer, 2011. 951 p.
5. Tret'yakov V.V. Distribution calculation of dropwise-liquid and vaporous fuel in combustion chamber spray-type component. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2006. No. 2 (10), part 2. P. 136-142. (In Russ.)