

УДК 621.438

РАСПЫЛИВАНИЕ ТОПЛИВА И СМЕСЕОБРАЗОВАНИЕ В МОДЕЛЬНОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ ПРЕЦЕССИИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА

© 2015 А. А. Свириденков, В. В. Третьяков

Центральный институт авиационного моторостроения
им. П.И. Баранова, г. Москва

Проведены численные расчёты течения за завихрителем, установленным в жаровой трубе камеры сгорания, на режимах, когда это течение является неустойчивым. Полученные в расчётах поля скорости использованы для моделирования нестационарного характера течения. Сравнение результатов расчётов, проведённых по этой модели, с результатами расчётов по коммерческому пакету *fluent* показало их хорошее согласование. Получено, что рассматриваемое течение является существенно нестационарным с признаками прецессии. В осреднённом поле течения выполнены численные расчёты распределений капельно-жидкого топлива в области, моделирующей конфигурацию жаровой трубы камеры сгорания. Получено, что значительная часть топлива попадает на стенки модельной камеры. Экспериментально исследованы процессы распыливания топлива в нестационарной прецессирующей струе, вытекающей из модельной камеры. Показано, что в результате взаимодействия топливной струи с прецессирующим воздушным потоком образуется достаточно однородная топливовоздушная смесь со средним диаметром капель приблизительно 50 мкм и меньше. Получены данные о зависимости распределения концентраций и размеров капель от режимов течения воздуха и топлива. Показано, что основание струи топлива в закрученном потоке воздуха за завихрителем под влиянием прецессии вихря совершает вращательно-колебательное движение. Этот процесс визуально наблюдается только при импульсном освещении потока.

Камера сгорания, распыливание, струя, прецессия.

doi: 10.18287/2412-7329-2015-14-2-170-178

Введение

Суть проведённой работы состоит в расчётно-экспериментальном исследовании процессов, происходящих за завихрительными фронтными устройствами камер сгорания в условиях нестационарности течений. Рассматривается нестационарное течение воздуха, имеющее перио-

дическую структуру в виде прецессирующего вихревого ядра. На начальном этапе такое исследование проведено в [1], где рассматривалась закрученная воздушная струя, вытекающая из модельной камеры. Схема экспериментальной модельной камеры показана на рис. 1.

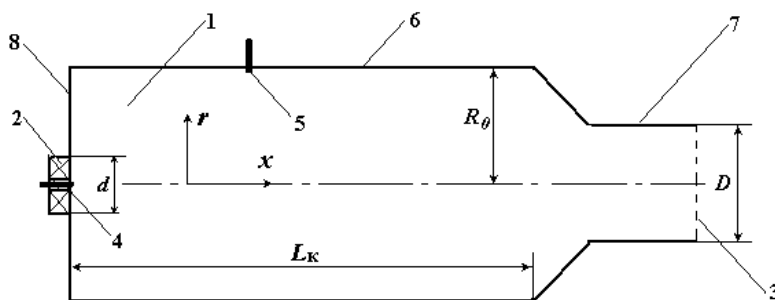


Рис. 1. Схема экспериментальной модели камеры сгорания:

1 – рабочий объём вихревой камеры; 2 – завихритель; 3 – сечения выхода из сопла; 4 – центральный канал; 5 – форсунка; 6 – стенки вихревой камеры; 7 – сопло; 8 – фронтальная плита

В рабочий объём камеры 1 воздушный поток поступает через осерадиальный завихритель 2 и вытекает в открытое пространство через выходное сопло 7. Топливо в камеру подаётся через струйную форсунку 5 по нормали к её стенке. Диаметр сопла D составлял 50 мм, диаметр завихрителя $d = 50$ мм, длина камеры $L_k = 300$ мм. Расстояние от фронтальной плиты 8 до форсунки 5 равнялось 100 мм. Эксперименты выполнены на модели диаметром 100 мм при среднерасходной скорости течения $U_a = 14 - 17$ м/с. Интенсивность закрутки $W_0 = W_{\max}/U_a$ составляла 1,69, где U_a – среднерасходная скорость течения, W_{\max} – максимальное значение вращательной скорости на срезе сопла.

Экспериментально показано [2], что течение в рассматриваемой струе не осесимметрично, поле течения и центр приосевой рециркуляционной зоны прецессируют в направлении вращения основного потока, при этом угловая частота прецессии совпадает с частотой основного тона акустического излучения струи. Согласно [2] эта частота равна 250 Гц. Проведённые измерения распыливания жидкости в рассматриваемом прецессирующем воздушном потоке показали, что в данном случае обеспечивается образование достаточно однородной топливовоздушной смеси со средним диаметром капель приблизительно 50 мкм. При этом топливный факел имеет нестационарную периодическую структуру.

Целью данного исследования является выявление особенностей в распределениях капельно-жидкого топлива, распыливаемого в нестационарном закрученном турбулентном потоке с прецессией вихря. Это исследование проводится расчётно-экспериментальными методами. Рассматриваются два вида нестационарных течений. Первый – это течение в цилиндрической камере, которое возникает вследствие его неустойчивости и которое характеризуется наличием в нем прецессирующего вихря, при этом пульсации скорости и давления генерируют акусти-

ческие волны и течение сопровождается излучением звука. Второй вид течения – это обычное развитое турбулентное течение на выходе из камеры, характеризующееся неупорядоченными пульсациями скорости и давления. Главная задача, которая ставится в работе, – это получение экспериментальной информации о свойствах закрученных нестационарных течений и их влияния на процессы распыливания топлива и смесеобразования. Полученные экспериментальные материалы являются основой проведения численных расчётов, которые выполнены по собственному программному комплексу применительно к камерам сгорания газотурбинных двигателей (ГТД). Исследована структура турбулентного закрученного течения, распыла и смесеобразования за осерадиальным завихрителем в типичной камере сгорания ГТД. Проведён расчёт прецессирующего поля течения внутри и за модельной камерой в сочетании с проведением экспериментальных исследований.

Расчёт нестационарного течения в модельной камере

Ниже приводятся результаты расчётов течения в модельной камере сгорания. В отличие от [1] в данном случае подача жидкого топлива осуществляется не в сносящий, а в спутный воздушный поток. Изучается течение в следе за фронтальным двухъярусным лопаточным завихрителем. Закрутка поступающего в камеру сгорания потока осуществляется в осевом завихрителе внутреннего канала и в радиальном завихрителе наружного. Проведённые расчёты основаны на интегрировании полной системы уравнений Рейнольдса, записанных в переменных Эйлера и замыкаемых по двухпараметрической модели турбулентности, при этом предполагается, что течение является изотермическим и осесимметричным.

В нестационарной постановке система уравнений Рейнольдса, записанная в консервативной форме, имеет следующий вид:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{U} \Phi - \Gamma_{\phi} \text{grad} \Phi) = S_{\phi}.$$

Здесь \mathbf{U} – вектор осреднённой скорости газовой смеси; Φ – зависимая переменная; Γ_{ϕ} – коэффициент диффузионного переноса; ρ – плотность; S_{ϕ} – источник член. Система уравнений неразрывности ($\Phi \equiv 1$, $\Gamma_{\phi} \equiv 0$, $S_{\phi} \equiv 0$) и движения ($\Phi = U_i$, $i = 1, 2, 3$) решается конечно-разностным итерационным методом. При этом $\Gamma_{U_i} = \nu_e$, $\nu_e = \nu + \nu_t$, а для нахождения величины коэффициента турбулентной кинематической вязкости газа ν_t используется соотношение Колмогорова-Прандтля и двухпараметрическая модель турбулентности к- ϵ . В качестве граничных условий на входе (во входных сечениях) задаются профили трёх компонентов скорости, которые считаются равномерными и значения которых принимаются в соответствии с предварительно полученными

экспериментальными данными. На твёрдых границах используется «закон стенки», записанный для полной скорости, а в выходном сечении – «мягкие» граничные условия ($\partial \Phi / \partial x = 0$). Соответствующие граничные условия приняты и для характеристик турбулентности. Для решения приведённой системы уравнений используется конечно-разностный итерационный метод, основанный на применении «смещённых сеток», совместно с методом поправок. Интегрирование проводится по схеме Гаусса-Зайделя с релаксацией решения на каждом итерационном шаге. Использованная методика расчётов соответствует описанной в [1]. Адекватность описанных методик расчёта реальности установлена сопоставлением результатов расчётов и экспериментов [2] и результатов расчётов, полученных в стационарной и нестационарной постановках [3].

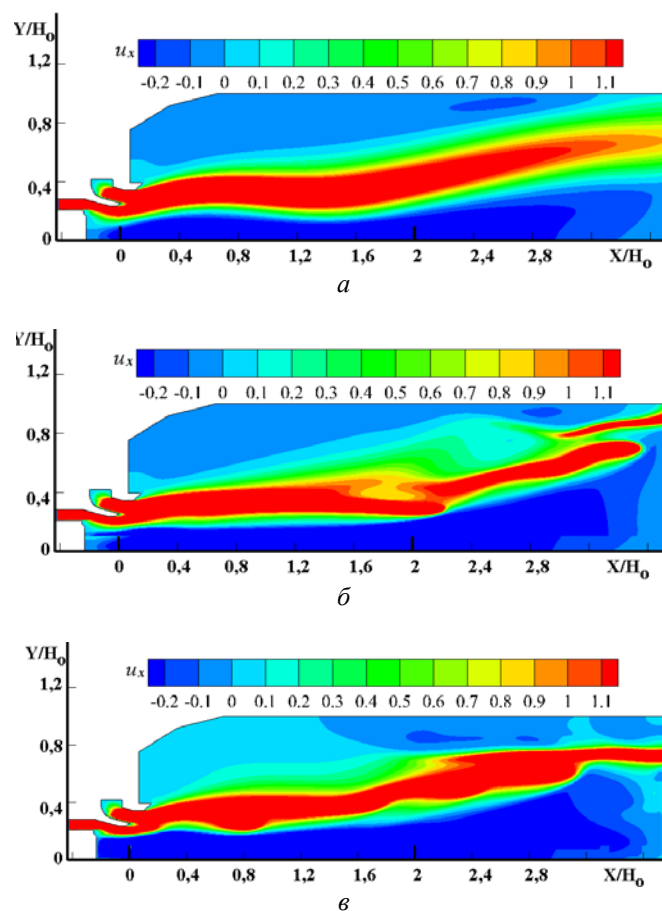


Рис.2. Распределение мгновенных скоростей в продольном сечении модельной камеры в произвольные моменты времени

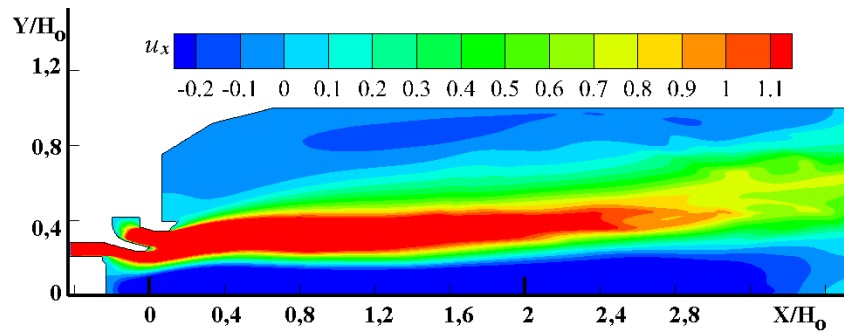


Рис. 3. Распределение осреднённых скоростей в продольном сечении модельной камеры

Отметим, что экспериментальные исследования обнаружили существенную нестационарность рассматриваемых течений.

На рис. 2 представлены примеры расчётов мгновенных распределений u_x – компоненты скорости ($u_x = U_x/U_a$) в продольном сечении камеры в произвольные моменты времени, а на рис. 3 – осреднённое распределение. На этих рисунках X и Y – продольная и радиальная координаты, $H_0 = 50$ мм – характерный размер задачи.

Экспериментальное исследование распыливания топлива прецессирующей воздушной струёй

Из приведённых рисунков видно, что мгновенные распределения скоростей могут существенно отличаться от осреднённых. Такая же ситуация обнаруживалась и в экспериментах, которые показали, что распыливаемое центральной форсункой 4 (рис. 1) топливо интенсивно увлекается закрученным нестационарным потоком. При этом на выходе из камеры в опытах удалось визуально зафиксировать прецессионное движение вытекающей

двухфазной струи. Примеры фотографий этой струи представлены на рис. 4, 5.

На рис. 4 приведены фотографии струи в лазерном ноже при непрерывном освещении факела распыливания.

На рис. 5 отчётливо видны изменения конфигурации струи, связанные с её прецессионным движением. Отметим, что на предыдущих этапах исследования заключение о нестационарности течения делалось на основе акустических излучений струи. В данном исследовании удалось визуально зафиксировать нестационарность течения в виде прецессирующей струи. При этом оказалось, что с увеличением расхода топлива G_f амплитуда прецессионных колебаний уменьшается, что иллюстрируется рис. 6.

Таким образом, результаты визуальных наблюдений показали, что во всех исследованных режимах работы завихрительного устройства факелы распыливания являются существенно нестационарными. Это подтверждается и непосредственными измерениями пульсаций концентраций капель в фиксированной точке факела в различные моменты времени (рис.7). Здесь C_v – относительная объёмная концентрация капель, t – время.

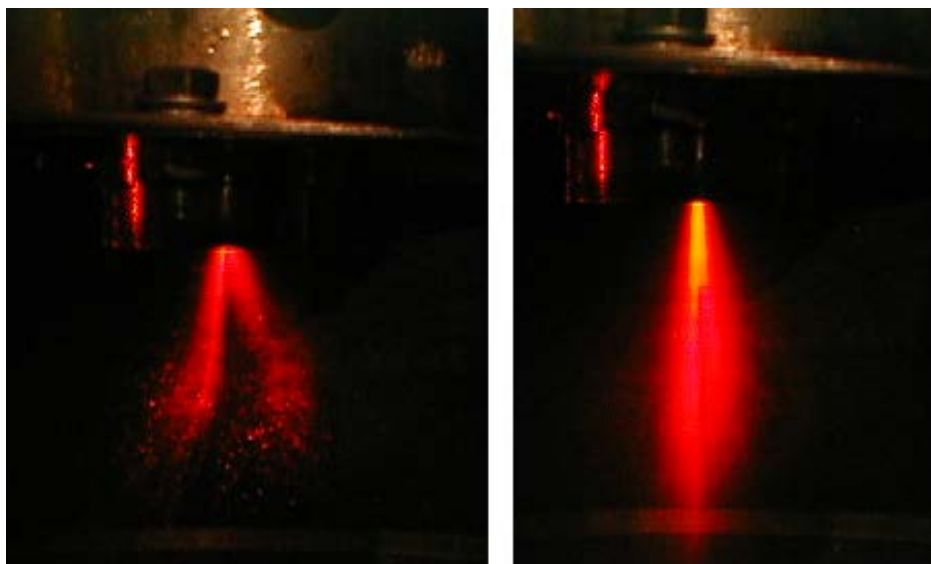


Рис. 4. Визуально наблюдаемая форма струи при $\Delta Pa = 3 \text{ кПа}$; $G_f = 2,5$ и $4,7 \text{ г/с}$

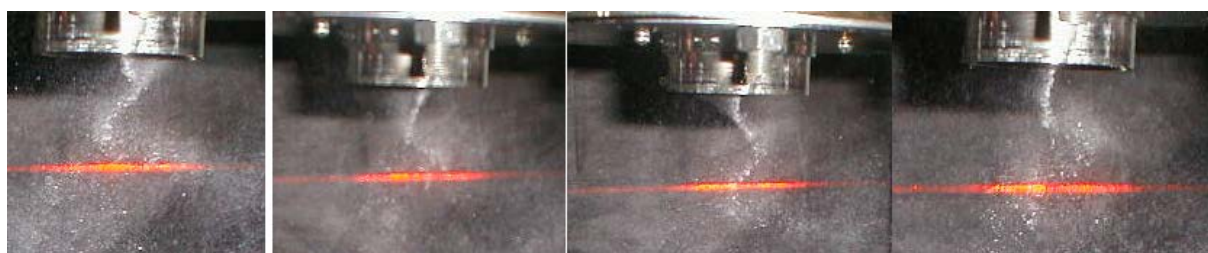


Рис. 5. Форма струи при освещении потока импульсной вспышкой длительностью $1/500 \text{ с}$
 $\Delta Pa = 3 \text{ кПа}$; $G_f = 4,7 \text{ г/с}$

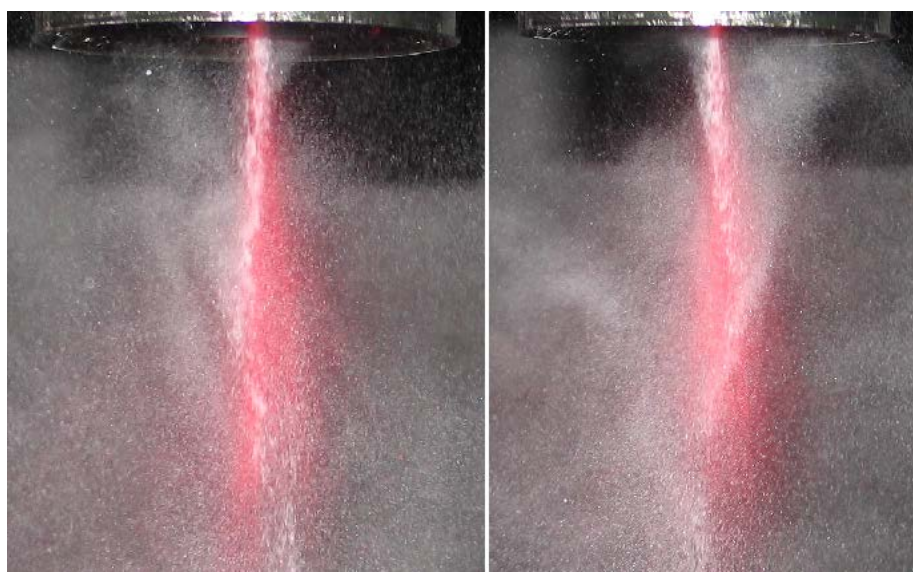


Рис. 6. Форма струи при освещении импульсной вспышкой $\Delta Pa = 3 \text{ кПа}$; $G_f = 4,7 \text{ г/с}$

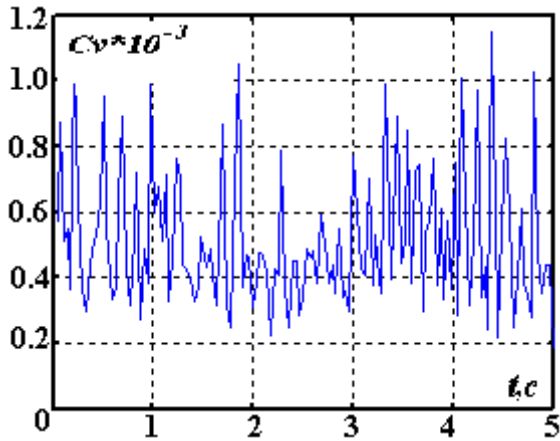


Рис. 7. Изменение пульсаций концентраций топлива по времени

Измерения концентраций и размеров капель топлива в факеле распыливания

Проведённые исследования показали, что взаимодействие топливной струи с воздухом является сложным нестационарным процессом. При попадании струи топлива в закрученный поток воздуха за завихрителем струя под воздействием прецессии вихря совершает вращательно-колебательные движения. При расходе топлива $G_f = 2,5$ г/с и перепаде давления воздуха на фронте $\Delta Pa = 3$ кПа эта амплитуда в поперечном направлении оказалась равной размеру выходного сечения завихрителя. При увеличении расхода топ-

лива (до 4,7 г/с) амплитуда этих колебаний уменьшается. Частота колебаний прецессирующей струи достаточно высока (250 Гц и выше), и эти колебания могут наблюдаться только при импульсном освещении факела. При непрерывном освещении наблюдается осреднённая картина структуры факела.

Отметим, что на основном режиме работы камеры ($\Delta Pa = 3$ кПа, $G_f = 2,5$ г/с) размеры капель составили от 40 до 60 мкм при равномерном распределении размеров капель по поперечному сечению факела распыливания. Наибольшая неравномерность в распределении концентраций наблюдалась в сечениях, ближайших к выходу из завихрителя, при этом размеры капель находились в диапазоне от 20 до 100 мкм. В результате взаимодействия истекающей струи с воздухом вниз по потоку от завихрителя происходит выравнивание концентрации топлива по поперечному сечению факела. Пример распределения капель по размерам и их концентраций в поперечном сечении факела распыливания на расстоянии 50 мм от выхода из завихрителя приведён на рис. 8. Измерения концентрации и размеров капель проводились лазерным измерителем дисперсности на различных расстояниях от завихрителя. На рисунке C_v – относительная объёмная концентрация капель, SMD – среднезаутеровский диаметр капель.

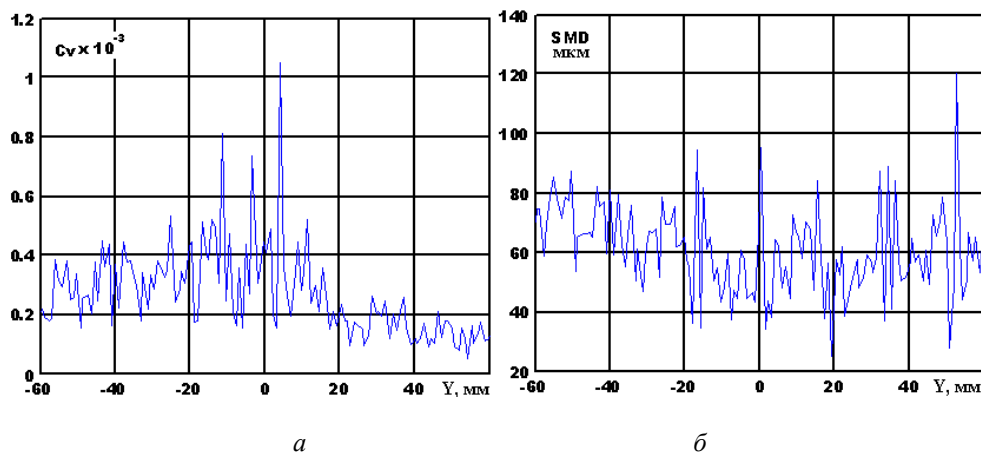


Рис. 8. Распределения капель топлива: а - концентраций; б - среднезаутеровских размеров по поперечному сечению факела распыливания

$X = 50$ мм; $\Delta Pa = 3$ кПа; $\Delta P_f = 268$ кПа; $G_a = 65$ г/с; $G_f = 2.5$ г/с

Опыты показали, что увеличение расхода воздуха через завихритель с 65 г/с до 84 г/с при $\Delta Pa = 5$ кПа вызывает выравнивание концентрации в поперечном сечении факела и уменьшение размеров капель топлива до 40 – 60 мкм. С увеличением расхода топлива от 2,5 до 4,7 г/с интенсивность смешения топливной струи с воздухом уменьшается, а средние размеры капель несколько увеличиваются. Аналогичные результаты по распределениям концентраций топлива получены и в численных расчётах.

Заключение

Проведены численные расчёты течения за завихрителем, установленным в жаровой трубе камеры сгорания, на режимах, когда это течение является неустойчивым. Полученные в расчётах поля скорости использованы для моделирования нестационарного характера течения. Сравнение результатов расчётов, проведённых по этой модели, с результатами расчётов по коммерческому пакету *fluent* показало их хорошее согласование. Полу-

чено, что рассматриваемое течение является существенно нестационарным с признаками прецессии. В осреднённом поле течения выполнены численные расчёты распределений капельно-жидкого топлива в области, моделирующей конфигурацию жаровой трубы камеры сгорания. Получено, что значительная часть топлива попадает на стенки модельной камеры.

Экспериментально исследованы процессы распыливания топлива в нестационарной прецессирующей струе, вытекающей из модельной камеры. Показано, что в результате взаимодействия топливной струи с прецессирующим воздушным потоком образуется достаточно однородная топливовоздушная смесь со средним диаметром капель приблизительно 50 мкм и меньше. Получены данные о зависимости распределения концентраций и размеров капель от режимов течения воздуха и топлива.

Работа поддержана РФФИ. Проект № 14-01-00325.

Библиографический список

1. Третьяков В.В., Свириденков А.А., Токталиев П.Д. Моделирование нестационарности течения и смесеобразования в камерах сгорания // Известия вузов. Авиационная техника. 2013. № 1. С. 33-37.

2. Третьяков В.В., Миронов А.К., Свириденков А.А., Токталиев П.Д. Экспериментальное и расчётное исследование нестационарных течений с прецессией вихря, распыливания и смесеобразования в прецессирующих струях // Сборник докладов международного конгресса «Проблемы и перспективы развития наукоём-

кого машиностроения». Казань: КНИТУ–КАИ, 2013. С. 322-329.

3. Третьяков В.В. Методы моделирования процессов распыливания топлива и смесеобразования за завихрительными фронтными устройствами камер сгорания // Сборник докладов международной научно-практической конференции «Современные технологии, материалы, оборудование и ускоренное восстановление квалифицированного кадрового потенциала – ключевые звенья в возрождении отечественного авиа- и ракетостроения». Т. 2. Казань: КНИТУ, 2012. С. 272-283.

Информация об авторах

Свириденков Александр Алексеевич, старший научный сотрудник, Центральный институт авиационного моторо-

строения им. П.И. Баранова. E-mail: sviriden@ciam.ru. Область научных интересов: экспериментальные и расчетно-

теоретические методы исследования гидродинамики, распыливания топлива, смесеобразования и процессов тепло- и массообмена.

Третьяков Валентин Валентинович, кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник,

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова. E-mail: tretjak@ciam.ru. Область научных интересов: расчётно-теоретические методы исследования гидродинамики, распыливания топлива, смесеобразования и процессов тепло- и массообмена.

FUEL SPRAYING AND MIXING IN A SIMULATED COMBUSTION CHAMBER IN THE PRESENCE OF AIR FLOW PRECESSION

© 2015 A. A. Sviridenkov, V. V. Tretyakov

Central Institute of Aviation Motors, Moscow, Russian Federation

Numerical calculations of the flow downstream the flame tube of the combustion chamber in the conditions of nonstable flow are presented in the paper. The obtained velocity fields were used for the modeling of non-stationary nature of the flow. The comparison of the results of calculations carried out using this model with the results of calculations based on the *fluent* commercial packages showed their good agreement. It was found that the flow under consideration is essentially nonstationary, with signs of precession. Numerical calculations of liquid fuel droplet distributions in the area stimulating the configuration of the combustor liner were carried out. It was found that a significant portion of the fuel hits the walls of the chamber. The processes of atomization of fuel in a non-stationary precession jet flowing out of the chamber are investigated experimentally. It has been shown that the interaction of fuel jet with precession air flow gives a sufficiently homogeneous air-fuel mixture with an average droplet diameter of about 50 microns or less. Data on the dependence of the concentration distribution and droplet size on flow regimes of air and fuel have been obtained. It is shown that the base of the jet fuel in a swirling air flow under the influence of the vortex precession performs rotational - oscillatory movement. This process is visually observed only in conditions of pulsed illumination of the flow.

Combustion chamber, spraying, jet, precession.

References

1. Tretyakov V.V., Sviridenkov A.A., Toktaliev P.D. Simulation of flow and mixture formation nonstationarity in combustion chambers. *Russian Aeronautics*. 2013. V. 56, no. 1. P. 44-49.
2. Tretyakov V.V., Mironov A.K., Sviridenkov A.A., Toktaliev P.D. Experimental and calculation research of non-steady-state flows with a vortex precession, spray and a mixing in precessing jets. *Proceeding International Congress Problems and prospects of development of the high technology engineering industry*. Kazan: KNITU-KAI Publ., 2013. P.322-329 (In Russ.)
3. Tretyakov V.V. Methods of modelling of spray fuel processes and a mixing behind swirl front devices of combustion chambers. *International Scientific and Practical Conference «Modern technologies, materials, equipment and accelerated restoration of qualified human force potential - key links in the revival of domestic aircraft and rocket construction»*. V. 2. Kazan: Kazan National Research Technological University Publ., 2012. P. 272-283. (In Russ.)

About the authors

Sviridenkov Alexander Alekseevich, Senior Researcher, Federal State Unitary Enterprise - Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov. E-mail: sviriden@ciam.ru. Area of Research: experimental, computational and theoretical methods of investigating hydrodynamics, fuel atomization, mixing and heat-mass transfer processes.

Tret`yakov Valentin Valentinovich, Candidate of Science (Physics and Mathematics), Associate Professor, Senior Researcher, Central Institute of Aviation Motors, Federal State Unitary Enterprise - Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov. E-mail: tretjak@ciam.ru. Area of Research: computational and theoretical methods of investigating hydrodynamics, fuel atomization, mixing and heat-mass transfer processes.