

УДК 621.43.056

Применение аддитивных технологий в вопросе исследования структуры течения формируемой горелками камер сгорания ГТД

Бакланов А.В.*, Васильев А.А.**

Казанский национальный исследовательский технический университет

имени А.Н. Туполева – КАИ,

ул. Карла Маркса, 10, Казань, 420111, Россия

**e-mail: andreybaklanov@bk.ru*

***e-mail: artemka402@yandex.ru*

Аннотация

В настоящей статье изложены результаты работы по проектированию и изготовлению горелок камеры сгорания газотурбинного двигателя методом прототипирования. Приведены особенности конструкции горелок. Описано оборудование и материалы при помощи которых создавались горелки, установочная плита и другие элементы оснастка. Представлена конструкция стенда, на котором проводились исследования структуры течения на выходе из изготовленных горелок. Описан принцип его работы и параметры испытаний. По результатам работ выявлено, что установленные рядом горелки с противоположной круткой лопаток формируют более короткую структуру турбулентной струи, что может быть использовано в малоэмиссионных камерах сгорания уменьшенных габаритов.

Ключевые слова: камера сгорания, горелка, газотурбинный двигатель, аддитивные технологии, турбулентное течение, закрутка потока.

Введение

Камеры сгорания ГТД и ГТУ предназначены для подвода теплоты к рабочему телу в двигателе за счет преобразования химической энергии топлива в тепловую при его сгорании с участием кислорода, содержащегося в воздухе [1]. Основным

элементом подающим топливо и воздух в жаровую трубу камеры сгорания является вихревая горелка рис.1, представляющая из себя завихритель 1 с форсункой 2 и сопловой насадок 3 [2]. В связи с чем, изучение аэродинамической структуры течения на выходе из завихрителя представляет практический интерес, так как сформированная закрученная струя топливовоздушной смеси во многом определяет характеристики камеры сгорания.

В традиционной практике, для обеспечения необходимых параметров камеры проектируется несколько вариантов вихревых горелок с целью проведения их исследований для выбора оптимальной конструкции приемлемой для конкретной камеры [3]. Изготовление вихревых горелок является трудоемким и дорогостоящим процессом, в связи с чем на помощь приходят современные технологии изготовления деталей, называемые аддитивными. Аддитивные технологии (АТ) начали интенсивно развиваться со времени получения первых трехмерных изображений изделий на дисплеях компьютеров. Начало положила стереолитография, затем довольно многочисленные новые принципы стали называть технологиями быстрого прототипирования (Rapid Prototyping) и, наконец, укоренилось название «Аддитивные технологии» [4,5].

Основная цель данной работы определить влияние угла установки лопаток завихрителя на структуру потока, а так же выполнить проверку взаимодействия струй рядом стоящих форсунок с противоположными углами установок лопаток.

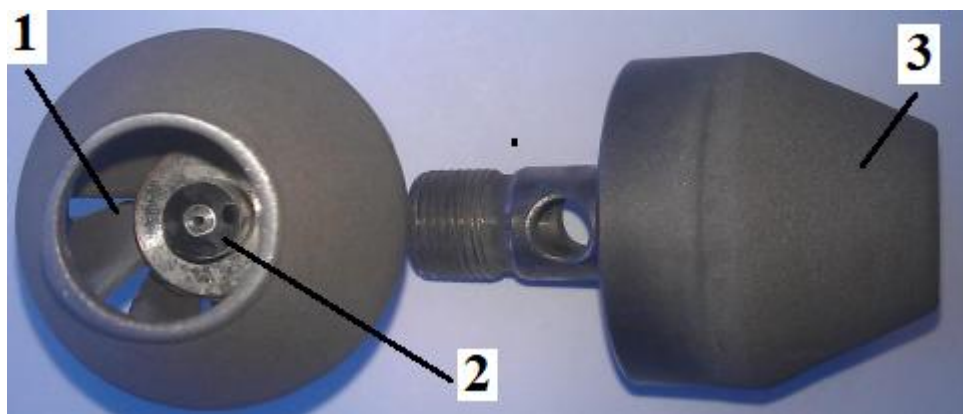


Рис.1. Вихревая горелка

Конструкция базовой горелки, имеет конфузорный насадок с выходным диаметром сопла равного 12мм, лопаточный завихритель с углом установки лопаток 45° . Вторая горелка выполнена с противоположным углом установки лопаток -45° .

Для проведения испытаний горелок были спроектированы соответствующие приспособления, такие как установочный модуль выполненный в виде крышки с пятью нанесенными фигурными окнами, в которые устанавливается горелка, прижима необходимого для фиксации горелок и диффузора через который к горелкам подается воздух.

3D модель горелки и установочный модуль для горелок создавалась в КОМПАС 3D V12 [6]. Для дальнейшей печати все модели были переведены в формат «stl».

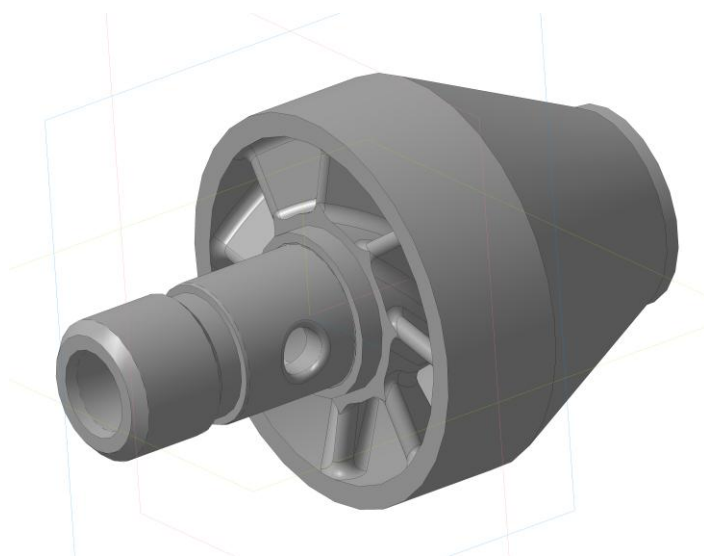


Рис.2 Вид 3D модели форсунки.

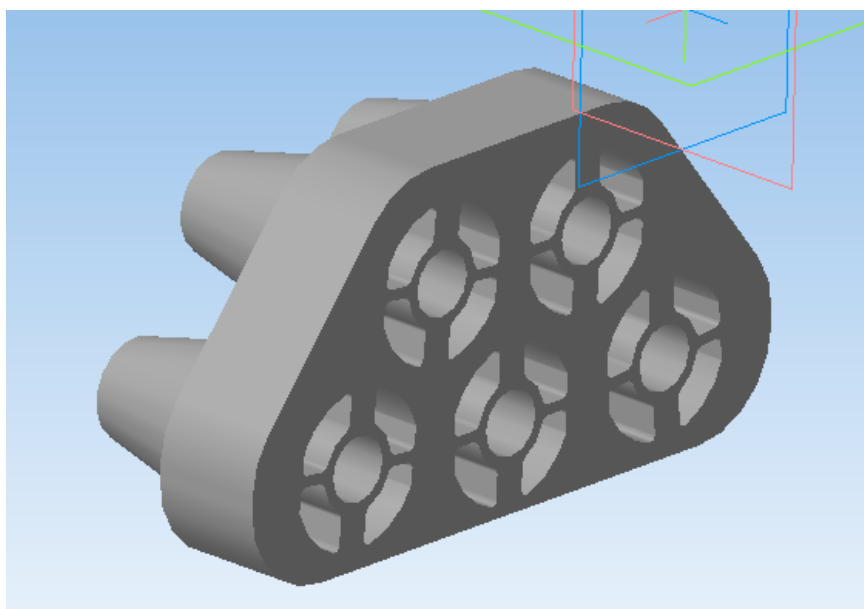


Рис.3 Вид 3D модель установочной плиты.

Печать моделей проводилась на 3D-принтере Picaso, который работает по технологии экструзии пластика – то есть модель получается путем послойного нанесения тончайших слоев расплавленного пластика [7]. Эти слои, соответствующие виртуальным поперечным сечениям в CAD-модели, соединяются или сплавляются вместе для создания объекта заданной формы. Основным

преимуществом данного метода является возможность создания геометрических форм практически неограниченной сложности.

Для печати используются АБС и ПЛА (ABS \ PLA) пластики, которые можно обрабатывать, шлифовать и окрашивать [8].

Для работы принтера используется специальная программа Polygon, в которую загружаются модели в формате файлов STL [9].



Рис.4 Вид распечатанных форсунок.

После создания моделей, выполнена комплексная сборка горелок, в установочной плите при помощи прижима. В диффузорные каналы плиты установили фитинги предварительно подготовив отверстия. В фитинги устанавливаются трубки, через которые подается смесь воздуха с петролейным эфиром [10] рис.5.



Рис.5 Вид испытываемой модели в сборе

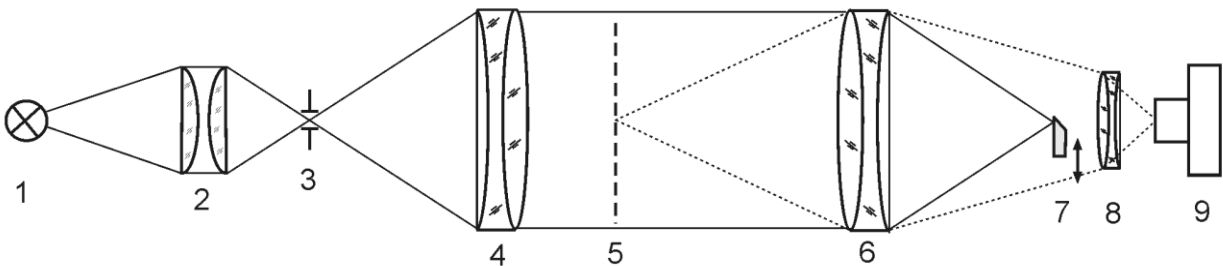


Рис.6. Оптическая схема установки

1 – источник излучения (короткодуговая ксеноновая лампа OSRAM XBO450 или галогенная лампа 100 Вт); 2 – конденсор; 3 – входная щель; 4, 6 – объектив; 5 – исследуемое сечение; 7 – нож Фуко; 8 – проекционный объектив; 9 – видеокамера НХ-4 Метресам (Нас, США) без объектива, скорость видеосъемки 3000 к/с.

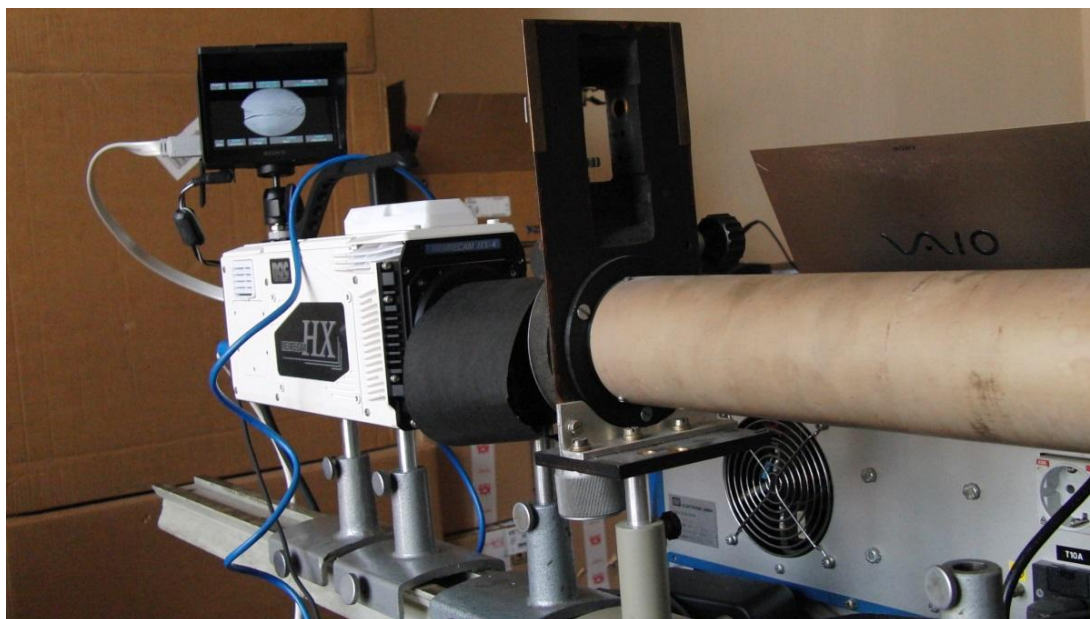


Рис.7. Общий вид установки

Работа установки осуществляется по следующему принципу:

Лампа создает пучок яркого света в широком диапазоне длин волн видимого диапазона, которое с помощью фокусатора подается на коллиматор, установленный в фокусе фокусатора, а затем на первую линзу. После первой линзы свет становится параллельным, проходит через неоднородную область, создаваемую в процессе работы установки, и попадает в вторую линзу, аналогичную по параметрам первой. Свет, прошедший сквозь эту линзу, фиксируется на ноже Фуко и задерживается, однако, это не относится к свету, прошедшему через неоднородность, путь которого отклоняется от ножа Фуко, и проходит дальше в фокусатор и в скоростную камеру. Таким образом, получается теневая картина лучей, прошедших сквозь неоднородность, в плоскости ПЗС-матрицы скоростной камеры.

Течения газа в трубках экспериментальной установки характеризуется числом Рейнольдса, который позволит определить режим течения газа в трубках [11,12].

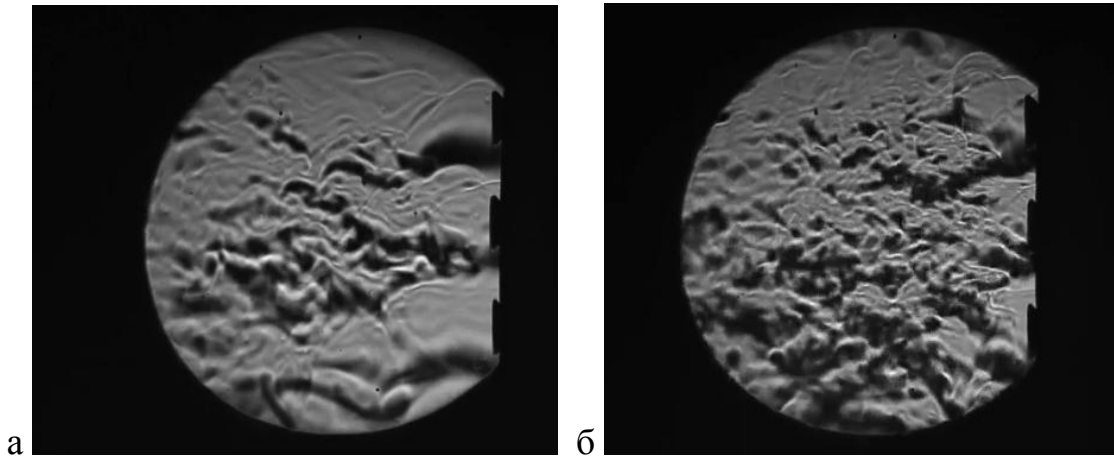
$$\text{Re} = \frac{\rho u d}{\mu} = \frac{u d}{\nu},$$

где ρ - плотность жидкости, кг/м³; u - среднерасходная скорость жидкости в трубе, м/с; d - диаметр трубы, м; μ - динамический коэффициент вязкости, Па·с; ν - кинематический коэффициент вязкости, м²/с.

Значения ρ и μ определяются по справочным данным в зависимости от температуры и давления газа. В большинстве случаев их зависимостью от давления можно пренебречь. Зная значения свойств протекающего газа в трубках был выполнен расчет значений чисел Рейнольдса для каждого значения расхода газа [13,14].

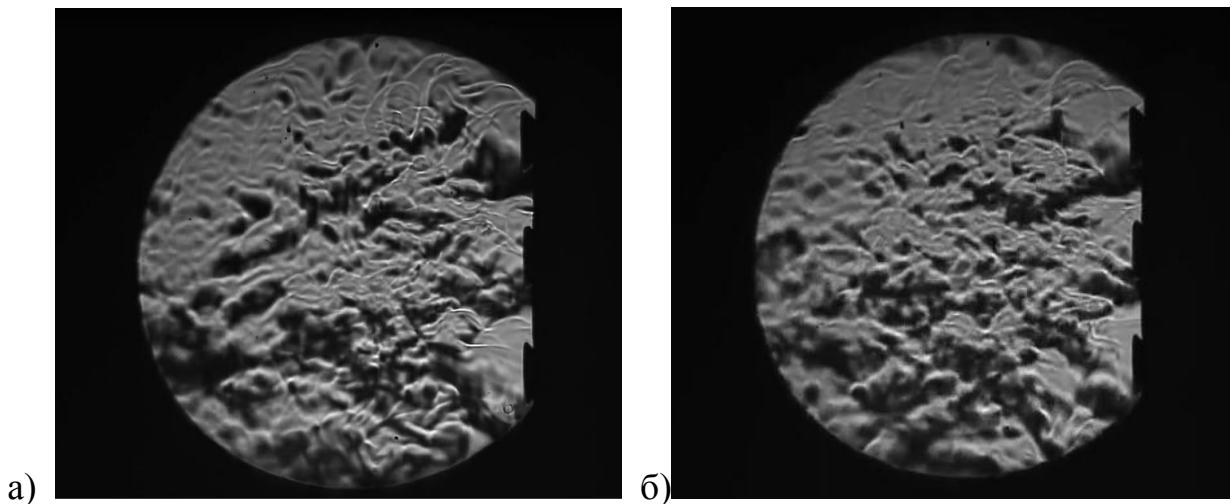
$$\text{Re} = \frac{4G}{\pi d \mu}$$

Известно, что ламинарный режим течения существует устойчиво при числах Рейнольдса $\text{Re} \leq 2300$; при $\text{Re} > 2300$ ламинарное течение теряет устойчивость, при $2300 < \text{Re} < 4000$ существует переходный режим течения, а при $\text{Re} > 4000$ течение становится турбулентным. В связи с тем, что при расходе газа до 20 м³/с $\text{Re}=2295$, то течение ламинарное переходящее в турбулентное, а при расходе свыше 40 м³/с $\text{Re}=4590$ и течение переходит в турбулентное.



*Рис.8. Течение газа на выходе из испытываемой модели
при расходе: а) $G_1=20 \text{ м}^3/\text{с}$, б) $G_2= 40 \text{ м}^3/\text{с}$.*

В камерах сгорания газотурбинных двигателей топливо сжигается в турбулентном потоке. Интенсивность процесса горения, важнейшая её характеристика, в значительной степени определяется гидродинамическими характеристиками потока. Распространение пламени протекает не только за счет молекулярного переноса, но и за счет пульсации отдельных молекул газа в потоке. В связи с чем, дальнейший анализ необходимо проводить для турбулентного течения [15,16,17].



*Рис.8. Течение газа на выходе из испытываемой модели.
при $G=40 \text{ м}^3/\text{с}$. 5-ть горелок с а) Угол закрутки 45° , б) Угол закрутки -45° ,*

Из рис.8 видно, что в течении происходит постоянное порождение крупных структур (вихрей) которые перемещаются не только вместе с потоком, но и поперек потока; такое движение приводит к интенсификации процессов переноса массы импульса и энергии, т.к. обмен массой, импульсом и энергией между слоями жидкости осуществляется не только на молекулярном, но прежде всего, на макроскопическом уровне. При этом можно заметить, что в потоке за горелками с углом установки лопаток 45° и -45° структуры течения схожи.

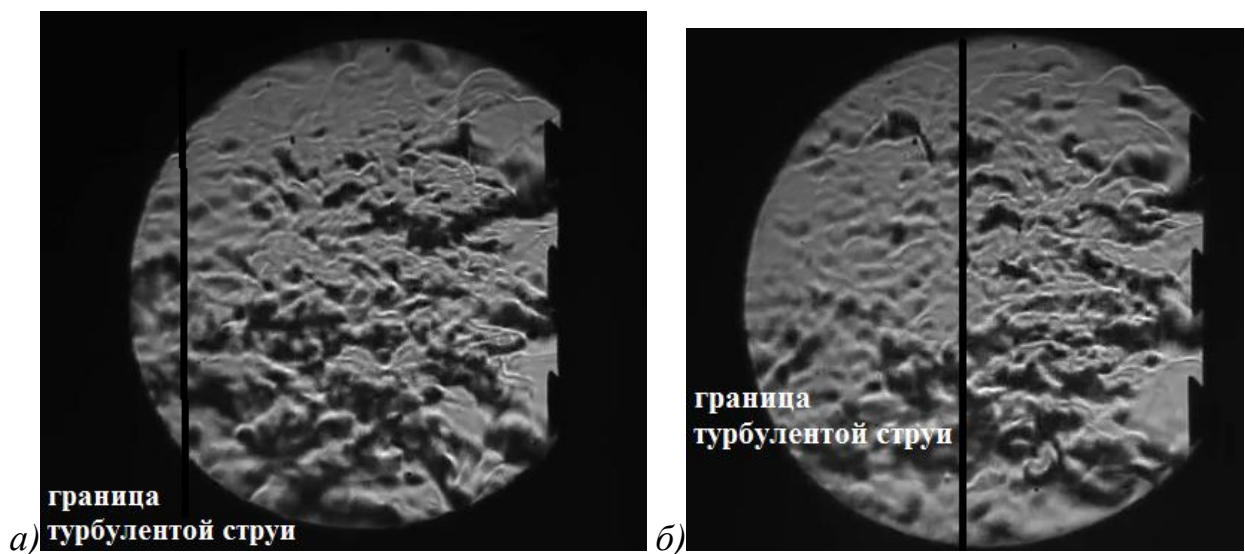


Рис.9. Течение газа на выходе из испытываемой модели.

при $G=40 \text{ м}^3/\text{с}$. 5-ть горелок с а) Угол закрутки 45° , б) верхний ярус угол закрутки - 45° (2-е горелки), нижний ярус угол закрутки 45° (3-и горелки).

Из теории известно, что в турбулентном течении происходит каскадный перенос энергии. Так как основное стационарное течение неустойчиво, в нем образуются вихревые структуры, тем самым происходит отбор энергии от основного течения и передача его вихрям. Но вихри также являются неустойчивыми и распадаются на более мелкие структуры, передавая им свою энергию, те в свою очередь,

распадаются на еще более мелкие. Процесс распада продолжается до образования самых мелких устойчивых вихрей, которые за счет трения переводят свою кинетическую энергию в тепло [18,19,20]. Данная картина наблюдается на рис.9, при этом можно заметить, что в комбинированном фронтном устройстве наблюдается в два раза меньшая протяженность турбулентной струи.

Выводы

1) Увеличение расхода воздуха привело к увеличению интенсивности процессов. Течение, сформированное за горелками при $G=40 \text{ м}^3/\text{с}$ – турбулентное, что характерно течению в камерах сгорания ГТД. Это связано с увеличением числа Рейнольдса Re , обусловленного увеличением скорости истечения турбулентности струи.

2) Установлено, что за горелками с углом установки лопаток 45° и -45° структуры течения схожи, что свидетельствует о том, что закрутка в ту или иную сторону не влияет на структуру течения.

3) В испытательной модели при установке в верхний ярус горелок с одной закруткой лопаток, а в нижний с другой наблюдается в два раза меньшая протяженность турбулентной струи. Это объясняется взаимным проникновением турбулентных слоев направленных навстречу друг другу. В результате энергосодержащий масштаб вихрей снижается, так как энергия струй затрачивается на взаимодействие столкнувшихся слоев.

4) В современных малоэмиссионных камерах сгорания обеспечивается низкое время пребывания газов, порядка 7мс. Это необходимо для снижения уровня образования оксидов азота в продуктах сгорания. В связи с чем, организация противоположной закрутки у горелок в верхнем и нижнем ярусах может быть полезна для организации малоэмиссионного процесса горения [21].

Библиографический список

1. Данильченко В.П., Лукачев С.В., Ковылов Ю.Л. и др. Проектирование авиационных газотурбинных двигателей. – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2008. - 620 с.
2. Бакланов А.В., Маркушин А.Н. Оценка влияния конструкции форсунки на полноту сгорания топлива при испытаниях на отсеке // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2015. № 6. С. 101 - 105.
3. Baklanov A.V., Neumoin S.P. A technique of gaseous fuel and air mixture quality identification behind the swirl burner of gas turbine engine combustion chamber // Russian Aeronautics, 2017, vol. 60, no. 1, pp. 90 - 96.
4. Баева Л.С., Маринин А.А. Современные технологии аддитивного изготовления объектов // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. 2014. Т. 17. № 1. С. 7 - 12.
5. Антонова В.С., Осовская И.И. Аддитивные технологии. - СПб.: ВШТЭ СПб ГУПТД, 2017. – 30 с.

6. Ганин Н.Б. Автоматизированное проектирование в системе КОМПАС-3D V12. - М.: ДМК Пресс, 2010. - 360 с.
7. Chee Kai Chua, Chee How Wong, Wai Yee Yeong. Standards, Quality Control and Measurement Sciences in 3D Printing and Additive Manufacturing, Academic Press, 2017, 266 p.
8. Валетов В.А. Аддитивные технологии (состояние и перспективы). – СПб.: Университет ИТМО, 2015. - 63 с.
9. Зленко М.А., Нагайцев М.В., Довбыш В.М. Аддитивные технологии в машиностроении. – М.: НАМИ, 2015. - 220 с.
10. Маркушин А.Н., Бакланов А.В. Испытательные стенды для исследования процессов и доводки низкоэмиссионных камер сгорания ГТД // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва. 2013. № 3-1 (41). С. 131 - 138.
11. Schlüter J., Schönfeld T., Poinso T., Krebs W., Hoffmann S. Characterization of confined swirl flows using large eddy simulations // ASME Turbo Expo 2001: Power for Land, Sea, and Air (New Orleans, Louisiana, USA, June 4-7, 2001), 2001, vol. 2, pp. V002T02A027. DOI: 10.1115/2001-GT-0060
12. Moses, C., Roets, P. Properties, Characteristics and Combustion Performance of Sasol Fully Synthetic Jet Fuel // ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2009, vol. 131, no. 4, pp. 1-17. DOI: 10.1115/1.3028234
13. Harrison W.E., Zabarnick S. The OSD Assured Fuels Initiative— Military Fuels Produced from Coal // DoE Clean Coal Conference, Clearwater, FL, June 2007.

14. Lieuwen T., McDonnell V., Petersen E., Santavicca D. Fuel Flexibility Influences on Premixed Combustor Blowout, Flashback, Autoignition, and Stability // ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2008, vol. 130, 011506-011506-12.
15. A.K. Gupta, D.G. Lilley, N. Syred. Swirl Flows, Kent, Abacus Press, 1984, 475 p.
16. Lee S., Speight J.G., Loyalka S.K. Handbook of Alternative Fuel Technologies, CRC Press, Boca Raton, FL, 2007, 525 p.
17. Lefebvre A.H., Ballal D.R. Gas Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions, 2010, CRC Press, 537 p.
18. Kieseletter F., Konle M., Sattelmayer T. Analysis of Combustion Induced Vortex Breakdown Driven Flashback in a Premix Burner with Cylindrical Mixing Zone // ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2007, vol. 129, pp. 929 - 936.
19. Lieuwen T.C., Yang, V. Combustion Instabilities in Gas Turbine Engines // Progress in Astronautics and Aeronautics, AIAA, 2005, vol. 210, pp. 657.
20. Лубков Н.В., Спиридонов И.Б., Степанянц А.С. Влияние характеристик контроля на показатели надежности систем // Труды МАИ. 2016. № 85. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=67501>
21. Метечко Л.Б., Тихонов А.И., Сорокин А.Е., Новиков С.В. Влияние экологических нормативов на развитие авиационного двигателестроения // Труды МАИ. 2016. № 85: <http://trudymai.ru/published.php?ID=67495>