

При вдуве плоских струй с кромок уступа под углом  $90^\circ$  к направлению основного потока течение осуществлялось при скоростях набегающего потока  $U = 30$  м/с и вдува струи  $U_{\text{вдува}} = 60$  м/с.

Результаты показали, что вдув струи воздуха с кромки стабилизатора увеличивает объем циркуляционной зоны примерно в два раза, однако, при этом увеличивается скорость в зоне, что приводит к сокращению времени пребывания.

### Список литературы

1. Гагаринские чтения – 2017: XLIII Международная молодёжная научная конференция: Сборник тезисов докладов: М.: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2017.
2. *Щетинков Е.С.* Физика горения газов. М.: Наука, 1978. 740 с.
3. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей / *Б.В. Раушенбах, С.А. Белый, И.В. Беспалов, В.Я. Бородачев, М.С. Волынский, А.Г. Прудников.* М.: Машиностроение, 1964.
4. *Winterfeld G.*, Zs. Flugwissenschaft 8, 219, 1960.

УДК 629.735.03:62/43.056

## АНАЛИЗ МИРОВОГО ОПЫТА РЕГУЛИРОВАНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С НИЗКОЭМИССИОННОЙ КАМЕРОЙ СГОРАНИЯ ПО РЕЖИМАМ МОЩНОСТИ И В КЛИМАТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ

Нугуманов А.Д., АО «ОДК-Авиадвигатель», г. Пермь, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь  
Сипатов А.М., АО «ОДК-Авиадвигатель», г. Пермь, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь  
Назукин В.А., АО «ОДК-Авиадвигатель», г. Пермь, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь

*Ключевые слова:* низкоэмиссионная камера сгорания (НКС), оксид азота (NOx), двуокись углерода (CO), коэффициент избытка воздуха (альфа), перепуск воздуха, многоколлекторная подача топлива, поворотный ВНА, газотурбинная установка (ГТУ).

НКС имеют очень узкий диапазон устойчивой работы по коэффициенту избытка воздуха. Данный коэффициент может очень сильно меняться при изменении температуры окружающего воздуха  $T_n$ . Как правило, в таких НКС зона реакции настроена максимально «горячо» при темпера-

туре МСА (+15 °С), а с понижением или повышением  $T_n$  происходит ее забеднение сопровождающееся ростом выбросов СО, появлением виброгорения и падением полноты сгорания особенно на низких режимах работы ГТУ. Для регулирования НКС при изменении температуры окружающего воздуха используются те же механизмы, что и для регулирования при дросселировании, поскольку и в том, и в другом случае необходимо поддерживать постоянной температуру в зоне горения:

1. Различные сбросы и перепуски воздуха из/внутри камеры сгорания.
2. Многоколлекторная стадийная подача топлива.
3. Поворотные лопатки ВНА.

Ниже будут рассмотрены основные способы регулирования, используемые различными производителями ГТД.

В авиапроизводных ГТД компании Rolls-Royce (Industrial RB211, Industrial Trent), которые в настоящее время выпускаются компанией Siemens, реализовано стадийное подключение топливных коллекторов. В двигателе RB211 – 2 стадии, разнесенные по длине жаровой трубы, в двигателе Trent – 3.

Согласно опубликованным данным, использование стадийного подключения коллекторов и управление подачей топлива в каждую из зон горения позволяет работать в широком диапазоне мощности и температуры окружающей среды без изменяемой геометрии и перепусков. Тем не менее, в двигателе RB211 присутствует перепуск воздуха из компрессора за турбину высокого давления. В статье, посвященной камере сгорания Industrial Trent также было упомянуто, что контролируется расход воздуха в жаровую трубу, чтобы поддерживать температуру в зоне горения, а оставшийся воздух сбрасывается ниже по потоку от камеры сгорания [1].

В ГТУ Titan 130 компании Solar используется система управления расходом воздуха во фронт жаровой трубы. В зависимости от параметров двигателя, которые зависят от температуры наружного воздуха, автоматика регулирует расход воздуха во фронтное устройство с помощью регулирующего клапана, чтобы поддерживать во фронте жаровой трубы требуемую температуру. В случае необходимости лишний воздух сбрасывается в выхлопную шахту ГТУ через клапан перепуска. В систему управления также включено непосредственное измерение эмиссии СО, на основании которого также настраивается расход воздуха в жаровую трубу [2].

В промышленных двигателях компании GE с камерой сгорания DLN1 наряду с поворотными лопатками ВНА используется система перепуска воздуха на вход двигателя. Поворотные лопатки ВНА позволяют снижать режим работы ГТУ примерно до 80 % от номинального с сохранением приемлемого уровня эмиссии, затем используется перепуск воз-

духа, который позволяет сохранять малоэмиссионный режим работы до 50 - 60 %, а при определенных внешних условиях и до 40 %.

Одной из последних модификаций КС DLN1 является внедрение технологии «позднего стадийного горения», предполагающей подачу части топлива через основные отверстия в газосборнике [3].

В ГТУ фирмы Mitsubishi Heavy Industries для поддержания необходимой температуры в жаровой трубе используются поворотные лопатки ВНА и перепуск воздуха в газосборник с использованием регулировочного клапана. Высокой неравномерности поля температур, возможно, удастся избежать за счёт того, что перепускаемый воздух подаётся в средней части жаровой трубы на значительном удалении от лопаток соплового аппарата первой ступени. Стоит отметить тот факт, что в следующем поколении ГТУ (J-класс) клапан перепуска воздуха отсутствует. Характеристики на режимах частичной нагрузки обеспечиваются за счет поворотно-го ВНА и НА первых 3-х ступеней [4].

В ГТУ малой мощности фирмы Siemens Industrial Turbomachinery без регулирования обеспечивается работа в низкоэмиссионном режиме в диапазоне мощности от 70 до 100% при температуре окружающего воздуха от - 20 °С до + 40 °С. Для его расширения помимо поворотных лопаток ВНА используется перепуск воздуха из-за компрессора в выхлопную шахту или на вход двигателя, что приводит к росту эмиссии оксидов азота, но позволяет расширить диапазон работы с приемлемой эмиссией CO.

В ГТУ большой мощности компании Siemens в настоящее время предлагается многомодульная камера сгорания с ультранизкой эмиссией NOx, которая благодаря регулируемому ВНА, 5-ти коллекторной системе подачи топлива и системе управления расходом воздуха обеспечивает эмиссию NOx и CO ниже 10 ppm в диапазоне мощности от 30 % до 100 % в широком диапазоне условий окружающей среды. Точные цифры для температуры воздуха и величины перепусков не приводятся, однако, согласно приведённой схеме, можно увидеть, что предусмотрен перепуск воздуха из-за последних ступеней компрессора и из корпуса камеры сгорания на вход в двигатель, на выход и к промежуточным ступеням турбины [5].

Таким образом, в большинстве ГТУ, эксплуатируемых в настоящее время, для обеспечения работы в низкоэмиссионном режиме при изменении параметров ГТУ (за счёт дросселирования или внешних условий) поддерживается температура в зоне горения. Это обеспечивается за счёт поворотного ВНА и перепуска воздуха либо на вход в двигатель, либо в газосборник, либо в выхлопную шахту. Перепуск воздуха имеет недостаток, связанный с существенным уменьшением перепада давления на стенке жаровой трубы при открытии перепуска. Конкретные цифры о величинах перепуска воздуха в зарубежных ГТУ отсутствуют, однако, для

поддержания коэффициента избытка воздуха в зоне горения в заданном диапазоне перепуск на вход в двигатель или в выхлопную шахту требует значительно меньшего количества воздуха, в сравнении с перепуском в газосборник. Это говорит о том, что с точки зрения поддержания постоянных параметров в камере сгорания и предотвращения ухудшения охлаждения ТВД, перепуск на вход в двигатель является более привлекательным решением, чем перепуск в газосборник. Кроме того, единственная фирма, применявшая в своих ГТУ перепуск в газосборник (МНИ), в своих последних разработках отказалась от этого решения.

### Список литературы

1. *C. Barkey, S. Richards, N. Harrop, P. Kotsiopriftis, R. Mastroberardino, D. Squires, T. Scarinci.* Rolls-Royce Industrial Trent: combustion and other technologies. Proceedings of International Symposium of Air Breathing Engines 1999, paper No. ISABE 99-7285.
2. *K.O. Smith, D.C. Rawlins, R.C. Steele.* Developments in dry low emissions systems. Preceedings of 2000 International pipeline conference, V.2, paper No. IPC2000-267.
3. *C.E. Romoser, J. Harper, M.B. Wilson, D.W. Simons, J.V. Citeno, M. Lal.* E-class late fuel staging technology delivers flexibility leap. Proceedings of ASME Turbo Expo 2016 conference, paper No. GT2016-57964, June 13-17, 2016, Seoul, South Korea.
4. *M. Yuri, J. Masada, K. Tsukagoshi, E. Ito, S. Hada.* Development of 1600° C-class high efficiency gas turbine for power generation applying J-type technology. Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, V.50, No.3, September 2013.
5. *A. Foust.* Siemens SGT6-5000F Gas turbine technology update. Proceedings of POWER-GEN International conference, Las Vegas, NV, USA, December 8-10, 2015.

УДК 621.43

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАМЕНИ ИОНИЗАЦИОННЫМ ЗОНДОМ

Шайкин А.П., Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти  
Галиев И.Р., Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти

Создание двигателей внутреннего сгорания и энергетических установок нового поколения, которые при низкой токсичности отработавших газов, обеспечивали высокую эффективность работы, требует глубокого изучения процесса сгорания топлива. В средствах диагностирования процесса сгорания получили широкое распространение ионизационные зонды (ИЗ). В настоящее время существует множество работ [1], посвященных методологии оценки температуры пламени с использованием