

ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЙ МАЛОЭМИССИОННОГО ГОРЕНИЯ И СОЗДАНИЯ МАЛОЭМИССИОННЫХ КАМЕР СГОРАНИЯ В ГАЗОТУРБОСТРОЕНИИ

Олег Николаевич Фаворский, академик РАН

Последние 20-30 лет в мире очень распространилась версия причины потепления климата из-за деятельности человечества и в первую очередь, увеличения выброса углекислого газа. Но при этом, при безусловной полезности улучшения местной экологии, увязка CO_2 и климата ошибочна. Уже более 15 лет неоднократно и различными специалистами говорится о том, что в балансе лучистых потоков Солнце-Земля-Космос роль CO_2 на два порядка ниже паров воды, т.е. парниковый эффект от количества CO_2 почти не зависит. При этом величина последнего определя-

ется температурой океана, а она связана как с величиной солнечного излучения, так и внутриземной активностью. До сих пор и количественных данных о суммарных эффектах, определяющих температуру воды, наука не имеет и по выделению CO_2 из земных недр сведений практически нет.

Мало того, в последние годы появились исследования геологов, показывающие (по анализу состава кернов земли), что в многолетних периодических циклах изменения температуры на Земле, соответствующее изменение концентрации CO_2 следует за тем-



№ 6 (84) 2012

www.dvigately.ru

пературой, а не наоборот как полагают борцы за климат.

Летом 2012 г. опубликована очень интересная статья академика Иванова М.В., биолога, занимающегося миром бактерий. Он показывает, что при "выделении" человечеством в год около 35 млрд т CO_2 , бактерии океана выделяют до 50 млрд т, и столько же земные. Таким образом, о влиянии CO_2 на климат говорить бессмысленно, тем более разрабатывать и создавать установки по захоронению CO_2 .

Однако климат и местная экология - это разные явления, и борьба за последнюю, безусловно необходима. Так ещё в 80-е годы XX века при анализе заболеваемости многими болезнями жителей около аэропорта Еревана (он в окружении гор) выяснилось превышение их порога почти в 10 раз по сравнению с удалёнными сёлами. Это было толчком в борьбе за экологию авиации в СССР. Другой свежий пример: в ноябре 2012 г. в Санкт-Петербурге около 2 тысяч футбольных болельщиков собрались в универсаме и через полчаса начались обмороки (от избытка CO_2). Поэтому, хотя как известно, автотранспорт почти везде определяет местную экологию, необходимо обеспечивать улучшение интересующих нас газотурбинных двигателей в авиации - для экологии аэропортов и в энергетике - для электростанций и газоперекачки.

Итак, говоря о местной экологии - составе воздуха, которым мы дышим, надо, прежде всего, говорить о продуктах сгорания в виде окислов азота, особенно NO_2 , окиси углерода CO , окислов серы и др. Именно поэтому в газотурбинных двигателях последние годы совершенствование процесса горения в камере, кроме просто полноты сгорания и потерь давления газа в ней, направлено на контроль состава продуктов сгорания и обеспечение его стабильности на всех режимах работы. Это - основная тема нашей конференции.

Первые десятилетия, развитие ГТД требовало от камер сгорания роста температуры газа, полноты сгорания, малых гидравлических потерь и хороших температурных полей на выходе. Массовое применение газотурбинных установок в качестве энерго- и механических приводов, начавшееся во второй половине прошлого века потребовало от разработчиков ГТУ именно из экологических соображений перехода на низкоэмиссионные камеры сгорания.

Зарубежными фирмами разработки технологий низкоэмиссионного горения в камерах сгорания газотурбинных установок были развернуты в начале 80-х годов. В середине девяностых появились низкоэмиссионные камеры сгорания (НКС). В конце девяностых (через 15-18 лет после начала работ), первые "экологически чистые" газотурбинные установки поступили на рынок. Ведущим зарубежным фирмам "Дженерал Электрик", "Роллс-Ройс", "Алстон", "Сименс", "Мицубиси" потребовалось вложить сотни миллионов долларов в разработку этой сложнейшей технологии. Известны три принципиальные схемы организации процесса горения: исходная факельная (диффузионная), с предварительным смешением и каталитическая.

В настоящее время наибольшее развитие получила технология сжигания бедных, предварительно перемешанных топливовоздушных смесей, в английской аббревиатуре LPP. По этой технологии созданы практически все низкоэмиссионные камеры сгорания ведущих зарубежных фирм. Следует отметить, что главным источником информации при доводке элементов НКС (горелки, жаровой трубы) служили только результаты экспериментальных исследований. Это было, и до сих пор является следствием отсутствия достоверной теории расчёта кинетики горения предварительно перемешанных топливовоздушных смесей.

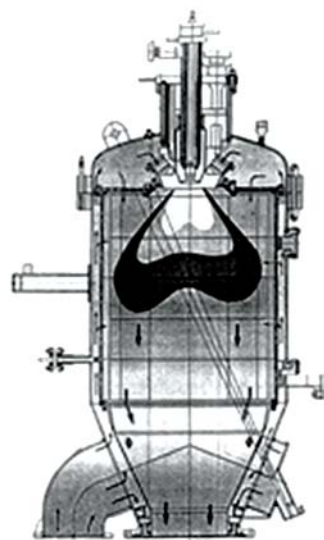
Выявление кинетических механизмов воспламенения и горения различных топлив, а также механизмов образования экологически опасных соединений в камерах сгорания энергетических установок и двигателей различных транспортных систем позволяет не только правильно предсказать такие важные характеристики как пределы устойчивого горения, температуру и время задержки воспламенения, скорость распространения пламени, длину зоны энерговыделения, эволюцию концентраций различных компонентов, но и ещё на стадии проектирования оценить эмиссию газооб-



разных загрязняющих атмосферу соединений (NO_x , CO , CO_2 , SO_x , HNO_2 , HNO_3 , H_2SO_4 , органика, C_nH_m) и аэрозольных компонентов (сажевые частицы, сульфатные и органические аэрозоли, конденсационные следы). Именно поэтому построению детальных реакционных механизмов, адекватно описывающих сложные взаимосвязи между различными соединениями, участвующими в химических или физико-химических процессах при горении органических и неорганических топлив, уделяется в последние 20 лет особое внимание. Важную роль эти вопросы играют не только при создании энергоэффективных низкоэмиссионных камер сгорания для энергетических установок и авиационных двигателей, но также и новых типов двигателей внутреннего сгорания. В последние годы возникли несколько новых направлений в организации горения, которые требуют дополнительных усилий по изучению кинетики протекания цепных реакций и образования экологически опасных соединений.

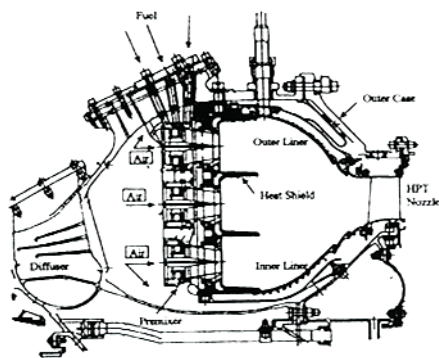
К этим направлениям сегодня, кроме наиболее распространённого сжигания природного газа, относятся:

- горение синтетических и альтернативных топлив, включая биотоплива;
- горение сложных композитных топлив: попутные нефтяные газы, продукты пиролиза и реформинга тяжёлых углеводородных топлив, авиационные керосины.



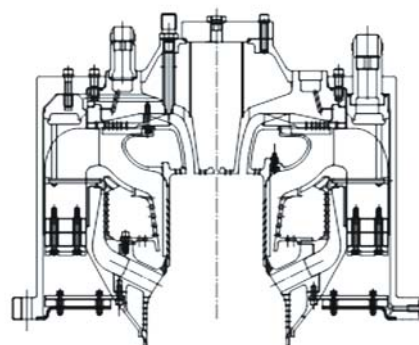
Применение горелки и жаровой трубы больших размеров ($D_g = 300$ мм, $D_{жт} = 700$ мм, $L_{ж.т.} = 1300$ мм) позволило существенно расширить границы бедного срыва пламени, снизить выбросы NO_x на природном газе до 9 ppт и обеспечить устойчивый процесс горения при доле пилотного топлива $>3\%$.

Схема выносной МЭКС ГТУ ТНМ 1303-10 компании "Сименс". Двухтопливная одnogорелочная низкоэмиссионная камера сгорания с керамической облицовкой жаровой трубы



Фронт с горелками малого размера регулируется при изменении мощности с помощью подачи (отключения) топлива в различные группы горелок. Устойчивость горения обеспечивается за счет установки четверть волновых резонаторов

Кольцевая МЭК с многогорелочным фронтом ГТУ LM-6000 компании GE



Оригинальная многостадийная схема сжигания бедных смесей. Развитая система давления пульсаций в воздушном и топливном подводящих трактах МЭК и в жаровой трубе. Объем поглотителей превышает объем жаровой трубы

МЭК с развитой системой поглощения пульсаций давления ГТУ Trent 60 компании Rolls-Royce

Кроме того, добавились:

- горение, стимулированное низкотемпературной неравновесной плазмой, в том числе и низкотемпературное сжигание ультрабедных топливоздушных смесей;
- плазмохимический пиролиз, газификация и сжигание низкокалорийных топлив.

Эти направления включают целый комплекс исследований, а именно, анализ элементарных реакций квантово-химическими методами, построение новых реакционных механизмов не только для описания воспламенения и горения, но и формирования различных экологически опасных компонентов (NO_x , N_2O , HNO_2 , HNO_3 , H_2SO_4 , органика, SO_x , H_2SO_4 , CO , CO_2 , полиароматические углеводороды, сажевые частицы, диоксины), численное моделирование процессов горения и главное - проведение экспериментальных исследований как кинетики протекания реакций, так и самих процессов горения в камерах сгорания.

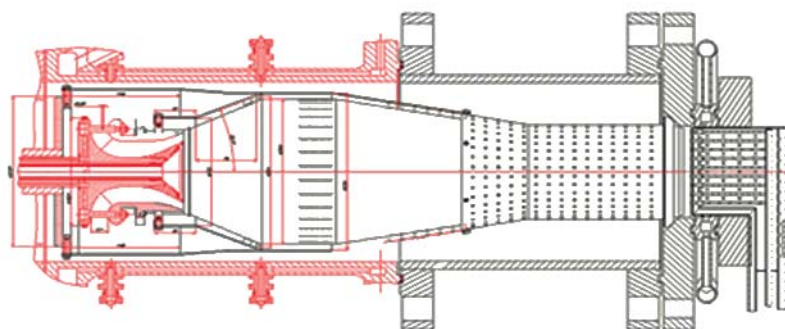
В настоящее время большинство ведущих фирм и исследовательских центров проводят системную работу по разработке кинетической теории горения. Главной особенностью таких работ является параллельное проведение расчётных и экспериментальных исследований. Главной целью последних служит обеспечение расчётных моделей эмпирическими зависимостями и данными для идентификации расчётных моделей. При этом экспериментальные исследования отмечаются большой информативностью, получаемой широким применением лазерных методов исследования. Например, такие исследования в центре им. Гленна (США) проводятся уже на протяжении более чем шести лет на специально разработанной экспериментальной камере сгорания, имеющей квадратное поперечное сечение. Стенки камеры сгорания прозрачные с четырёх сторон. Специальные лазерные системы измеряют мелкость распыливания, поля скоростей, распределения концентраций CH , OH , CO_2 . Впечатляет информативность лазерных методов - экспериментально получают поля параметров, аналогично расчётным.

Такие исследования являются серьёзной базой для развития методов расчёта кинетических характеристик камеры сгорания.

Проблема вибрационного горения в НКС является острой проблемой, заметно тормозящей разработку технологий низкоэмиссионного горения и создания работоспособных конструкций камер. Как показывает опыт фирм, решение проблемы вибрационного горения занимает большую часть всего времени по доводке НКС. В настоящее время практически отсутствуют методы расчёта границ вибрационного горения для низко- и высокочастотных колебаний давления.

Созданная в ЦИАМ программа "Аэрокамб" даёт вероятностную оценку возникновения термоакустических колебаний. Это авторская программа, к сожалению пока не доступная для широкого круга разработчиков. Необходимо разрабатывать такие программы расчёта, которые не только могли достоверно прогнозировать частотные диапазоны термоакустических колебаний, но и давали бы в руки исследователей инструмент по предотвращению колебаний давления. Нужно предусмотреть возможность переноса результатов стендовой доводки НКС на реальный двигатель, имеющий другие граничные условия на выходе из камеры сгорания. Помимо методов пассивного подавления колебаний давления путем организации диссипации энергии колебаний на различных демпфирующих устройствах, необходимо разрабатывать методы предотвращения вибрационного горения путём управления генерацией энергии колебаний. Эти направления расчётно-экспериментальных исследований являются весьма актуальными, они являются важной составляющей перспективных исследований. Развитие методов расчёта кинетических характеристик и характеристик вибрационного горения низкоэмиссионных камер сгорания является одной из важнейших ближайших задач.

Отсутствие достоверных методик расчёта основных характеристик низкоэмиссионных камер сгорания, таких, как уровень эмиссии NO_x и CO , границ вибрационного горения - не позволяет прогнозировать характеристики НКС при начале её разработки. Эти свойства камеры проявляются лишь в процессе её экспериментальной доводки. Многофакторность влияния на указанные характеристики давления, температуры, состава смеси, степени и качества гомогенизации топливо-воздушной смеси, доли пилотного топлива, граничных условий на выходе из камеры сгорания делает такую доводку интуитивно-эмпирической. Практическое отсутствие стендов с натурными параметрами по давлению и температуре превращает доводку в многоступенчатый процесс с непредсказуемым результатом. Практически отсутствует банк систематизированных и обобщённых данных для различных типов горелок и камер сгорания, без которого невозможно



Однгорелочная трубчатая МЭК с горелкой без закрутки газа и с центральной SOT больших размеров, существенно расширяющей границы бедного срыва пламени. Устойчивость горения достигнута без подачи пилотного топлива

МЭК, разработанная в ЦИАМ для ГТУ с $\pi_k = 30$

хотя бы приблизительно ориентироваться при доводке низкоэмиссионных камер сгорания. Поэтому, в настоящий момент требуется разработка научных основ методик создания и доводки НКС, которая на основе разрабатываемых методов расчёта эмиссионных характеристик, границ вибрационного горения и обобщения экспериментальных данных предоставила бы разработчикам НКС обоснованный путь получения заявленных характеристик НКС в реальные сроки.

Основные исследования и разработки технологий низкоэмиссионного горения за рубежом и у нас проводились для газозо-воздушных топливных смесей. Систем низкоэмиссионного горения жидкого топлива в "сухой" схеме разработано немного. Хорошо известна двухтопливная горелка АЕВ фирмы "Алстом Пауэр". Она обеспечивает эмиссию NO_x на номинальном режиме без впрыска воды на уровне 20...40 ppт. Известны разработки жидкостных низкоэмиссионных горелок фирмы "Солар". Остальные фирмы, например, "Дженерал Электрик" для снижения эмиссии широко используют впрыск воды.

В последнее время многие зарубежные исследовательские центры стали разрабатывать альтернативные LPP схемы, такие как схему непосредственного впрыска жидкого топлива в объёме "бедного" процесса LDI, и организацию горения по принципу "богато-бедного" горения

В первом случае жидкое топливо впрыскивается в камеру сгорания с расходом, обеспечивающим состав смеси для низкоэмиссионного горения. Благодаря повышенному давлению горючего и интенсивной закрутки потока воздуха (при угле установки лопаток завихрителя до 60°) перемешивание быстро испаряющегося жидкого горючего завершается уже на расстоянии 5...8 мм от плоскости огневого днища. Дальнейший процесс горения протекает уже

как горение предварительно перемешанной смеси. По данным работ американского центра им. Гленна такая схема при своей простоте реализации обеспечивает весьма низкую эмиссию NO_x .

Аналогичные результаты получены на схеме "богато-бедного" горения, которая, несмотря на более сложную схему организации рабочего процесса, даёт удовлетворительные результаты по снижению эмиссии NO_x .

Специалисты России и Украины, приступившие к разработкам низкоэмиссионных камер сгорания с большим отставанием, в настоящее время к новым схемам только присматриваются, а работы по ним находятся на начальной стадии.

Особо я хотел бы остановиться на каталитической КС, отработанной ЦИАМ с Институтом катализа СО РАН (академик Пармон В.Н.), на катализаторах в десятки раз дешевле полладия и с ничтожной эмиссией NO и CO (~ 1 ppт). Но очевидно, что такая камера реальна для сравнительно маломощных наземных ГТУ.

Необходима в России более широко и интенсивно развернуть работы по исследованию новых схем организации рабочего процесса и на жидком топливе, что позволит решить не только проблему создания НКС для ГТУ (а у нас на газоперекачке и электроэнергетике уже более 3000 ГТУ), но и разработать НКС для авиационных ГТД, уровень эмиссии которых пока существенно уступает иностранным. Это является приоритетной задачей на ближайшее время.

Для выполнения этих объёмных и длительных исследований требуются квалифицированные кадры. Привлечение молодых специалистов в эту интереснейшую сферу научных исследований, создание для них комфортных условий работы, стимулирование результатов их исследований является важнейшей задачей для руководителей предприятий и исследовательских центров. 



КОНКУРС

Союз авиапроизводителей

6 декабря 2012 г. подведены итоги конкурса "Авиастроитель года" за 2011 год.

Несмотря на вековую историю авиационной промышленности России, подобный конкурс проводился впервые.

Учредителями конкурса выступили: НП "Союз авиапроизводителей", ОАО "ОАК", ОАО "УК "ОДК", ОАО "Вертолеты России" и ЗАО "АКБ "Новикомбанк". Генеральный партнер:

Государственная корпорация "Банк развития и внешнеэкономической деятельности (Внешэкономбанк)". Официальные партнеры: ОАО "Авиатехприемка", ОАО "Уралэлектромедь" (дочернее предприятие ОАО "УГМК") и ОАО "Каменск-Уральский металлургический завод". Конкурс проводится при поддержке Правительства г. Москвы, ГК "Ростехнологии" и Союза машиностроителей России. Церемонию награждения открыл Председатель Оргкомитета и Экспертного совета конкурса, генеральный директор ФГУП "ЦАГИ" Борис Алешин.

Конкурс проводился по 14 номинациям.

В номинации "За создание новой технологии" победителем стал ФГУП "ЦИАМ им. П.И. Баранова"; на 2-м месте - Евгений

Феофилов (ОАО "Камов"); 3-е место - у Аиды Хурумовой (ФГУП "НИИСУ"). Победителя и лауреатов поздравили депутат Государственной Думы Федерального собрания РФ Сергей Штогрин и президент, генеральный конструктор ОАО "РПКБ" Гиви Джанджава.

Поздравляем коллектив отдела авиационных приводов, руководимый Виктором Васильевичем Головановым, чья работа по системе диагностики редукторов, агрегатов приводов вертолётов различных типов, а также коробок приводов агрегатов двигателей, позволяющей предотвратить отказы, в том числе аварийные, принесла институту диплом победителя. Желаем дальнейших успехов на ниве внедрения самых современных технологий в отечественном авиастроении. 

