

УДК 621.452.022

И.Ф. Кравченко*ГП «Ивченко-Прогресс», Украина***КОНЦЕПЦИЯ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ЗАПУСКА
КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ПРИ СОЗДАНИИ И ДОВОДКЕ ГТД
С НИЗКИМ ВЫБРОСОМ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ**

Рассмотрены сущность и методологические основы решения проблемы запуска камер сгорания ГТД с низким выбросом вредных веществ. На основании обобщения опыта ГП «Ивченко-Прогресс» и анализа современных тенденций в проектировании и доводке малоэмиссионных камер сгорания предложена концепция решения проблемы их запуска.

камера сгорания ГТД, экологическое совершенство, запуск, методология проектирования и доводки

Постановка проблемы и ее связь с научными и практическими задачами. Человечество вступило в эпоху глобального экологического кризиса: его хозяйственная деятельность нарушила динамическое равновесие биосферы, что послужило причиной ее прогрессирующего разрушения. Воздушный бассейн катастрофически быстро загрязняется токсичными продуктами сгорания органических топлив, особенно в крупных городах и промышленных регионах. К числу основных источников выбросов вредных веществ (ВВ) относятся тепловые двигатели, в том числе газотурбинные (ГТД). Последние широко применяются в энергетике, на транспорте (особенно в авиации) и в промышленности (наиболее широко – в газовой).

Суммарная мощность мирового парка ГТД ныне составляет около 2,5 млрд. кВт, что в 20 раз меньше суммарной мощности мирового парка двигателей внутреннего сгорания [1]. Однако, поскольку удельные расходы воздуха через ГТД весьма значительны, они могут приводить к существенному локальному загрязнению атмосферы (например, в зоне аэропортов, компрессорных станций и т. п.).

Поскольку экология – это наиболее заметная касающаяся каждого жителя проблема, и ради ее позитивного решения общество готово идти на существенные затраты, современные ГТД разрабатываются под флагом снижения уровней выбросов ВВ.

Камера сгорания (КС) – важнейший и наиболее трудный в проектировании и доводке узел, определяющий уровни выбросов ВВ ГТД.

Проблема состоит в том, что к организации рабочего процесса КС ГТД предъявляется более двух десятков параметрических требований, многие из которых наилучшим образом удовлетворяются при существенно различной организации рабочего процесса. При этом такие задачи, как получение низких выбросов ВВ и обеспечение надежного устойчивого запуска КС в заданных условиях эксплуатации, как правило, оказываются противоречащими друг другу по оптимуму. Острота проблемы усугубляется тем, что задача поддержания конкурентоспособности отечественных ГТД делает надежный запуск функцией, подчиненной экологии, но без него невозможно выполнение ГТД своего предназначения, то есть проблема надежного запуска остается первичной для любого ГТД. Таким образом, уже на этапе начала разработки малоэмиссионной КС необходимо заложить научно обоснованную концепцию обеспечения ее успешного запуска.

Обзор публикаций и выделение нерешенных частей проблемы. Несмотря на огромное и постоянно растущее число исследований в области малоэмиссионных КС ГТД (их результаты нашли частичное отражение в монографиях [2 – 6], обзорах [7, 8], диссертациях [9, 10] и др.), и значительное число работ, посвященных исследованию рабочего процесса КС на режиме запуска [4, 11 – 16], методологические аспекты решения проблемы запуска малоэмиссионных КС до настоящего времени разработаны очень мало. Авторы [4, 6] ограничились описанием проблемы на феноменологическом уровне. Работы [3, 17 – 24] содержат элементы методологии проектирования и доводки малоэмиссионных КС, однако вопросы запуска в них не выделены. Заслуживает внимания работа [25], где предложена эвристическая процедура оптимизации пусковых характеристик малоэмиссионной КС. Многие исследователи сосредоточились на решении

частной задачи прогнозирования пусковых характеристик КС методами макро моделирования и вычислительной гидроаэродинамики, однако практическое использование результатов, достигнутых в этом направлении, также требует концептуального осмысления. Обзор данного направления сделан автором в работах [26, 27]. Однако развернутая формулировка и аргументированное обоснование концепции решения проблемы запуска КС при создании и доводке ГТД с низким выбросом ВВ в известных работах отсутствует.

Цель данной статьи состоит в разработке такой концепции на основе обобщения опыта ГП «Ивченко-Прогресс» и анализа существующих тенденций в данной области.

Изложение основного материала исследования с обоснованием полученных результатов. В основе концепции решения любой научной проблемы лежит такой план организации работ, который позволяет достичь поставленной цели в минимально короткое время и с минимальными затратами.

Работа начинается с обобщения имеющихся в этой области знаний и опыта. При выполнении расчетов и конструировании КС закладываются известные и вновь изобретенные мероприятия, направленные на обеспечение устойчивого запуска. Необходимо выбрать наиболее оптимальный вариант по критерию выполнения технического задания при минимальных временных и финансовых затратах.

В этой связи особое внимание необходимо уделить алгоритмам запуска для электронного блока управления. Они должны содержать сравнительно простые обобщенные критериальные зависимости, которые можно легко корректировать при помощи входящих в них коэффициентов. Именно продуманность алгоритмов запуска позволяет с минимальными материальными и временными затратами выполнять в последствии экспериментальную доводку запуска полноразмерного двигателя.

В результате обобщения имеющегося опыта автором были предложены следующие зависимости подачи топлива на этапе розжига камеры сгорания, которые прошли успешное опробование на новых двигателя предприятия:

$$G_m = G_m^0 K_p K_T K_n K_{розж} (1 - K_{ост}); \quad (1)$$

$$G_m = G_m^0 K_{G\delta} K_\eta K_T K_n K_{розж} (1 - K_{ост}), \quad (2)$$

где G_m^0 – расход топлива в КС через рабочие форсунки при $H = 0$,
 $p_{вх}^* = 1,0332 \text{ кгс/см}^2$, $T_{вх}^* = 288 \text{ К}$;

K_p, K_T – коэффициенты коррекции, учитывающие влияние давления, температуры воздуха на входе в двигатель, соответственно;

K_n – коэффициент коррекции, учитывающий изменение расхода воздуха, в зависимости от частоты вращения ротора высокого давления;

$K_{розж}, K_{ост}$ – коэффициенты коррекции расхода топлива в случае отсутствия роста $T_{ТНД}$ и при запуске «горячего» двигателя, соответственно;

$K_{G\delta}, K_\eta$ – коэффициенты коррекции, учитывающие изменение расхода воздуха и полноты сгорания в КС в высотных условиях, соответственно. Последняя величина определяется по осредненной зависимости для двигателей ГП «Ивченко-Прогресс».

Поскольку мировая тенденция развития малоэмиссионных КС идет по пути сжигания обедненной топливовоздушной смеси (ТВС) [3, 8], то для ее зажигания необходим мощный тепловой источник. Поэтому разработке и автономной доводке источника воспламенения требуется уделить особое внимание. Ясно, что с экономической и временной точек зрения наиболее целесообразно иметь базовый источник воспламенения для применения на различных двигателях.

Для ГТД, особенно авиационных, важна такая характеристика, как тепловая мощность на единицу массы. В настоящее время в ГТД реально нашли применение три способа воспламенения ТВС в КС:

- 1) система зажигания высокой энергии в комбинации со свечами поверхностного разряда;
- 2) система зажигания при помощи факельного воспламенителя;
- 3) система зажигания при помощи плазматрона.

Каждая из систем имеет свои преимущества и недостатки.

При этом в основу методологии автора, сформированной на основании

расчетных и экспериментальных работ, выполненных с его участием на ГП «Ивченко-Прогресс», в настоящее время заложено применение факельных воспламенителей для малоэмиссионных КС.

По сути, факельный воспламенитель (рис. 1) – это миниатюрная КС с простейшей системой регулирования подачи топлива, которая оптимизирована только на условия запуска и имеет непродолжительное время работы.



Рис. 1. Базовый факельный воспламенитель
разработки
ГП «Ивченко-Прогресс»

Главные преимущества применения факельного воспламенения таковы.

1. Высокая тепловая мощность (на один-два порядка выше, чем у других систем зажигания).

2. Высокий ресурс работы свечи зажигания и воспламенителя, поскольку все время, кроме запуска, они соприкасаются с холодным воздухом, поступающим из-за компрессора при отсутствии воздействия пламени со стороны жаровой трубы.

3. Низкая потребляемая мощность, а, следовательно, масса и стоимость источника питания свечи, вследствие целенаправленного проектирования для создания только самых благоприятных условий для розжига топлива свечой.

4. Возможность относительной свободы в установке воспламенителя относительно жаровой трубы вследствие его высокой тепловой мощности.

5. Возможность использования одного базового воспламенителя практически для всех типоразмеров выпускаемых двигателей. Это существенно сокращает затраты на доводку, закупку комплектующих и обслуживания.

ние.

6. Возможность за счет применения пульсирующей подачи топлива создавать оптимальный для поджига состав ТВС, в зависимости от атмосферных условий, без применения дополнительных специальных агрегатов.

7. Возможность проведения и внедрения усовершенствований и модернизации на базе типовой конструкции без изменения состава изделий.

8. Возможность отработки характеристик воспламенителя в автономных условиях на специальных стендах с низкими затратами.

9. Возможность создания базовых расчетных программ с высокой достоверностью получаемых результатов благодаря имеющейся опытной базе тестовых примеров.

10. Возможность параллельной доводки источника воспламенения и других элементов камеры сгорания.

Бытующее мнение о невозможности применения воспламенителей для быстрого встречного запуска не обосновано, так как опровергается практикой (например, двигатели АЛ-21Ф-3, Р29Б-300, АИ-222-25).

Все вышеизложенное позволяет факельным воспламенителям обладать лучшими удельными, эксплуатационными и стоимостными показателями по сравнению с другими способами воспламенения.

Следующим важнейшим этапом в формировании методологии обеспечения надежного запуска малоэмиссионных камер сгорания является правильный выбор фронтального устройства (ФУ). Ключевым моментом здесь является обеспечение его работы, как минимум, в двухзонном режиме, т.е. ФУ должно на режимах запуска и дросселирования двигателя иметь возможность создавать зоны с более богатой ТВС, чем на основных режимах работы. В этом направлении возможны следующие подходы.

1. Двухзонные КС с параллельным, последовательным и комбинированным расположением зон горения.

2. Однозонные КС с формированием двух и более зон горения за счет специальной организации течения и подачи топлива.

3. КС с регулируемой геометрией воздухоподводящих каналов для управления распределением воздуха между зонами горения.

4. КС, объединяющие перечисленные выше подходы.

Формирование двух и более зон при одноконтурной системе подачи топлива в однозонной камеры сгорания – экономически наиболее целесообразное решение, поскольку упрощается система регулирования подачи топлива, снимаются вопросы его коксования на режимах частичной разгрузки и существенно сокращается количество и номенклатура деталей.

Немаловажным фактором является выбор способа распыла топлива: высоким давлением или аэродинамического. По мнению автора, аэродинамический распыл является наиболее целесообразным по следующим основным причинам.

1. Не требуется высоких давлений в системе топливопитания, что способствует ее высоким эксплуатационным ресурсам.

2. Возможно создание более простых, надежных и менее дорогих одноконтурных систем подачи топлива.

3. Однозначная структура течения ТВС вне зависимости от давления топлива и режима работы двигателя.

Все это обеспечивает системам с аэродинамическим распылом более высокую экономическую эффективность.

Такое двухзонное фронтное устройства с аэродинамическим распылом и одноконтурной системой подачи топлива было разработано при непосредственном участии автора и реализовано в КС ГП «Ивченко-Прогресс».

Таким образом, в ФУ малоэмиссионных камер сгорания на режимах запуска должны создаваться обогащенные топливом зоны, которые на основных режимах работы, по возможности, должны отсутствовать. Предпочтительно создание указанных зон за счет специальной аэродинамики ТВС.

Поскольку реализация данной концепции своей конечной целью ставит завоевание сегмента рынка в составе ГТД, то на этапе эскизного проектирования необходим выбор наиболее оптимального варианта решения проблемы запуска малоэмиссионной КС по критерию выполнения технического задания при минимальных технических рисках, финансовых и временных затратах. Естественно, что такой подход требует иметь уже до

этапа передачи в производство проверенные технические решения по освоенным выше проблемам.

Указанные финансово-экономические аспекты требуют в случае принятия варианта с новыми техническими решениями, влияющими на процесс запуска, после всесторонней теоретической, конструкторской, технологической и экономической проработки ввести этап научно-исследовательских работ, который включает следующие подэтапы.

1. Разработка, как правило, значительно более дешевых упрощенных лабораторных моделей, оптимизированных для автономных экспериментальных исследований при минимальных затратах. Опыт автора показывает, что при разработке новых вариантов наиболее целесообразно отработку процессов запуска вести на одnogорелочных отсеках с ФУ и источником воспламенения, максимально близкими к применяемому на полноразмерной камере сгорания. После такой отработки в практике ГП «Ивченко-Прогресс» не требовалось вводить конструкторские изменения в полноразмерную камеру сгорания. В свою очередь, в случае новизны сам источник воспламенения отдельно проходит автономную экспериментальную отработку.

2. Перед началом испытаний очень важно иметь хорошо спланированные экспериментальные исследования с четко поставленными задачами и целями, которые требуют определить диапазон устойчивого запуска в заданных условиях эксплуатации. Любой следующий этап испытаний должен начинаться после глубокого анализа предыдущего.

3. Продолжительность отработки КС в значительной мере определяется длительностью получения информации о ее рабочем процессе. В последнее время для этой цели, наряду с натурными экспериментами, все шире применяется численное моделирование. Обладая свойством полноты информации, получаемой в результате расчета, численный эксперимент позволяет в значительной мере сократить объем, сроки и, следовательно, стоимость экспериментальной отработки КС. Такое сокращение возможно благодаря более глубокому анализу рабочего процесса камеры сгорания и, вследствие этого, более рациональному планированию экспериментальных исследований. В ходе совместного использования натур-

ного и численного экспериментов проводится сопоставление данных, которое служит основанием для корректировки программ испытаний и систем измерений.

4. Этап автономных лабораторных исследований должен закончиться корректировкой теоретических, конструктивных и технологических решений для применения в полноразмерном объекте.

Современный коммерческий подход к созданию ГТД требует сокращения сроков их разработки до 2 ... 4 лет и стопроцентного исключения технических рисков, поэтому значительные доводочные работы, связанные с существенной переделкой материальной части, недопустимы. По сути, должна быть выполнена экспериментальная проверка характеристик запуска камеры сгорания на полноразмерном двигателе в объеме сертификационных испытаний. Как показывает опыт, максимум, что можно допустить на этом этапе без существенных экономических и маркетинговых потерь – это корректировка критериальных зависимостей, заложенных в электронную систему регулирования двигателя. Поэтому необходимо иметь технологический блок, который позволял бы оперативно в процессе испытаний за счет заранее предусмотренных регулируемых величин подправлять алгоритм запуска по выданным рекомендациям. После выполнения данной работы завершаются необходимые сертификационные работы по запуску.

Выводы и перспективы дальнейших разработок в данном направлении. Исходя из вышеизложенного, предлагается следующая концепция решения проблемы запуска малоэмиссионных КС ГТД.

1. Проработка теоретических и конструктивных решений вариантов запуска КС и оценка их экономической эффективности.

1.1. На основании обобщения имеющихся знаний и опыта разработка сравнительно простых критериальных зависимостей для алгоритмов запуска КС.

1.2. Разработка базового источника воспламенения.

1.3. Разработка базового ФУ КС.

1.4. Выбор наиболее оптимального варианта запуска камеры сгорания по критерию выполнения технического задания при минимальных затра-

тах.

2. Дополнительные мероприятия для случая принятия варианта с новыми техническими решениями, влияющими на процесс запуска камеры сгорания.

2.1. Разработка упрощенных лабораторных моделей, оптимизированных для автономных экспериментальных исследований.

2.2. Автономные экспериментальные исследования на моделях.

2.3. Численное моделирование отдельных аспектов рабочего процесса КС, имеющих непосредственное отношение к запуску, с целью корректировки технологии испытаний.

2.4. Корректировка теоретических и конструктивных решений по результатам лабораторных автономных экспериментальных исследований.

3. Работы по обеспечению сертификации двигателя по пусковым характеристикам.

3.1. Экспериментальная проверка характеристик запуска КС на полномасштабном двигателе и исследуемом объекте.

3.2. Корректировка критериальных зависимостей по результатам испытаний двигателя.

3.3. Сертификационные испытания на двигателе.

Перспективы дальнейших методологических исследований в направлении решения проблемы запуска малоэмиссионных КС автор видит в разработке интеграционных основ для внедрения последних достижений в области измерительной техники, вычислительных технологий, статистических и эвристических методов анализа.

Литература

1. Энергия. Экология. Будущее / В.П. Семиноженко, П.М. Канило, В.Н. Остапчук, А.И. Ровенский. – Х.: Прапор, 2003. – 464 с.
2. Христич В.А., Тумановский А.Г. Газотурбинные двигатели и охрана окружающей среды. – К.: Техніка, 1983. – 144 с.
3. Постников А.М. Снижение оксидов азота в выхлопных газах ГТУ. – Самара: СНЦ РАН, 2002. – 286 с.
4. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД. – М.: Мир, 1986. – 566 с.
5. Крюков А.И. Некоторые вопросы проектирования ГТД. – М.: МАИ,

1993. – 336 с.

6. Некоторые вопросы проектирования авиационных газотурбинных двигателей / Е.А. Гриценко, В.П. Данильченко, С.В. Лукачев, Ю.Л. Ковылов, В.Е. Резник, Ю.И. Цыбизов. – Самара: СНЦ РАН, 2002. – 527 с.

7. Опыт создания малотоксичных камер сгорания ГТУ / Н.И. Мясников, А.В. Сударев, В.А. Акулов. – М.: ЦНИИТЭИтяжмаш, 1991. – 52 с.

8. Схемы современных камер сгорания авиационных двигателей. – М.: ЦИАМ, 2002. – 47 с. (Аналитический обзор № 401).

9. Лукьяненко А.М. Влияние режимных и конструктивных факторов на уровень эмиссии токсичных веществ в камере сгорания ГТД: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Казань: КАИ, 1984. – 20 с.

10. Максимов Д.А. Закономерности образования окислов азота при сжигании предварительно подготовленной смеси в камерах сгорания наземных установок на базе авиационных ГТД: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Уфа: УГАТУ, 1998. – 24 с.

11. Дубовкин Н.Ф. Воспламенение топливовоздушной смеси в камерах сгорания газотурбинных двигателей // Техн. отчет № 160. – Ин-т им. П.И. Баранова, 1961. – 19 с.

12. Запуск авиационных газотурбинных двигателей / М.А. Алабин, Б.М. Кац, Ю.А. Литвинов. – М.: Машиностроение, 1968. – 228 с.

13. Литвинов Ю.А., Боровик В.О. Характеристики и эксплуатационные свойства авиационных турбореактивных двигателей. – М.: Машиностроение, 1979. – 288 с.

14. Зубков П.Г. Исследование процесса воспламенения при запуске камер сгорания малоразмерных ГТД: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Самара: СГАУ, 1991. – 16 с.

15. Гизатуллин Ф.А. Системы зажигания двигателей летательных аппаратов. – Уфа: УГАТУ, 1998. – 115 с.

16. Высочин В.А. Исследование характеристик рабочего процесса и анализ возможности форсирования пусковых воспламенителей авиационных газотурбинных двигателей // Вестник двигателестроения. – 2004. – № 1. – С. 116 – 120.

17. Муравченко Ф.М. Концепция решения проблем создания и доводки семейства высокоэффективных ТРДД с большой степенью двухконтурности: Автореф. дисс. ... докт. техн. наук. – Х.: ХАИ, 1990. – 57 с.

18. Элементы методологии проектирования и теории камер сгорания ГТД, ГТУ / Ю.Л. Ковылов, С.В. Лукачев, А.М. Цыганов // Вестник СГАУ. – 1998. – Вып. 1. – С. 165 – 189.

19. Мингазов Б.Г. Внутрикамерные процессы и автоматизированная доводка камер сгорания ГТД. – Казань: КГТУ, 2000. – 167 с.

20. Mongia H.C. A Synopsis of Gas Turbine Combustor Design Methodology Evolution of Last 25 Years // 15th International Symposium on Airbreathing Engines (XV ISABE). – Bangalore, India. – September 2 – 7, 2001 (ISABE 2001-1086).

21. Опыт создания и направления дальнейшего совершенствования малотоксичных камер сгорания ГТД и ГТУ / В.Н. Лавров, А.М. Постников, Н.В. Церерин, Ю.И. Цыбизов, В.В. Беляев // Вестник СГАУ. – 2002. – № 2 (2). – С. 65 – 70.

22. Опыт создания и совершенствования низкоэмиссионных камер сгорания ГТУ АЛ-31СТ / В.М. Чепкин, Е.Ю. Марчуков, В.В. Куприк, С.А. Федоров, В.Г. Гончаров // Конверсия в машиностроении. – 2003. – № 5. – С. 78 – 80.

23. Митрофанов В.А. Камеры сгорания газотурбинных двигателей: математическое моделирование, методология расчета, концепция оптимального проектирования: Автореф. дисс... докт. техн. наук. – С.-Пб: СПбПУ, 2004. – 32 с.

24. Кравченко И.Ф., Гусев В.Н. Выбор объема жаровой трубы на этапах технического предложения и эскизного проектирования // Международная научно-техническая конференция «Интегрированные компьютерные технологии в машиностроении ИКТМ'2004»: Тез. докл. – Х.: Национальн. аэрокосм. ун-т «ХАИ». – 2004. – С. 84.

25. Эвристическая оптимизация характеристик запуска ГТД с малоэмиссионной камерой сгорания / В.Ф. Безъязычный, О.В. Виноградова, А.В. Охлобыстин, В.Н. Шишкин // Полет. – 2004. – № 12. – С. 47 – 50.

26. Костюк В.Е., Кравченко И.Ф. Анализ современных подходов к прогнозированию пусковых и срывных характеристик камер сгорания ГТД. I. Макромоделирование // Авиационно-космическая техника и технология. – 2004. – № 4 (12). – С. 48 – 55.

27. Костюк В.Е., Кравченко И.Ф. Анализ современных подходов к прогнозированию пусковых и срывных характеристик камер сгорания ГТД. II. Моделирование на микроуровне // Авиационно-космическая техника и технология. – 2004. – № 7 (15). – С. 59 – 68.

Поступила в редакцию 29.03.2005