

ПРИМЕНЕНИЕ ВИХРЕВОГО ЭФФЕКТА В РАСЧЕТЕ КАМЕР СГОРАНИЯ ГТД

© 2009 В.П. Алексеенко¹, В.В. Бирюк², С.А. Гулина², М.Ю. Орлов², Ю.А. Синеговский²

¹ Поволжское отделение Секции прикладных проблем РАН, Самара

² Самарский государственный аэрокосмический университет

Поступила в редакцию 27.04.2009

Изложен опыт использования теорий вихревого эффекта при расчете камер сгорания газотурбинных двигателей.

Ключевые слова: авиационное, ракетостроение, системы термостатирования, вихревой эффект.

Аэродинамические процессы занимают важное место в проектировании камер сгорания газотурбинных двигателей (ГТД) и в конечном итоге определяют достижение ими заданных характеристик. Правильно спроектированная в аэродинамическом отношении камера сгорания ГТД позволяет сократить время на ее доводку, а значит и на весь цикл, предшествующий запуску ГТД в серийное производство.

К настоящему времени разработано большое количество различных типов камер сгорания ГТД (трубчатые, кольцевые и трубчато-кольцевые), различающихся по конструктивному и схемному исполнению, размерам и способам подачи топлива. Однако их анализ показывает, что всем этим устройствам свойственны определенные общие черты. Так, конструкторы камер сгорания стремятся уменьшать скорости потока в диффузорах и кольцевых каналах, оптимально распределять воздух по всем зонам горения в заданных количествах, избегать образования отрывных зон и т.д.

С точки зрения организации процесса горения в камерах сгорания принято выделять три зоны: первичную зону горения, промежуточную и зону разбавления (иногда две последние называют вторичной зоной). Каждая из этих зон выполняет свою задачу.

Так, в первичной зоне создаются условия для стабилизации пламени, обеспечиваются необходимые времена пребывания, температура, интенсивность турбулентности с целью достижения высокой полноты сгорания. Первичные зоны делят на два типа – “коробчатые”, с круп-

номасштабной циркуляционной зоной и “многощелевые” с вихрями меньшего масштаба.

Промежуточная зона выполняет две основные функции. На малых высотах полета в ней обеспечивается догорание топлива в переобогащенных локальных объемах, а на больших высотах полета промежуточная зона становится продолжением первичной, увеличивая время пребывания газов при высокой температуре.

В зоне разбавления воздух, не участвующий в горении топлива и в охлаждении стенок жаровой трубы подается в нее с целью формирования необходимой эпюры поля температур для турбины.

Сравнительно давно замечено [1], что в зонах горения и разбавления важную роль играют процессы смешения. Эти процессы позволяют добиться в первичной зоне горения высоких скоростей горения, снизить образование сажи и окислов азота, получить равномерное поле температур в выходном сечении камеры сгорания. Вместе с тем, для успешного аэродинамического расчета камер сгорания необходимо знать структуру циркуляционной зоны, глубину проникновения струй и коэффициенты расхода для всех типов отверстий, включая щели охлаждения. Без этого невозможно определить размеры камеры сгорания, потери давления и параметры потока.

Наиболее важными при проектировании камер сгорания авиационного типа являются такие безразмерные параметры как отношение падения полного давления в камере к полному давлению на ее входе и отношение падения полного давления к характерному скоростному напору. Первый параметр иногда называют общими потерями давления и выражают в процентах, а второй коэффициент потерь давления. Второй параметр наиболее интересен для конструктора ГТД, так как он определяет сопротивление потоку газов на участке между компрессором и турбиной. Если общие потери давления зависят от режима работы двигателя, то коэффициент потерь является постоянной характеристикой,

Алексеенко Василий Павлович, кандидат технических наук, доцент, член Секции. E-mail: Alekseenko_v@mail.ru.
Бирюк Владимир Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры теплотехники и тепловых двигателей. E-mail: Teplotex_ssau@bk.ru.

Гулина Светлана Александровна, аспирант.

Орлов Михаил Юрьевич, кандидат технических наук, доцент.

Синеговский, Юрий Алексеевич, аспирант.

учитывающей в основном падение давления в таком узле как диффузор и падение давления на стенках жаровой трубы.

Как правило, на практике возможности уменьшения потерь в диффузоре минимальны, так как обычно их конструктора не допускают ошибок при их проектировании. Снижение потерь на жаровой трубе ограничено тем, что высокий перепад давления на ее стенках способствует улучшению процессов горения и перемешивания в камере сгорания, так как вследствие него увеличивается скорость и углы вытекания струй и повышается интенсивность турбулентности. Поэтому снижение потерь может привести к ухудшению перемешивания и необходимости увеличения длины жаровой трубы.

Таким образом, для уменьшения потерь давления обычно приходится бороться с потерями давления на жаровой трубе. Для решения этой задачи могут быть использованы различные методики-продувки отсеков и полноразмерных камер сгорания, расчеты по эмпирическим и статистическим зависимостям и т.д. В последнее время все более широко распространяется такой метод аэродинамического расчета, как прикладное использование специальных компьютерных программ. Это вызвано тем, что остальные методики не дают достоверных или полных результатов. Так например эксперименты проводимые в отсутствие горения, не учитывают всех условий, происходящих на реальном ГТД при его работе.

Компьютерное моделирование позволяет учесть ряд параметров, влияющих на аэродинамику камеры сгорания, а кроме того рассмотреть изменение этого влияния в зависимости от других факторов. Так, например угол ввода струи через отверстие в жаровой трубе изменяет эффективное значение площади отверстия и связан с коэффициентом расхода через это отверстие. Между тем на этот угол могут оказывать влияние в свою очередь такие параметры как: тип отверстия (плоское, круглое, с отбортовкой), отношение шага отверстий к их размерам, перепад давления на жаровой трубе и т.д. В конечном итоге все это также влияет на траектории струи и на глубину ее проникновения в поток. При рассмотрении группы отверстий без использования компьютерного моделирования практически невозможно оценить их взаимное влияние и характеристики на количественном уровне, хотя на качественном конечно очевидно, что глубина проникновения ряда струй меньше, чем у одиночной струи, а глубина проникновения возрастает с увеличением шага между отверстиями.

Для организации процесса горения также очень важно рассмотрение смещения струй. Так, улучшение перемешивания в первичной зоне

камеры сгорания способствует повышению эффективности горения и уменьшению образования вредных веществ. В промежуточной зоне интенсификация перемешивания струй воздуха с газами из первичной зоны ускоряет преобразование промежуточных продуктов горения в конечные. В выходном сечении камеры сгорания качественный профиль температуры также может быть получен только при обеспечении смешения воздуха и продуктов сгорания в зоне разбавления. Между тем процесс перемешивания между струями воздуха и горячими газами зависит от большого количества различных факторов, таких как: форма отверстий, откуда вытекает струя, угол ввода струи, отношение скоростей воздушного и газового потоков, отношение их плотностей, турбулентность струй, наличие соседних отверстий и их характеристики и т.д. Совершенно очевидно, что рассмотрение такого количества взаимовлияющих факторов и их анализ в условиях натуральных как "холодных", так и "огневых" испытаний невозможно. Между тем это возможно с использованием определенных пакетов программ, относящихся к САЕ-системам.

Сложность практического использования САЕ-систем для расчетов параметров потоков текучих сред заключается в том, что для расчета эти системы зачастую представляют собой "черный" ящик. То есть известны входные параметры для системы, получаемые выходные, но неизвестен алгоритм расчета и используемые в нем подходы. Наиболее детально ознакомлен с методикой расчета, как правило, только разработчик программы, который не спешит сделать доступными свои знания. В таких условиях невозможно целиком доверять получаемым в ходе расчета данным, что снижает его эффективность. Выход из положения на первом этапе видится в проведении предварительных оценочных расчетов с помощью имеющихся методик, сопоставлении их результатов с расчетами в САЕ-системах и коррекция последних.

Многие процессы, происходящие в реальных камерах сгорания ГТД, связаны с закрученными потоками. Несмотря на объемные исследования в данной области на сегодняшний день нет единой гипотезы, позволяющей дать ответы на все вопросы, связанные с проблемами изучения вихревых течений. Это связано с тем, что многие из работ в этой области концентрировали свое внимание на создании конкретных технических устройствах, использующих вихревые течения. При этом не всегда рассматривались вопросы, касающиеся, например энергоразделения в газовых потоках, имеющих место в камерах сгорания ГТД. Между тем энергоразделение в газовых потоках существенно влияет на ряд процессов в

камерах сгорания. Тем не менее, имеющиеся на сегодняшний день гипотезы каждая по своему стараются объяснить этот процесс и подводят под него свое математическое обоснование.

Исследования в области вихревых потоков были начаты за рубежом Ж. Ранком, Р. Хилшем и продолжены в нашей стране А.П. Меркуловым, А.В. Мартыновым, В.П. Алексеевым, В.И. Метениным, В.Т. Воловым, Ш.А. Пиралишвили, В.В. Бирюком и другими учеными.

К настоящему времени выдвинут ряд гипотез, которые хотя и являются спорными, но освещают различные качественные и количественные соотношения энергоразделения в газовых потоках, дополняя друг друга. Вот наиболее существенные из них [2]:

- гипотеза радиальных потоков энергии в поле центробежных сил;
- гипотеза энергоразделения в результате формирования вынужденного вихря в сопловом аппарате;
- гипотеза конвективного противоточного теплообмена в поле центробежных сил;
- гипотезы на основе максвелловского распределения скоростей молекул;
- гипотезы расчета характеристик вихревых труб на основе теории подобия;
- гипотеза взаимодействия вихрей.

Основные положения гипотезы радиальных потоков энергии в поле центробежных сил были высказаны Ранком, Хилшем, Росбуком, Каснером и Кноершильдом, Фултоном, В.М. Бродянским и А.В. Мартыновым, Б.С. Стечкиным, Л.А. Вулисом, М.Е. Дейчем, М.Г. Дубинским. Суть гипотезы сводится к следующему. Энергоперенос в газе обусловлен взаимодействием двух энергетических потоков: потока кинетической энергии, направленного от осевых слоев к периферийным, и потока тепла имеющего противоположное направление. В связи с тем, что поток кинетической энергии превосходит тепловой, наблюдается понижение температуры торможения осевых слоев и повышение периферийных. Соотношение энергий и температур выражается:

$$\frac{dE_k}{dQ_r} = 2 \text{Pr}^*; \tag{1}$$

$$\frac{(\Delta T)_{\max}}{\Delta T_s} = 1 - 0,5 \cdot \text{Pr}^*. \tag{2}$$

Гипотеза не нашла экспериментального подтверждения, так как эффекты охлаждения значительно превысили теоретические.

Гипотеза энергоразделения в результате формирования вынужденного вихря в сопловом сечении базируется на работах Л.А. Вулиса., В.М.

Бродянского, М.Л. Лейтеса, М.Е. Дейча, М.Г. Дубинского. Суть гипотезы в том, что при квазитвердом вращении газа статическая температура осевых слоев больше статической температуры периферийных. Из-за градиента температур в сечении трубы происходит выравнивание статической температуры и, следовательно, перераспределение полной температуры. Как показали эксперименты эта гипотеза дает только качественное представление о структуре вихря и не может быть использована в расчетах.

Гипотеза конвективного противоточного теплообмена в поле центробежных сил является наиболее реальной по реальной физической картине течения. Наиболее яркие представители группы ученых, поддерживающих эту гипотезу: Шепер, А.И. Гуляев, Рейнольдс, Хинце, Ван Диметр, В.И. Кузнецов. При этом, например Шепер рассматривает ламинарную, а А.И. Гуляев – турбулентную картину теплообмена. Гипотезы, в основу которых положено максвелловское распределение скоростей молекул были выдвинуты такими учеными, как Эрделаи, Милтон и Рудкин, Оттен, Готц, В.А. Сафонов. С их точки зрения основой энергоразделения является неравномерное распределение кинетической энергии между молекулами газа из-за градиента давления или сил в центробежном поле. “Быстрые” молекулы собираются в периферийной области, а “медленные” в приосевой, что и вызывает эффект энергоразделения. Основные соотношения получены с учетом трансляционного молекулярного движения с последующим перенесением результатов на все состояния газа с учетом общего числа степеней свободы и образовавшихся макроскопических флуктуаций. Но данная гипотеза не имеет конкретных методов расчета и не позволяет дать качественную оценку явления.

Гипотезы расчета характеристик вихрей на основе теории подобия обеспечивают возможность количественного расчета вихревого течения на основе термогазодинамического анализа вихревого эффекта. Если использовать все переменные, влияющие на вихревое энергоразделение, то получается одиннадцать безразмерных комплексов, входящих в критериальное уравнение. Решение этого уравнения получить не удалось. Предлагается за определяющий параметр принять число Россби $Ro = C_\phi / C_{oc}$, характеризующее отношение тангенциальной скорости потока к осевой, и для улучшения работы ВТ использовать оптимальный коэффициент нагрузки $K_{ном} = \bar{f} \cdot \pi^{1/k}$, при котором достигаются наивысшие значения температурной эффективности.

Гипотеза взаимодействия вихрей в настоящее время наиболее убедительно отражает сущность физических явлений и позволяет наиболее полно математически описать характеристики закрученных потоков. Эта гипотеза выдвинута А.П. Меркуловым и его учениками и последователями.

Рассмотрение всех этих гипотез показывает, что, несмотря на свои достоинства и недостатки каждая из них имеет определенные преимущества при ее использовании в определенных условиях. То есть, все эти гипотезы могут быть использованы в качестве единого комплекса совместно с САЕ-системами. Не имея возможности полностью ознакомиться с теориями положенными в основу расчета конкретных САЕ-систем, рационально использовать комбинированный метод расчета, по своей структуре напоминающий метод последовательных приближений. Основы данного метода применительно к расчету течений в камерах сгорания были разработаны в СГАУ профессором В.В. Бирюком и доцентом М.Ю. Орловым. Данный метод в первом приближении был опробован на простейших моделях, при расчете течений одиночных струй, их пересечении и смещении с другими струями под различными углами.

Задавались характеристики свободных вихрей после истечения из различных сопел и отверстий, затем рассматривалось изменение их структуры, устойчивости и разрушение за счет контакта с другими вихревыми структурами и стенками. Рассматривалось влияние закрутки на градиент статического давления в вихревом потоке и смещение вихря. При этом наблюдалось изменение турбулентности и ее влияние на характеристики вихря. Было установлено, что как и при опытах с вихревыми трубами, радиальное перемещение турбулентного элемента газа происходит за счет радиальной турбулентной пульсационной скорости. При этом попадая в зону более высокого или низкого давления, элемент адиабатно сжимается или расширяется.

Используя законы распределения скоростей для вихрей, условия механического равновесия газа, изоэнтропного распределения статической температуры по радиусу вихря, механической и тепловой сопряженности вихрей, можно получить выражения для распределения параметров по щели подвода воздуха. На первом этапе все расчеты выполнялись для отдельных участков вторичной зоны камеры сгорания, без учета горения.

На втором этапе от рассмотрения отдельных течений (струй) перешли к расчету характеристик по сечениям, находящимся во вторичной зоне камеры сгорания. При этом начали обрабатывать расчет взаимодействия вихрей и его влия-

ние на картину, имеющую место в камере сгорания (например на распределение воздушных масс). Путем предварительного расчета с помощью теоретических зависимостей в САЕ-системах подбирались модели, наиболее соответствующие, получаемой картине. Затем оба результата сопоставлялись с ранее полученными экспериментальными данными. Следует отметить, что на данном этапе в виду сложности поставленной задачи не во всех расчетах удалось добиться точного совпадения между расчетными и экспериментальными зависимостями. Но авторы данной статьи и не ставили перед собой такой задачи. В настоящий момент, при наработке опыта по использованию САЕ-систем (например таких как ANSYS CFX) при решении гидрогазодинамических и тепловых задач необходимо разработать методики совместного использования стандартных расчетов и компьютерных пакетов. А эта задача, как показало данное исследование, может быть успешно решена.

На следующем этапе исследования планируется выполнить расчеты с учетом процессов горения и соответствующих им изменений. При этом турбулентные потоки также играют очень большую роль. Их точный расчет позволяет сформировать, например, оптимальное поле температур на выходе из камеры сгорания. Температура элементарного объема газа у выхода из камеры сгорания зависит от всего процесса его движения, начиная с выхода из компрессора [1]. При прохождении камеры сгорания температура и состав газа быстро меняются под влиянием процессов горения, теплообмена и перемешивания, которые как известно на сегодняшний день изучены достаточно хорошо. Так, на завершающий процесс смешения газов сложным образом влияют размеры и форма жаровой трубы, перепад давления на ее стенках, размеры, форма и коэффициенты расхода отверстий, распределение воздуха по различным зонам камеры сгорания и распределение температуры газа, поступающего в зону разбавления. В свою очередь для конкретных камер сгорания это распределение температур очень сильно зависит от характеристик распыливания топлива - размеров капель, угла топливного факела и дальности. В этих процессах также достаточно велика роль вихревых структур. Обычно эксперименты показывают, что поля температур в значительной степени изменяются при изменении характеристик распыливания, поэтому чаще всего доводка камер сгорания по этому параметру проводится при максимальных давлениях подачи топлива, так как этот тепловой режим соответствует максимальным тепловым потокам к лопаткам соплового аппарата и к рабочим лопаткам. Тем не менее, использование САЕ-систем позво-

ляет расширить поле экспериментов при снижении их стоимости, а с учетом того, что анализ других режимов также представляет интерес для конструктора, такая возможность должна быть реализована. Первые наработки по расчету процессов смешения топлива с воздухом уже получены в СГАУ и работы в этой области успешно продолжаются.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *А.Лефевр*. Процессы в камерах сгорания ГТД. – М.: Мир, 1986. 567 с.
2. *Алексеенко В.П., Бирюк В.В., Леонович Г.И., Лукачев С.В.* Вихревые системы термостатирования авиационного оборудования. – Самара: СамНЦ РАН, 2005. 177 с.

VORTICAL EFFECT USAGE IN CHARACTERISTICS CALCULATION OF AIRCRAFT ENGINES

© 2009 V.P.Alekseenko¹, V.V.Biryuk², S.A.Gulina², M.Y.Orlov², Y.A.Sinegovsky²

¹ Section of Applied Problems, Russian Academy of Sciences, Samara,

² Samara State Aerospace University

In issue describes vortical effect usage in characteristics calculation of combustion chambers in aircraft engines.

Key words: aircraft engineering, rocket production, thermoregulation systems, vortical effect, aircraft.

*Vasily Alekseenko, Candidate of Technics, Associate Professor, Member of section. E-mail: Alekseenko_v@mail.ru.
Vladimir Biryuk, Doctor of Technics, Professor. E-mail: Teplotex_ssau@bk.ru.
Svetlana Gulina, Graduate Student.
Mikhail Orlov, Candidate of Technics, Associate Professor.
Yuri Sinegovsky, Graduate Student.*