

ВВЕДЕНИЕ В ЗАДАЧУ РАСЧЁТА ПАРАМЕТРОВ КАМЕРЫ СМЕШЕНИЯ ТУРБОРЕАКТИВНОГО ДВУХКОНТУРНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФОРСАЖНОЙ КАМЕРОЙ СГОРАНИЯ

© 2021

О. Д. Карев инженер-конструктор;
Объединённая двигателестроительная корпорация, г. Москва;
karev-od@uecrus.com

Рассмотрена проблема повышения точности вычислений при использовании математических моделей газотурбинных двигателей 2-го уровня сложности на примере устройства смешения потоков наружного и внутреннего контуров газотурбинного двигателя, предложены методы её решения. Процессы, происходящие в камерах смешения воздушно-реактивных двигателей, считаются сложными для математического моделирования, поскольку в них одновременно происходит обмен кинетической и тепловой энергиями потоков, имеющих разные скорости, давления, температуры и химический состав. Смеситель не только обеспечивает перемешивание потоков из разных контуров двигателя, но и служит своеобразным дросселем. Он регулирует давление за вентилятором и, следовательно, расход воздуха в наружном контуре и таким образом оказывает непосредственное влияние на характеристики вентилятора и распределение потоков по контурам двигателя. В работе представлены зависимости параметров рабочего процесса, позволяющие более точно верифицировать модели смесителей 2-го уровня сложности.

Одномерное моделирование; газотурбинный двигатель; смеситель; камера смешения; верификация

Цитирование: Карев О.Д. Введение в задачу расчёта параметров камеры смешения турбореактивного двухконтурного двигателя с форсажной камерой сгорания // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2021. Т. 20, № 3. С. 57-64. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-3-57-64

Введение

В настоящей работе рассматривается математическая модель двухконтурного турбореактивного двигателя с камерой смешения и общей форсажной камерой сгорания. Модель предназначена для проведения термогазодинамических расчётов проточной части и общих параметров газотурбинного двигателя (ГТД). В работе ставится вопрос о создании и видоизменении методики расчёта камеры смешения в одномерной постановке.

Процессы, происходящие в камерах смешения воздушно-реактивных двигателей, считаются наиболее сложными для математического моделирования, поскольку в них одновременно происходит обмен кинетической и тепловой энергиями потоков, имеющих разные скорости, давления, температуры и химический состав. Кроме того, в отличие от идеализированной модели смешения двух параллельных потоков, в реальности потоки движутся под углом к друг другу, причём разные части потока под разными углами. Фактически имеется бесконечное число струек тока, каждая из которых имеет свой режим течения [1].

Смеситель не только обеспечивает перемешивание потоков из разных контуров, но и служит своеобразным дросселем. Он совместно с выходным устройством регулирует давление за вентилятором и, следовательно, расход воздуха во втором контуре, оказывая непосредственное влияние на линию рабочих режимов вентилятора и распределение потоков по контурам двигателя.

В отличие от систем конечно-элементных расчётов, в методиках расчёта двигателя принимается упрощённая модель смесителя, характеризующаяся интегральными по

контурам расходами воздуха или газа, температурой, давлением и химическим составом на входе в смеситель и интегральными расходом, давлением, температурой и составом газа на выходе из смесителя.

Используется несколько основных геометрических показателей, определяющих режим течения воздуха или газа. Классический пример системы «смеситель – сопло» показан на рис. 1 [2].

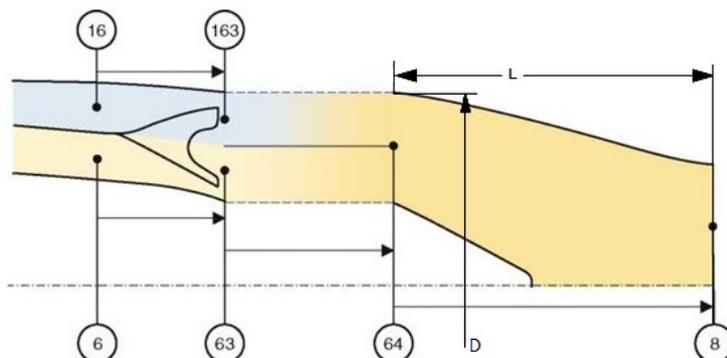


Рис. 1. Система «смеситель – сопло»

Данная система позволяет определить необходимые для расчёта двигателя в целом и его узлов интегральные параметры с достаточной точностью и скоростью вычислений, но не способна точно определить детальное состояние участков самого смесителя.

Условная расчётная модель в этой постановке, например в программе Gasturb, представляет собой следующие участки, которые разделены сечениями, характерными для рассматриваемой модели: участки 16–163 и 6–63 – это каналы горячего газа и воздуха соответственно, в которых потоки разграничены и смешения не происходит. Имеют место только потери давления заторможенного потока. Температуры неизменны.

Затем на участке 163(63)–64 механическая граница пропадает, но смешения потоков ещё не происходит. Статические давления потоков не равны. Происходит адиабатический процесс, при котором изменяются сечения потоков и они переходят к параллельному течению, а уже после наступает участок смешения при постоянной площади. Потерь давления не происходит. Статические давления потоков равны, а условием такого равенства на данном участке является набор геометрических показателей смесителя, например, для кольцевого канала это выбранная площадь. На основе уравнений сохранения массы, импульса, энтальпии определяются параметры смеси.

Данная схема условна, поскольку потери давления, изменение площадей струй и смешение происходят на всех участках, но она позволяет с достаточной степенью точности рассчитать интегральные параметры условно смешанного потока для использования их в расчёте последующих элементов.

В реальности сечение участка 163(63) часто не является кольцевым и даже не всегда может быть однозначно определено. Но поскольку при расчёте двигателя принципиально важными являются условные площади участка 163–64, именно они считаются геометрическими характеристиками смесителя и должны быть определены в результате натурного или численного эксперимента.

В общем случае такие гидравлические площади не являются постоянными, так как определяются не только геометрическими размерами смесителя, но и параметрами входных потоков.

Постановка задачи

Смеситель служит для смешения газовых потоков внутреннего и наружного контуров для обеспечения более равномерных параметров перед форсажной камерой сгорания с целью организации эффективного процесса горения и уменьшения влияния изменения параметров потока наружного контура при изменении полётных условий. В настоящее время наиболее широко применяется камера смешения лепесткового типа (рис. 2).

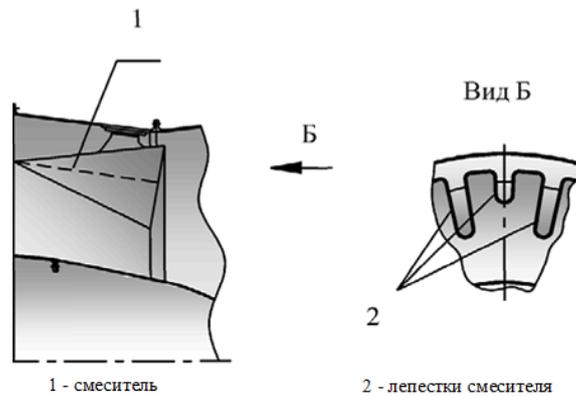


Рис. 2. Устройство камеры смешения лепесткового типа: 1 – смеситель; 2 – лепестки смесителя

Лепестковый смеситель имеет лепестки разной глубины для взаимного проникновения газовых потоков внутреннего и наружного контура друг в друга и применяется при степенях двухконтурности больше 0,3. При выборе количества лепестков принимается компромиссное решение между уровнем гидравлических потерь и степенью перемешивания потоков, необходимой для обеспечения устойчивого процесса горения во всей области эксплуатации двигателя [3].

В математической постановке задачи камера смешения считается цилиндрической. Аналогичный алгоритм используется во многих программах математического моделирования и обеспечивает расчёт процесса смешения двух газовых потоков. Во входных сечениях, как правило, не допускается режимов критического и сверхкритического течения. Расчёт процесса смешения ведётся из предположения равенства статических давлений потоков во входных сечениях камеры смешения.

Входными данными являются площадь выходного сечения камеры смешения, отношение площадей входных сечений.

Характеристика данного узла представляется зависимостью коэффициента гидравлических потерь от приведённой скорости потока, которая в настоящее время получается с использованием методологии конечно-элементного моделирования.

В результате трёхмерных расчётов определяется значение коэффициента восстановления давления заторможенного потока по проточной части камеры смешения для заданной геометрии на различных режимах работы двигателя. Путём изменения граничных условий задачи, прежде всего давлений, температур и расходов, возможно определение потерь давления заторможенного потока в широком диапазоне режимов работы двигателя. На основе результатов расчёта путём аппроксимации получается зависимость коэффициента гидравлических потерь, например от приведённой скорости газозоудшной смеси.

Важным моментом является выбор диапазона изменения входных параметров и «частоты экспериментов», что, с одной стороны, приводит к возрастанию объёмов, времени и стоимости решения задачи, с другой стороны – возможна потеря точности вследствие отсутствия понимания о качественных изменениях характера протекания процессов.

Полученные коэффициенты восстановления потерь давления заторможенного потока не являются «истинными». Чтобы их получить, использованы исходные данные, которые являются результатом расчёта одномерной математической модели с введёнными в неё потерями в первом приближении, уточнение которых приведёт к изменению работы двигателя. При этом изменение потерь давления заторможенного потока по внутреннему контуру повлияет на работу турбины низкого давления, а потери давления заторможенного потока по наружному контуру скажутся на пропускной способности сети за вентилятором (компрессором низкого давления), что приведёт к изменению степени повышения давления вентилятора, степени двухконтурности и соответствующему перераспределению расходов рабочего тела между контурами двигателя. Поэтому вопрос определения потерь давления заторможенного потока по проточной части камеры смешения для всех возможных режимов её работы представляет собой итерационную задачу, требующую больших вычислительных мощностей и времени.

Рассмотренные характеристики смесителя являются условными (используемую в настоящее время модель смесителя можно назвать регрессионной и она не позволяет в полной мере физически интерпретировать задачу) и именно они, а не геометрические размеры реального смесителя, позволяют рассматривать данный узел в системе двигателя на различных режимах. Такая задача является достаточно трудоёмкой, особенно для камер смешения перспективных двигателей, где смеситель не является топологически эквивалентным двум кольцевым каналам, как в классической методике расчёта двигателя. Возможный способ решения – создание модели смесителя первого уровня моделирования, то есть представление в виде формального описания характеристик смесителя в виде таблиц или аппроксимирующих зависимостей.

Методы решения

Данную задачу целесообразно решать в системе двигателя, где в зависимости от заданной геометрии камеры смешения определяются потери давления заторможенного потока и реализуется соответствующий режим работы двигателя с заданной точностью математического моделирования. Получить влияние реальной геометрии на параметры потока в системе двигателя на всех режимах – задача крайне сложная и может быть решена путём создания условной модели в одномерной постановке. Эта задача может быть решена либо натурно-модельным, либо численным экспериментом, в котором нужно определить параметры выходного потока при вариации входных условий, а затем на базе полученных результатов создать условную характеристику-модель узла, которая при аналогичных заданных условиях на входе будет выдавать правильные параметры на выходе. При этом, естественно, должны соблюдаться все законы сохранения и законы термодинамики и газодинамики применительно к поставленным условиям.

В процессе численного эксперимента должны быть определены интегральные характеристики потоков на входе и выходе устройства смешения и затем найдены зависимости от входных параметров для одномерного смесителя, дающего аналогичную картину смешения. Ввиду сложности определения интегральных характеристик потока вследствие высокой неравномерности полей температур и давлений целесообразно для получения характеристик ввести промежуточный этап – верификацию трёхмерной модели. Верификация должна проводиться путём сравнения достаточного количества экспериментальных данных с расчётными. В случае расхождения трёхмерная модель должна быть уточнена до получения приемлемого схождения. После верификации такую модель можно использовать как для расчётов в области проведённого эксперимента, так и на режимах, не прошедших экспериментальную проверку. Далее из результа-

тов трёхмерных расчётов могут быть найдены интегральные параметры в любом сечении устройства. На базе этих параметров уточняется одномерная модель узла в составе двигателя.

Основные результаты

Объектом численного моделирования была выбрана реальная система «смеситель – форсажная камера – сопло», трёхмерная модель которой верифицирована по результатам экспериментов двигателя-прототипа. Для такой модели расчётами на основе одномерной модели двигателя была составлена матрица входных параметров. Это позволяет расширить область расчётов до режимов, не прошедших экспериментальную проверку, но не выходящих за область эксперимента.

Затем для такой трёхмерной модели была составлена одномерная математическая модель, включающая в себя входное устройство, разделитель потоков, основную камеру сгорания, смеситель, форсажную камеру сгорания и сопло, причём расположенные до устройства смешения узлы необходимы для того, чтобы в полной мере воспроизводить входные условия эксперимента.

В первой итерации логика закона управления двигателя заключалась в воспроизведении полученных трёхмерными расчётами данных как на входе, так и на выходе из устройства смешения, а именно: были заданы температуры и давления на входе-выходе узла «смеситель», степень двухконтурности и суммарный расход воздуха, что вкуче определило работу рассматриваемого узла. При этом на области рассматриваемых режимов работы были получены значения коэффициентов восстановления давления заторможенного потока, а также коэффициенты коррекции статического давления внутреннего и наружного контуров в сечениях на входе в камеру смешения, которые фактически отражают осреднённый угол между потоками.

Для полученного банка данных, состоящего из параметров на входе и выходе из устройства смешения, а также отмеченных выше коэффициентов, были рассмотрены различные зависимости, наиболее интересной из которых оказалась зависимость коэффициентов коррекции давления по контурам от соотношения давлений, полученных в результате трёхмерного расчёта. Аналогичным образом для узла «форсажная камера сгорания» получена зависимость коэффициента потерь давления заторможенного потока от числа Маха во входном сечении в узел. Такие зависимости были занесены в виде формул со степенью точности, определяемой полиномом третьего порядка, в одномерную математическую модель.

В заключение был получен закон управления двигателя, где в качестве параметров, задающих режим, были лишь параметры входного сечения смесителя, а выходные параметры являются проверочными для полученных зависимостей.

На рис. 3 – 5 приведены основные результаты работы. Здесь (3-d) – результаты трёхмерных расчётов по верифицированной модели; стандартная методика – результаты расчёта математической модели 2-го уровня сложности, практикуемого в большинстве моторостроительных конструкторских бюро; (СМ) – результаты расчёта математической модели 2-го уровня сложности рассматриваемой системы с использованием зависимости коэффициентов коррекции давления по контурам смесителя (СМ – смеситель); (СМ + ФК) – результаты расчёта математической модели 2-го уровня сложности рассматриваемой системы с использованием зависимости коэффициентов коррекции и коэффициента потерь давления заторможенного потока форсажной камеры сгорания от числа Маха потока.

Значения степени двухконтурности, температуры и давления на выходе из форсажной камеры на рисунках приведены в относительном виде.

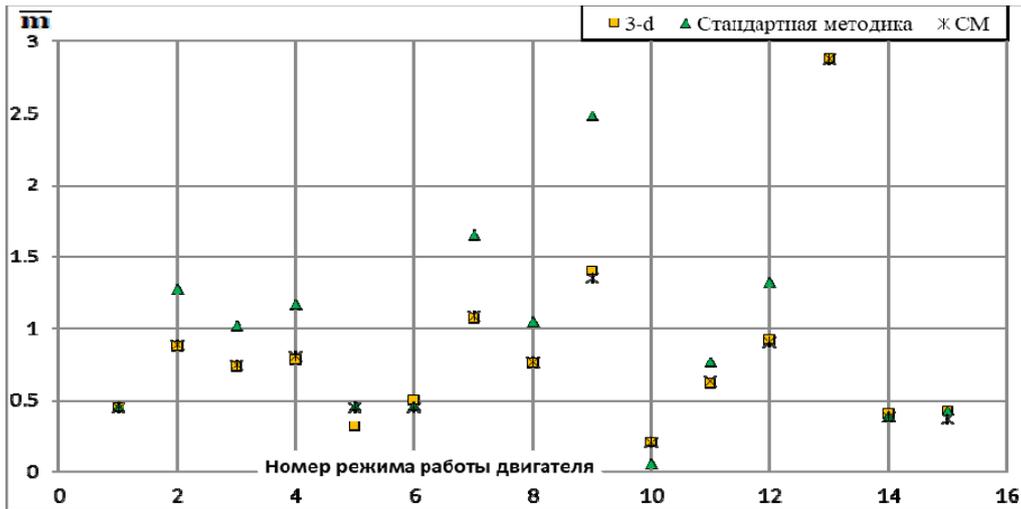


Рис. 3. Степень двухконтурности по режимам работы двигателя

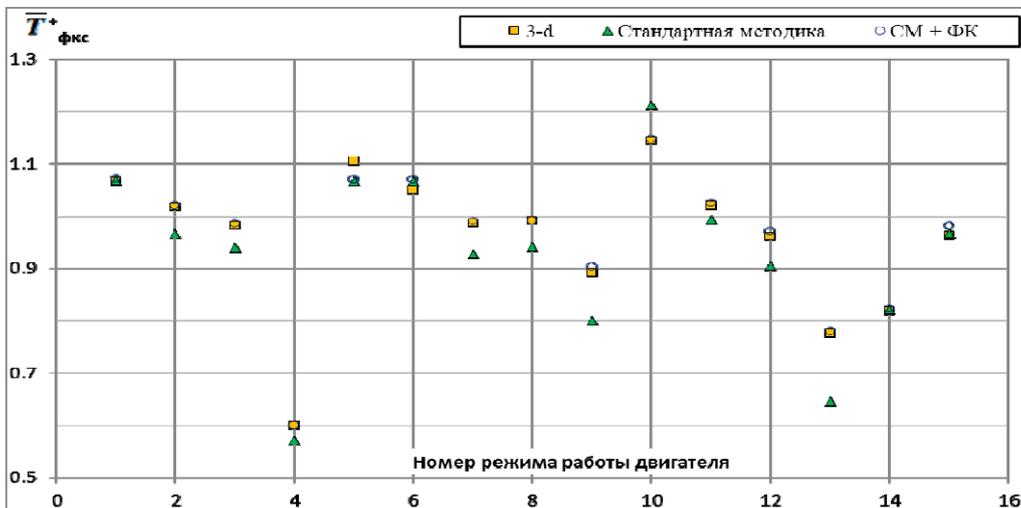


Рис. 4. Температура на выходе из форсажной камеры сгорания по режимам работы двигателя

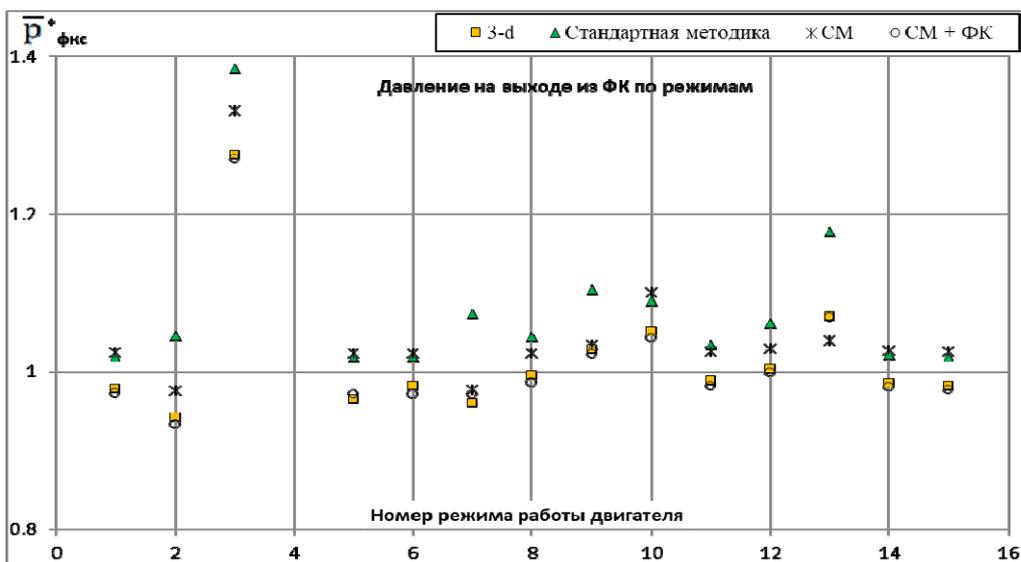


Рис. 5. Давление на выходе из форсажной камеры сгорания по режимам работы двигателя

Заключение

Применение методологии СМ и/или СМ+ФК позволило улучшить сходимость модели 2-го уровня сложности с результатами трёхмерных расчётов, по сравнению с общепринятым подходом.

Для рис. 3 расхождение расчётов по стандартной методике от трёхмерных расчётов составило для некоторых режимов более 30% по значению параметра степени двухконтурности, например, для режима 9. По температуре и давлению (рис. 4, 5) такие расхождения составили величины порядка 10%, например, для режимов 9 и 13. Результаты использования упрощённой модели «смеситель – форсажная камера сгорания» продемонстрированы на графиках, создание математической модели камеры смешения позволяет более точно верифицировать существующие двигатели, корректно рассчитывать параметры, а значит и оптимизировать режимы их работы.

Библиографический список

1. Кудрявцев А.В., Медведев В.В. Форсажные камеры и камеры сгорания ПВРД: инженерные методики расчёта характеристик // Труды ЦИАМ. 2013. № 1352. 137 с.
2. Kurzke J., Halliwell I. Propulsion and power: an exploration of gas turbine performance modeling. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2018. 755 p. DOI: 10.1007/978-3-319-75979-1
3. Медведев В.В. Принцип выбора числа лепестков и формы каналов смесителя // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2005. № 85. С. 7-12.

INTRODUCTION TO THE PROBLEM OF CALCULATING THE PARAMETERS OF THE MIXING CHAMBER OF AN AFTERBURNING BYPASS ENGINE

© 2021

O. D. Karev Design Engineer
United Engine Corporation, Moscow, Russian Federation;
karev-od@uecrus.com

The article considers the problem of calculation accuracy when using mathematical models of gas-turbine engines of the second level of complexity, using the example of a device for mixing the flows of the core engine and the bypass duct of a gas turbine engine, and suggests methods for solving it. The processes taking place in mixing chambers of air-breather engines are considered to be difficult for mathematical modeling since the exchange of kinetic and thermal energies of the flows characterized by different velocities, pressures, temperatures and chemical composition occurs in them simultaneously. The mixer does not only ensure mixing of flows from different engine ducts, but also acts as a kind of throttle. It regulates the pressure downstream of the fan and, consequently, air consumption in the bypass duct, thus affecting directly the fan characteristics and the distribution of flows over the engine ducts. The paper presents the dependencies of the workflow parameters that allow for more accurate verification of mixer models of the second level of complexity.

One-dimensional modeling; gas-turbine engine; mixer; mixing chamber; verification

Citation: Karev O.D. Introduction to the problem of calculating the parameters of the mixing chamber of an afterburning bypass engine. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2021. V. 20, no. 3. P. 57-64. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-3-57-64

References

1. Kudryavtsev A.V., Medvedev V.V. Ramjet engine afterburners and combustion chambers. Engineering practices of performance calculation. *Trudy TsIAM*. 2013. No. 1352. 137 p. (In Russ.)
2. Kurzke J., Halliwell I. Propulsion and power: an exploration of gas turbine performance modeling. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2018. 755 p. DOI: 10.1007/978-3-319-75979-1
3. Medvedev V.V. The principle of lobe number estimating and lobe mixer ducts profiling for bypass aviation engines. *Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation*. 2005. No. 85. P. 7-12. (In Russ.)