УДК 621.45.022 ББК 39.55

## ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫХ К ВНОВЬ СОЗДАВАЕМЫМ КАМЕРАМ СГОРАНИЯ С ПОПЕРЕЧНОЙ СИСТЕМОЙ ВИХРЕОБРАЗОВАНИЯ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Сергей Викторович Скоробогатов Московский государственный технический университет гражданской авиации (Иркутский филиал) Иркутск, Россия maestro.ru@mail.ru

Проектирование и производство авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) и их компонентов — это крайне масштабный, комплексный процесс. По мере развития отдельных отраслей науки, внедрения технических новшеств и получения от их использования обратной связи происходит планомерное усложнение конструкторско-производственной цепочки. Это усложнение, с одной стороны, обеспечивает возможность совершенствования изделия за счёт воплощения в его конструкции новых идей и подходов, с другой — повышает наукоёмкость данной отрасли и увеличивает стоимость конечного изделия. Необходимость в совершенствовании изделия, в свою очередь, диктуется системой обеспечения и поддержания лётной годности воздушных судов (ВС), стандарты которой также совершенствуются с течением времени.

**Ключевые слова:** камера сгорания, авиационный газотурбинный двигатель, эксплуатационные требования, метод обоснования требований, лётная годность воздушных судов.

### JUSTIFICATION FOR REQUIREMENTS FOR NEW TRAPPED VORTEX COMBUSTORS OF AIRCRAFT ENGINES

Sergej Viktorovich Skorobogatov
Moscow State Technical University
of Civil Aviation (Irkutsk branch)
Irkutsk, Russia
maestro.ru@mail.ru

Design and production of aircraft gas-turbine engines and their components is a high-scale and complex process. As separate branches of science develop, technological innovations are implemented and feed-back of their use is received, the design-and-production chain gets more complicated as well. On the one hand, this gives an opportunity to improve the product due to implementation of new ideas and approaches in its design, on the other hand, this brings about growth in the knowledge-intensity and increases the cost of the final product. In its turn, need for improvement of the product is required by the system of continued airworthiness with its standards improving over time as well.

**Key words:** combustor, aircraft gas-turbine engine, operational requirements, method of justification for requirements, airworthiness.

В соответствии с рисунком 1, взаимосвязь всех участников системы обеспечения и поддержания лётной годности ВС можно представить графически. «Лучшей иллюстрацией общего механизма обеспечения и поддержания лётной годности ВС может быть «Модель летной годности», представленная в виде «пирамиды», на вершине которой находится экземпляр воздушного судна (точка А), а в основании пирамиды стоят Разработчик — ОКБ (точка В), Изготовитель (точка С) и Эксплуатант (точка D). Они и являются основными участниками Системы обеспечения и поддержания лётной годности ВС» [Чинючин, Смирнов, Кирдюшкин, 2012, с. 9].

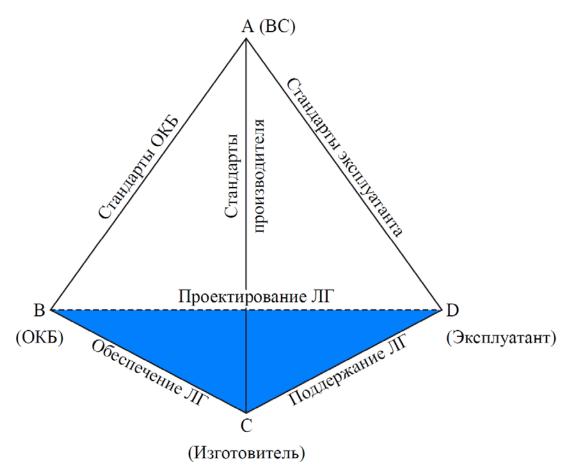


Рисунок 1 – Пирамида лётной годности

«Понятно, что если убрать любую из граней, пирамида потеряет устойчивость. В основании пирамиды лежат три составляющие лётной годности, прописанные в Воздушном кодексе РФ: обеспечение летной годности ВС при проектировании (разработке) — **DB**, обеспечение летной годности ВС при изготовлении (**BC**) и поддержание летной годности при эксплуатации ВС (**CD**)» [Чинючин, Смирнов, Кирдюшкин, 2012, с. 9].

«Помимо основания ( $S_{DBC}$  – летная годность) данная пирамида имеет три плоскости: разработки (проектирования) ВС ( $S_{ADB}$ ), изготовления (производства) ВС ( $S_{ABC}$ ) и технической эксплуатации ВС ( $S_{ACD}$ )» [Чинючин, Смирнов, Кирдюшкин, 2012, с. 9].

«В плоскостях обеспечения летной годности ВС действуют стандарты ОКБ на проектирование (разработку) и стандарты производителя на производство (изготовление) ВС. В плоскости технической эксплуатации действуют Федеральные авиационные правила — ФАП-145 «Организации

технического обслуживания и ремонта авиационной техники» и соответствующие стандарты» [Чинючин, Смирнов, Кирдюшкин, 2012, с. 10].

Таким образом, «Пирамида» данная подчёркивает взаимосвязь участников системы обеспечения и поддержания лётной годности ВС, важность скоординированности их действий и невозможность выпадения кого-либо за рамки данной структуры. Несмотря на то, что деятельность каждого из участников «пирамиды» регламентируется своими нормативно-правовыми актами, само функционирование данной системы должно быть подчинено единому принципу, в контексте которого выстраивается общая стратегия управления процессами обеспечения и поддержания лётной годности ВС. Иллюстрацией такого принципа может служить формализованная модель управления лётной годностью ВС, представленная в работе [Гипич, 2001], в соответствии с рисунком 2. Данная модель позволяет установить взаимосвязь между отдельными требованиями к каждому из участников рассматриваемой системы и, учтя воздействие со стороны внешних факторов, сформировать выходной управляющий сигнал, направленный на изменение нормативных требований к системе.

Представленная модель включает в себя:

- 1. Элементы управления, в числе которых:
  - управляемые показатели лётной годности:  $X = \{X_1, X_2...X_n\}$  (здесь  $X_{BX}$ ,  $X_{BMX}$  входные и выходные показатели);
  - нормативы лётной годности  $X = \{X_{H1}, X_{H2}...X_{Hn}\}.$
- 2. Цель управления:  $X_{\text{вых.}} = X_n (X = /X_{\text{вых.}} X_{\text{н}} / \text{точность управления}).$
- 3. Условия управления:
  - для конструирования  $X_{BX.} = X_{H}$  и  $X_{BMX.} = X_{K}$ ;
  - для изготовления  $X_{BX} = X_{K}$  и  $X_{BMX} = X_{U}$ ;
  - для эксплуатации  $X_{BX} = X_{\mu} \mu X_{BMX} = X_{9}$ .

Воздействие внешних факторов учитывается следующим образом:

$$X_{BMX} = X_{M} \cdot R = (X_{K} + X_{M} + X_{9}) \cdot R \tag{1}$$

где  $R_{\kappa}$ ,  $R_{\nu}$ ,  $R_{\nu}$  — внешние факторы, соответственно влияющие на проектирование (конструирование), производство (изготовление) и эксплуатацию; выполняется условие:  $\Delta X = /X_{\nu} - X_{\nu} / \neq 0$ .

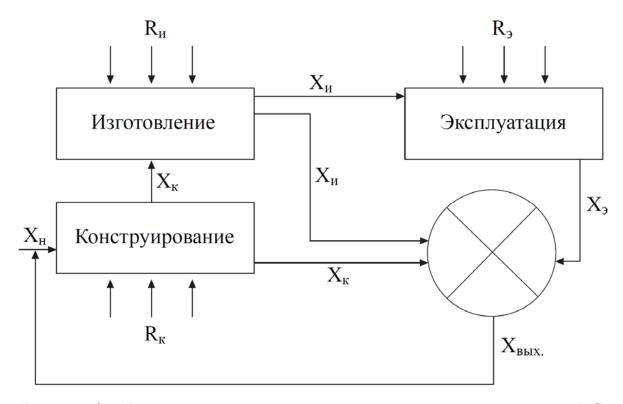


Рисунок 2 – Формализованная модель управления лётной годностью ВС

Концепция камеры сгорания с поперечной системой вихреобразования (КСПСВ) авиационного ГТД предполагает закрутку потока в поперечном продольной направлении относительно оси [Сафарбаков, двигателя Скоробогатов, Исаев, пат. 2716992 Poc. Федерация: МПК F23R 3/50 (2006.01) 2020]. КСПСВ обладает определёнными преимуществами в сравнении с камерами сгорания (КС) традиционной конструкции. Однако переход к поперечной системе вихреобразования потребует существенного изменения внешнего облика КС с внедрением в её конструкцию новых элементов сложной формы. Столь серьёзный шаг должен иметь под собой веское обоснование, в доказывается необходимость принятия контексте которого конкретных конструкторских решений путём исследования ИΧ влияния на характеристики КС эксплуатационные c экспериментальным TOMY подтверждением. Метод обоснования требований направлен на решение данной задачи.

Суть разрабатываемого метода состоит в следующем. В структурной схеме КСПСВ выделяется набор геометрических параметров (ГП), который всецело определяет её внешний облик. На основании данного набора ГП формируется расчётная схема, в которой с помощью средств вычислительной газодинамики определяются особенности структуры течения, оказывающие влияние на эксплуатационные характеристики КСПСВ. Затем устанавливается закономерная связь между выделенными особенностями структуры течения и входными ГП, формирующими внешний облик КСПСВ. Данная связь обеспечивает возможность обосновать и реализовать необходимые требования конструкции КСПСВ непосредственно на каждом ИЗ этапов проектирования. Процесс обоснования, в свою очередь, имеет два уровня. На первом уровне обоснования осуществляется увязка имеющихся особенностей структуры течения в КСПСВ и требований со стороны эксплуатанта  $X_{20}$ . Из этой увязки проистекает второй уровень, на котором обосновывается вся номенклатура нормативных требований  $X_{hn}$  к конструктору. Реализация требований второго уровня обоснования на этапе проектирования КСПСВ авиационного двигателя должна обеспечить соответствие характеристик конечного изделия существующим нормам лётной годности ВС, что на заключительном этапе проверяется экспериментальным путём.

Процесс численного моделирования, осуществляющийся в рамках данного метода, состоит из нескольких этапов и подразумевает определённую последовательность действий, в соответствии с рисунком 3. В первую очередь происходит формирование внешнего облика КС средствами САD модуля (Computer-Aided Design, система автоматизированного проектирования), в котором должен быть реализован принцип «дерева» проектирования.

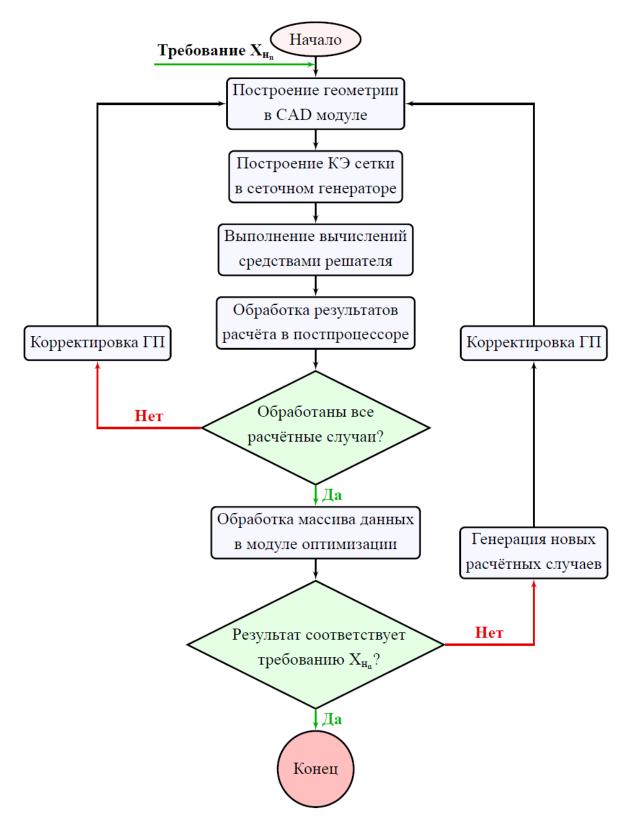


Рисунок 3 — Блок-схема алгоритма газодинамического расчёта с оптимизацией параметров в программном пакете Ansys

Данный принцип означает, что процесс построения трехмерного объекта выполняется от некоторого базового эскиза с сохранением истории

производимых операций. Благодаря этому принципу имеется возможность вносить изменения на любом этапе моделирования, а все последующие операции в «дереве» будут производиться САD модулем автоматически. Следует отметить, что ГП, определяющие те или иные элементы КС в пространстве, это числовые данные. Таким образом, заложив на этапе моделирования КСПСВ необходимые ГП, есть возможность менять их в дальнейшем, при этом САD модуль будет перестраивать всю модель самостоятельно, без вмешательства человека. Причём целостную структурную схему КСПСВ допускается фрагментировать на отдельные локации. Данный шаг позволяет уменьшить потребный объём оперативной памяти компьютера, а также время, отводимое на один расчётный случай.

Расчёты предполагается выполнять в программном пакете Ansys, где есть весь необходимый инструментарий для решения задач, ставящихся в рамках предлагаемого метода. В том числе, в Ansys имеется возможность делегировать функцию изменения ГП в САD программе самому расчётному модулю, освободив от этой обязанности пользователя. Однако следует отметить, что расчёты не привязаны к одному конкретному программному продукту и их выполнение возможно в любой другой программе-аналоге, имеющей для этого необходимый функционал.

После завершения построения геометрии и подготовки её специальным образом она передается в сеточный генератор. В данном модуле происходит разделение модели на дискретные элементы конечного объёма. Сами конечные элементы (КЭ) могут иметь вид различных пространственных примитивов (тетраэдры, гексаэдры, призмы, пирамиды) или плоских фигур (квадрат, треугольник). На данном этапе важно обеспечить необходимые показатели критериев качества сеточных элементов, среди которых можно выделить три основных:

- степень ортогональности (Orthogonal Qulity);
- степень перекошенности (Skewness);
- степень пропорциональности (Aspect Ratio).

Также необходимо обеспечить структурированность расчётной сетки, в которой ориентация КЭ будет сонаправлена предполагаемому току газа. В соответствии с материалами, представленными в работах [Исаев, Скоробогатов, 2017; Исаев, Скоробогатов, 2018], исследование структуры течения во входной части КСПСВ может осуществляться в двумерной постановке, при которой расчётную область рекомендуется представлять преимущественно в виде четырёхугольных КЭ. При формировании внешнего облика выходной части КСПСВ, рекомендуется представлять расчётную область в виде комбинации из призматических КЭ в пристеночных областях и тетраэдрических КЭ в ядре потока на удалении от стенок. При этом расчётная сетка вблизи поверхностей, имеющих ярко выраженную кривизну, а также в области заужений в каналах должна локально сгущаться.

После завершения построения сетка преобразуется в файл требуемого формата и передаётся в модуль решателя, где назначаются начальные и граничные условия и непосредственно осуществляется решение. В качестве модели турбулентности (МТ), в рамках рассматриваемого метода, предполагается использовать МТ SST k-w. Такой выбор обусловлен результатами верификации и валидации данной МТ, описанными в работе [Исаев, Скоробогатов, 2017].

Когда решение можно считать сошедшимся, его результаты передаются в модуль постпроцессора, где можно представить расчётные данные во всевозможных вариантах. Помимо различного рода визуализаций в постпроцессоре имеется возможность выделить целевую функцию (ЦФ) в виде некоторого числового значения. В дальнейшем, выделенная ЦФ может быть использована для выполнения серии расчётов, направленных на установление закономерностей между значениями ГП, которые формируют расчётную область КСПСВ, и значениями самой ЦФ.

Таким образом, из различных модулей Ansys выстраивается аналогичное «дерево» расчёта, когда на входе имеются некоторые ГП, лежащие в определённом диапазоне значений, а на выходе соответствующие им значения ЦФ. Изменяя числовые значения ГП на входе в расчётную схему, происходит автоматическое выполнение всей очередности операций вплоть до извлечения Кроме числового значения ЦΦ. τογο, В Ansys есть необходимый инструментарий для проведения многокритериальной оптимизации. Причём функционал данного инструментария интегрирован в общую программную среду. Благодаря этому имеется возможность передать управление изменением ГП от пользователя к оптимизационному модулю, где обеспечивается автоматизация процесса выполнения расчётов по алгоритму, представленному на рисунке 3.

В ходе выполнения расчётов по указанному алгоритму в структуре течения КСПСВ можно выделить рад следующих особенностей, установив при этом характер их влияния на эксплуатационные характеристики КСПСВ:

1. Срывные явления в диффузорной части КСПСВ. Данные явления зарождаются в области резкого расширения канала диффузора, а их наличие ведёт к увеличению потерь в проточной части КСПСВ, в соответствии с рисунком 4. Таким образом, наличие срывных явления в диффузорной части КСПСВ вступает в противоречие с эксплуатационным требованием  $X_{91}$ , которое заключается в минимизации потерь полного давления в КС;

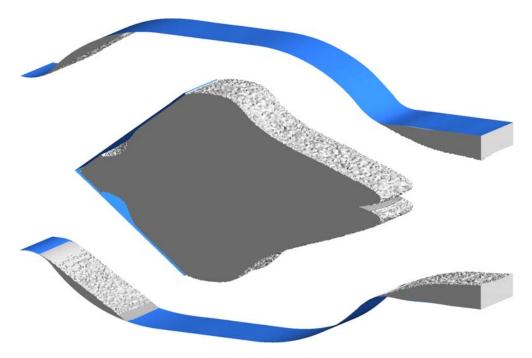


Рисунок 4 – Визуализация зон возвратных течений в КСПСВ

2. Застойная зона с внутренней стороны уголкового стабилизатора пламени УСП. Данная особенность связана с применением УСП во входной части КСПСВ, который, являясь плохообтекаемым телом, формирует за собой область пониженного давления, в соответствии с рисунком 5. Застойные явления за УСП обуславливают возникновение зон местного переобогащения топливно-воздушной смеси (ТВС), что, в свою очередь, сопровождается снижением полноты сгорания и повышением выбросов монооксида углерода, в соответствии с результатами исследований [Исаев, Скоробогатов, 2019, с. 27].

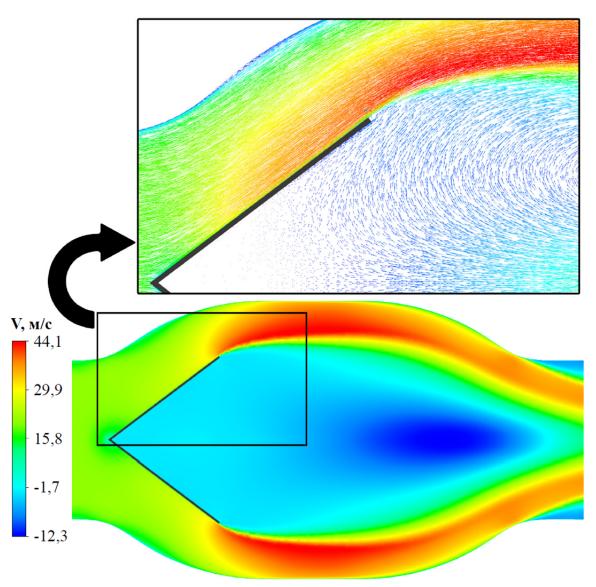


Рисунок 5 – Застойная зона за уголковым стабилизатором пламени

Также наличие зон местного переобогащения может приводить к разрушениям усталостного характера элементов фронтового устройства (ФУ), связанных с неравномерностью температурного поля в данной области. Кроме

того, застойная зона ухудшает эжекцию потока газа из зоны обратных токов (ЗОТ) в процессе присоединения к основному течению. Таким образом, наличие застойной зоны за УСП недопустимо в соответствии со следующими эксплуатационными требованиями:

- $X_{32}$  малый уровень эмиссии вредных веществ в атмосферу;
- $X_{93}$  высокая полнота сгорания топлива;
- $X_{34}$  высокая величина ресурса и календарного срока службы элементов КС ГТД;

# **3.** Срывные явления в области каналов коллектора газового потока. Данные явления имеют место в случае, когда форма разделяющей поверхности коллектора не согласована с геометрией стенок КСПСВ и не сонаправлена набегающему потоку, в соответствии с рисунком 6.

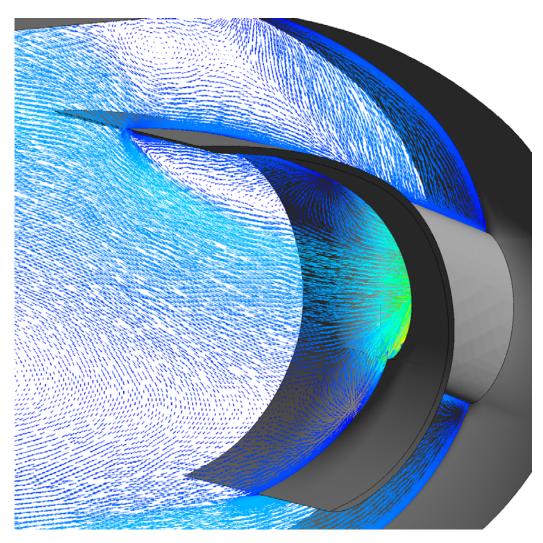


Рисунок 6 – Обтекание разделяющей поверхности с отрывом потока

Подобные явления влекут за собой увеличение потерь полного давления в КСПСВ, что вступает в противоречие с эксплуатационным требованием:  $\mathbf{X}_{31}$  – минимизация потерь полного давления в КС;

4. Разгон потока в области выходных патрубков. Это явление случае недостаточной пропускной способности выходных соответствии с рисунком 7. Недостаточная патрубков, в пропускная способность выходных патрубков привести тэжом тепловому дросселированию и, как следствие, к помпажу компрессора, что вступает в противоречие c эксплуатационным требованием:  $X_{25}$ обеспечение газодинамической устойчивости ГТД;

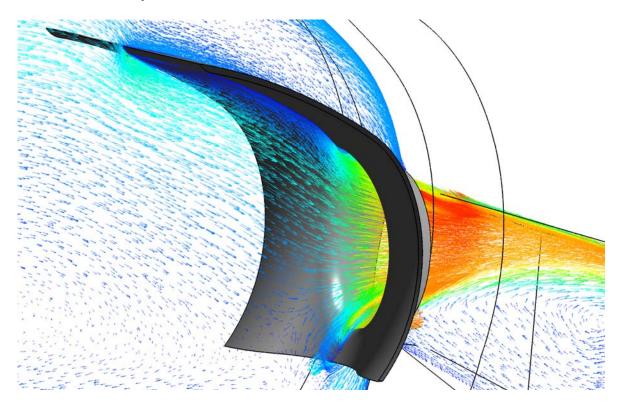


Рисунок 7 – Векторное поле скоростей в области коллектора КСПСВ

5. Подсасывание в выходные патрубки воздуха, покидающего каналы коллектора газового потока. Отчасти данное явление связано с пропускной способностью водных патрубков. Также на наличие и интенсивность подсасывания оказывает влияние длина внутренней части разделяющей поверхности коллектора газового потока, в соответствии с рисунком 7. Подсасывание холодного воздуха в газосборник вступает в

противоречие с эксплуатационным требованием:  $X_{36}$  — малый уровень неравномерности температурного поля на выходе из КС;

- 6. Локальные вихревые структуры в области элементов внутреннего профилирования УСП. Эти структуры возникают в процессе формирования выходной части КСПСВ, а их возникновение обусловлено наличием множества отдельных выходных патрубков. Присутствие данных вихревых структур в проточной части КСПСВ приводит к снижению эжекции и увеличению потерь полного давления, что противоречит эксплуатационному требованию:  $X_{31}$  минимизация потерь полного давления в КС;
- 7. Срывные явления в области газосборника КСПСВ. Данные явления возникают в случае резкого расширения канала газосборника, что влечет за собой дополнительные потери на вихреобразование и приводит к дополнительным потерям полного давления. Также вихреобразование в данной области в совокупности с явлением подсасывания в выходные патрубки вторичного воздуха ведёт К увеличению уровня неравномерности температурного поля на выходе из КСПСВ. Таким образом, наличие срывных явлений в данной области недопустимо, в соответствии с эксплуатационным требованиями:  $X_{21}$  – минимизация потер полного давления в КС,  $X_{26}$  – малый уровень неравномерности температурного поля на выходе из КС.

Установив взаимосвязь между особенностями структуры течения в КСПСВ и ГП её отдельных элементов, имеется возможность обосновать управляющее воздействие со стороны блока «Эксплуатация» в модели управления лётной годностью ВС на блок «Конструирование», в соответствии с рисунком 2. Данное воздействие будет оказываться на нормативы лётной годности путём закладывания на этапе проектирования в конструкцию КСПСВ следующих требований:

— X<sub>н1</sub> — формирование внешнего облика входной части КСПСВ, обеспечивая плавное, безотрывное течение в данной области при её минимальной осевой протяжённости и при условии отсутствия срывных явлений. Выполнение этого требования достигается в результате оптимизации

набора ГП, формирующего внешний облик входной части КСПСВ, которая производилась с учётом указаний, представленных в работе [Исаев, Скоробогатов, 2018] и в рамках общего алгоритма оптимизационного расчёта, представленного на рисунке 3;

- X<sub>н2</sub> формирование внешнего облика элементов внутреннего профилирования УСП, обеспечивая устранение застойной зоны и усиление эжекции течений в данной области. Выполнение этого требования достигается в результате оптимизации набора ГП, формирующего элементы внутреннего профилирования КСПСВ, которая производилась с учётом указаний, представленных в работе [Исаев, Скоробогатов, 2018], и в рамках общего алгоритма оптимизационного расчёта, представленного на рисунке 3;
- X<sub>н3</sub> формирование внешнего облика элементов коллектора газового потока, обеспечивая плавное, безотрывное течение на входе в канал коллектора, внутри и на выходе из него, не допуская подсасывания в выходные патрубки воздуха, покидающего каналы коллектора газового потока. Выполнение этого требования достигается в результате оптимизации наборов ГП, формирующих элементы коллектора газового потока [Скоробогатов, Тимофеев, 2020], осуществляемой в рамках общего алгоритма оптимизационного расчёта, представленного на рисунке 3;
- $X_{H4}$  формирование структуры первичного и вторичного потоков  $G_I$  и  $G_{II}$  в КСПСВ для обеспечения возможности задавать коэффициент избытка воздуха и температуру на выходе из КСПСВ. Выполнение этого требования достигается путём определения расположения элементов коллектора газового потока относительно УСП, а также путём изменения пропускной способности каналов коллектора и выходных патрубков КСПСВ;
- X<sub>н5</sub> формирование внешнего облика дополнительных элементов внутреннего профилирования УСП, обеспечивая устранение локальных вихревых структур. Выполнение этого требования достигается в результате оптимизации набора ГП, формирующего внешний облик дополнительных

элементов профилирования УСП, которая выполнялась в рамках общего алгоритма оптимизационного расчёта, представленного на рисунке 3;

- Х<sub>н6</sub> формирование внешнего облика канала газосборника, предотвращая при этом возникновение срывных явлений в данной области. Выполнение этого требования достигается в результате оптимизации набора ГП, формирующих внешний облик канала газосборника КСПСВ, которая производилась в рамках общего алгоритма оптимизационного расчёта, представленного на рисунке 3;
- $X_{n7}$  учёт теплового воздействия на структуру течения и обеспечение достаточной пропускной способности элементов коллектора газового потока для предотвращения теплового дросселирования и обеспечения низкого уровня температурной неравномерности на выходе из КСПСВ. Выполнение этого требования достигается в результате оптимизации набора ГП, формирующих внешний облик коллектора газового потока, а также ГП, определяющих положение коллектора относительно УСП, в соответствии с нормативными требованиями  $X_{n4}$  и  $X_{n5}$ . При этом, помимо «холодных» газодинамических расчётов, необходимо производить расчёт химической кинетики горения топлива в соответствии с указаниями, представленными в работах [Исаев, Скоробогатов, 2019, с. 24; Исаев, Скоробогатов, 2019, с. 36] и в рамках общего алгоритма оптимизационного расчёта, представленного на рисунке 3;
- $X_{H8}$  учёт теплового воздействия на структуру течения и обеспечение достаточной пропускной способности элементов газосборника для достижения газодинамической устойчивости ГТД. Выполнение этого требования достигается в результате оптимизации набора ГП, формирующих внешний облик канала газосборника КСПСВ в соответствии с нормативным требованием  $X_{H6}$ . При этом, помимо «холодных» газодинамических расчётов, необходимо производить расчёт химической кинетики горения топлива по аналогии с требованием  $X_{H8}$ ;

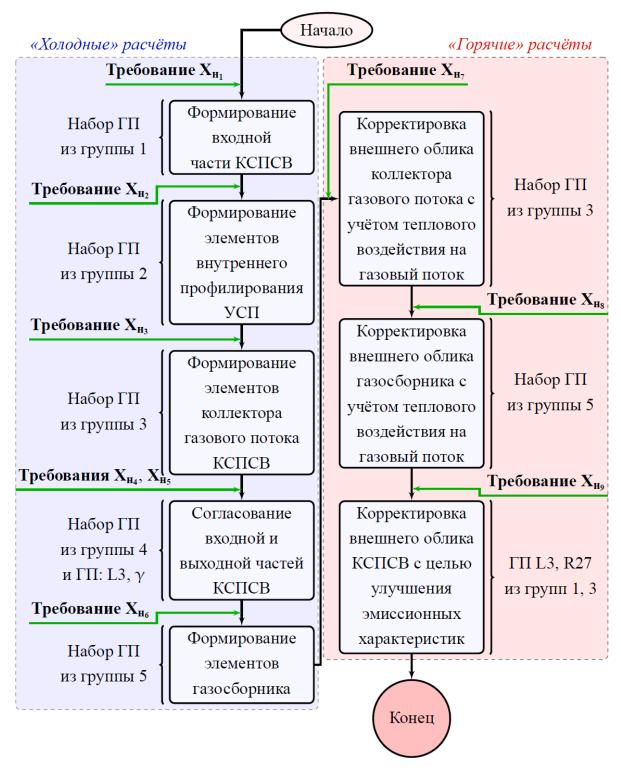


Рисунок 8 – Алгоритм реализации нормативных требований при проектировании КСПСВ

— X<sub>н9</sub> — учёт геометрического и теплового воздействия на процесс образования вредных веществ с целью улучшения эмиссионных характеристик КСПСВ. Выполнение данного требования достигается за счёт

обеспечения высокой полноты сгорания топлива и сокращения времени пребывания продуктов сгорания в области повышенных температур. Это, в свою очередь, реализуется благодаря изменению параметров, определяющих осевую протяжённость КСПСВ и геометрию разделяющей поверхности коллектора газового потока в месте распыла топлива.

Как показано на рисунке 8, данные нормативные требования следует выполнять на соответствующих этапах проектирования элементов вновь создаваемой КСПСВ авиационного двигателя. На основе спроектированной таким образом КСПСВ, конструкторами формируется задание для изготовителя, которому, в свою очередь, следует обеспечить данные нормативные требования при производстве конечного изделия.

Следует отметить, что данные нормативные требования для конструкторов, сформулированные и обоснованные в рамках разработанного метода, учитывают лишь требования со стороны эксплуатанта. Однако структура разработанного метода позволяет также учитывать требования со стороны изготовителя и проектировщика, как и брать во внимание наличие всевозможных внешних факторов, в соответствии с формализованной моделью управления лётной годностью ВС, изображённой на рисунке 2.

### Библиографический список

- 2. *Исаев А. И.* Гидродинамическая верификация и валидация численных методов расчёта течения в камере сгорания газотурбинного двигателя [Электронный ресурс] / А. И. Исаев, С. В. Скоробогатов // Труды МАИ. 2017. № 97. URL: https://cutt.ly/EtQRqSN (дата обращения: 10.02.2020).
- 3. *Исаев А. И.* Оптимизация входной части кольцевой камеры сгорания газотурбинного двигателя с поперечной системой образования зон обратных токов / А. И. Исаев, С. В. Скоробогатов // Материалы XV Всероссийской конференции «Новые технологии». 2018. С. 86-94.
  - 4. Исаев А. И. Обеспечение эксплуатационных требований при проектировании

фронтового устройства камеры сгорания с поперечной системой вихреобразования / А. И. Исаев, С. В. Скоробогатов // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2019/ Т. 25. № 336. С. 21–31.

- 5. *Исаев А. И.* Учёт эксплуатационных аспектов на этапе формирования облика коллектора газового потока в камере сгорания / А. И. Исаев, С. В. Скоробогатов // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2019. Т.25. № 336. С. 32–40.
- 6. Кольцевая камера сгорания газотурбинного двигателя и способ организации рабочего процесса в ней [Текст] : пат. 2716992 Рос. Федерация : МПК F23R 3/50 (2006.01) / Сафарбаков А. М., Скоробогатов С. В., Исаев А. И.; заявитель и патентообладатель Иркутск. ФГБОУВО «ИрГУПС». № 2018130927; заявл. 27.08.2018; опубл. 17.03.2020, Бюл. № 8. 16 с.: ил.
- 7. Скоробогатов С. В. Особенности 3D моделирования в процессе формирования внешнего облика выходной части камеры сгорания с поперечной системой вихреобразования / С. В. Скоробогатов, А. А. Тимофеев // Сборник трудов XII Всероссийской научнопрактической конференции студентов и аспирантов «Актуальные проблемы развития авиационной техники и методов её эксплуатации 2019». Иркутск: Иркутский филиал МГТУ ГА, 2020. С. 135–139.
- 8. *Чинючин Ю. М.* Проблемы совершенствования системы поддержания лётной годности воздушных судов / Ю. М. Чинючин, Н. Н. Смирнов, В. С. Кирдюшкин // Научный вестник МГТУ ГА. 2012. №178. С. 7–12.

#### References

- 1. Gipich G. N. Justification and development of the concept of airworthiness: thesis ... Candidate of Technical Sciences: 05.22.14 / G. N. Gipich. M., 2001. 161 p. (in Russian)
- 2. *Isaev A. I.* Hydrodynamic verification and validation of numerical methods of calculating the flow inside the combustor of a gas-turbine engine [Electronic source] / A. I. Isaev, S. V. Skorobogatov // MAI works. 2017. № 97. URL: https://cutt.ly/EtQRqSN. (accessed date: 10.02.2020) (in Russian)
- 3. *Isaev A. I.*. Optimization of the inlet of an annular combustion chamber of a gas-turbine engine with a lateral system of forming reverse current zones / A. I. Isaev, S. V. Skorobogatov // Materials of the 15<sup>th</sup> All-Russian conference "New technologies". 2018. P. 86-94. (in Russian)
- 4. *Isaev A. I.*. Meeting operational requirements in designing an inlet of a trapped vortex combustor / A. I. Isaev, S. V. Skorobogatov // Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation. 2019. V. 25. № 336. P. 21–31. (in Russian)

- 5. *Isaev A. I.* Consideration of operational aspects at the stage of forming the shape of the collector of gas flow inside a combustor / A. I. Isaev, S. V. Skorobogatov // Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation. 2019. V.25. № 336. P. 32–40. (in Russian)
- 6. An annular combustion chamber of a gas-turbine engine and the way of organizing a working process in it [Text]: pat. 2716992 the RF: MPK F23R 3/50 (2006.01) / Safarbakov A. M., Skorobogatov S. V., Isaev A. I.; applicant and patent-holder Irkutsk. Irkutsk Institute of Railway Engineering − № 2018130927; appl. 27.08.2018; publ. 17.03.2020, bul. № 8. 16 p.: il. (in Russian)
- 7. Skorobogatov S. V. Peculiarities of 3D modelling during formation of the shape of the outlet of a trapped vortex combustor / S. V. Skorobogatov, A. A. Timofeev // Collection of works of the 12<sup>th</sup> All-Russian scientific and practical conference for students and post-graduates "Actual issues of the development of aircraft equipment and its operational methods 2019". Irkutsk: MSTU CA Irkutsk branch, 2020. P. 135–139. (in Russian)
- 8. Chinjuchin Ju. M. Issues of improving the airworthiness system / Ju. M. Chinjuchin, N. N. Smirnov, V. S. Kirdjushkin // Scientific Bulletin of MSTU CA. 2012. №178. P. 7–12. (in Russian)