**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования**

**«Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»**

**(БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова)**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | |  |  |
| Факультет | А | |  |
|  | индекс факультета | |  |
| Выпускающая кафедра | А8 | |
|  | индекс кафедры | |
| Группа | А8М31 | |  |
|  | индекс группы | |  |  |  |  |

**отчет**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | **о научно-исследовательской работе** | | | | | | | |  |
| наименование практики | | | | | | | |
| Тетерина Романа Олеговича | | | | | | | |
| Фамилия, имя, отчество обучающегося | | | | | | | |
| **Обучающегося по**  **направлению/специальности** | | | 24.04.05 |  | | Двигатели летательных | | |
| нужное подчеркнуть | | | код | |  | | полное наименование направления/специальности |
| аппаратов | | | | | | | |

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Руководитель НИР от БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова:** | | | |  | |  | |
|  | |  | |  | |  | |
| Подпись | |  | | Фамилия ИО | |  | |
| «\_\_\_» | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ |  | 2017г. | |  | |

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2018 г.

**СОДЕРЖАНИЕ**

[Обозначения и сокращения 3](#_Toc532829997)

[Введение 4](#_Toc532829998)

1. [Выделение предметной области 5](#_Toc532829999)
2. [Способы регулирования центробежного компрессора 7](#_Toc532830000)
3. [Особенности моделирования рабочей ступени РК 9](#_Toc532830001)

[Заключение 12](#_Toc532830002)

[Список использованных источников 14](#_Toc532830003)

# **Обозначения и сокращения**

ЦБК – центробежный компрессор;

КС – камера сгорания;

РК – рабочее колесо;

СА – сопловой аппарат;

РЛД – радиальный лопаточный диффузор;

ОСА – осевой спрямляющий аппарат;

# **Введение**

В данной работе проводится обзор накопленного опыта использования ВНА в качестве регулирующего устройства ЦБК, анализ эффективности и способы моделирования течений в условиях поворота входных направляющих лопаток перед РК.

Целью данной работы является определение влияния углов установки ВНА на газодинамические характеристики ступени ЦБК.

Применение эффективных способов расширения диапазона регулирования и повышения КПД на нерасчетных режимах работы существенно уменьшает расход потребляемой энергии, т.к. значительную часть времени (не менее 50%) эти машины работают на этих режимах. Поэтому научно-исследовательские и конструкторские работы, направленные на решение этой задачи, являются весьма актуальными.

# **Выделение предметной области**

Авиационные газотурбинные двигатели имеют несколько режимов работы, основные установившиеся режимы представлены ниже. Каждый переход на режим сопровождается работой двигателя в нерасчетной области неустановившегося режима. Режим приемистости является процессом быстрого увеличения тяги (мощности) ГТД за счет повышения расхода топлива при быстром перемещении рычага управления двигателем (время перемещения не более 0,5 с). В качестве основной характеристики этого режима рассматривается его длительность, определяемая временем достижении 95% величины тяги, соответствующей новому установившемуся режиму.

Основные установившиеся режимы:

1. Максимальный (М) – это режим работы двигателя с максимальной тягой (без форсирования) при данных условиях полета. Он достигается при максимальных значениях частоты вращения ротора и температуры газов перед турбиной. Время непрерывной работы на этом режиме ограничивается от десятков секунд до десятков минут. Применяется при взлете, наборе высоты и увеличении скорости полета.

Максимальный режим ГТД транспортных ЛА и вертолетов используется, в основном, только при взлете, поэтому он называется, как правило, взлетным.

1. Малый газ (МГ) – это режим работы двигателя с минимальной тягой, характеризуется минимальной частотой вращения ротора, при которой обеспечивается устойчивая работа компрессора и вырабатывается мощность, достаточная для привода агрегатов. Р ≈ 0,05 Рmax.

Применяется при запуске двигателя, проверке герметичности систем, при посадке самолета для уменьшения скорости и для охлаждения двигателя. Время непрерывной работы на этом режиме ограничено 10…15 минутами в связи с недостаточным воздушным охлаждением.

1. Крейсерские (К) – режимы наибольшей экономичности. Р ≈ (0,75…0,85) Рmax. Применяется при полетах на максимальную дальность и продолжительность. Время непрерывной работы не ограничено.
2. Номинальный (Н) – характеризуется повышенной частотой вращения ротора по сравнению с крейсерскими режимами. Р ≈ (0,92…0,95) Рmax. Применяется при необходимости увеличения скорости полета и набора высоты в течение длительного времени. Время непрерывной работы – от 30 минут до 2-х часов.

Переходными режимами работы двигателя принято считать:

1. запуска (в соответствии с ГОСТ 23851-79г. – это неустановившийся режим работы ГТД, характеризуемый процессом раскрутки его ротора (роторов) от неподвижного состояния или режима вращения авторотации до выхода двигателя на режим МГ или минимально устойчивый режим работы для двигателей, не имеющих режим малого газа);
2. приемистости (в соответствии с ГОСТ 23851-79г. – это процесс быстрого увеличения тяги (мощности) ГТД за счет увеличения подачи топлива при резком перемещении рычаг управления двигателем);
3. сброса газа (в соответствии с ГОСТ 23851-79г. – это процесс быстрого уменьшения тяги (мощности) ГТД вследствие уменьшения подачи топлива при резком перемещении рычага управления двигателем);
4. дросселирования ГТД (в соответствии с ГОСТ 23851-79г. – это процесс быстрого уменьшения тяги (мощности) ГТД вследствие уменьшения подачи топлива при медленном и плавном перемещении рычага управления двигателем);
5. включения и выключения форсажа.

Для каждого режима существует свой комплекс параметров, который необходимо поддерживать на заданной уровне. В данной работе рассмотрим регулирование ЦБК как управляющего органа, который способен влиять на работу ГТД посредствам изменения давления в КС и изменения массового расхода воздуха. В общем случае ЦБК включает в себя РК, РЛД и ОСА.

# **Способы регулирования центробежного компрессора**

Аэродинамическая эффективность современных центробежных компрессоров очень высока, в сравнения с осевыми компрессорами. В работе [1], политропный КПД ступеней достигает до 88%, на нерасчетных же режимах эффективность «существенно снижается. Следует отметить, что эффективность работы компрессора на нерасчетных режимах зависит от многих факторов, но наиболее существенными из них является выбранный способ регулирования.

Общеизвестно, что регулирование конечных параметров газа можно осуществить изменением характеристики компрессора. Наиболее известными способами регулирования являются:

1. Изменение частоты вращения ротора, следовательно, окружной скорости рабочего колеса;
2. Дросселирование потока газа;
3. Поворот лопаток входного направляющего аппарата;
4. Поворот лопаток диффузора;
5. Частичный выпуск сжатого газа в атмосферу или перепуск его на всасывание;

Наиболее широкое применение регулирование компрессора получили стационарные компрессорные холодильные установки. Изменение характеристик компрессора сводится к управлению предварительной закрутки потока и к дросселирующему действию на входе. Регулирование газового потока сопровождается понижением КПД. На рисунке 1 приведены графики регулирования давления и производительности при помощи поворотных лопаток на входе. При обеспечении постоянства давления, равного 100%, поворотом лопаток можно добиться уменьшения производительности машины до 35% от номинального. При этом происходит уменьшение затраченной мощности. Данный способ управления в сравнении с простым дросселированием входного патрубка уменьшает расход мощности в широком диапазоне работы на 10%

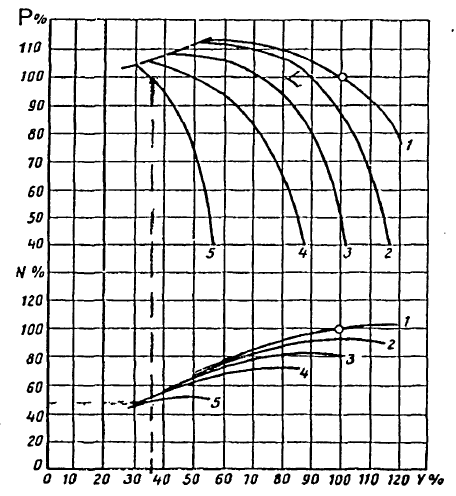


Рисунок 1 – Регулирование давления и производительности при помощи лопаток на входе. 1-5 положения лопаток на входе.

Так же есть опытные данные по работе ВНА компрессора фирмы «Турбомек». На рисунке 2 изображены зависимости параметром в случае изменения положения ВНА. Регулирование поворотом лопаток на входе является неким средним между регулированием дросселем и числом оборотом. В большинстве работ по данной тематике отсутствуют данные о механизме работы аппаратов управления ВНА и методов их расчета.

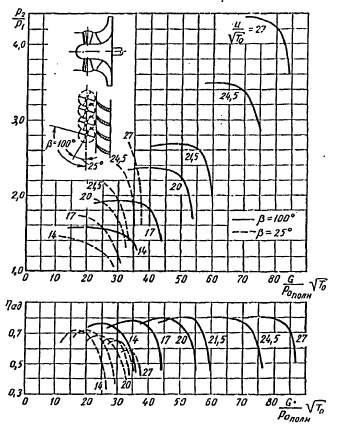


Рисунок 2 – Характеристики центробежного компрессора. Отношение давлений и КПД в зависимости от расхода и различных числах оборотов при открытом и при закрытом дросселе

# **Особенности моделирования рабочей ступени РК**

В настоящее время развитие вычислительных методов почти достигло своих пределов, так что современные программные комплексы чуть лучше программных продуктов того времени, так как разработанные еще в прошлом математические модели используются до сих пор. В конце прошлого века в при разработки лопаточных машин стали использоваться трехмерные расчетные модели, в основе которых интегрирование осредненных по Рейнольдсу системы уравнений Навье-Стокса, с последующим замыканием этих уравнений моделями турбулентности. На первых этапах это были упрощенные модели как полностью невязкие, которые фактически применялись для определения нагруженности венцов и отдельных сечений, так и модели с раздельным описанием невязкого ядра, и соотношений для пограничного слоя. В частности в последних появилась возможность числового определения характеристик и параметров турбомашин, тогда как невязкий подход использовался только для анализа отдельных параметров лопаточных венцов. С развитием вычислительных мощностей и численных методов появилась возможность совершать трудоемкие трехмерные инженерные расчеты. В это время появились более развитые модели турбулентности, которые явным образом рассчитывают течение в вязком подслое. В таких моделях стало возможным корректное описание потока с явным учетом трехмерных особенностей отдельных венцов (вторичные течения, вихри, радиальный зазор, положение системы скачков уплотнения, и т.д.).

Между тем, плоть до последнего времени, практика проектирования многоступенчатых турбомашин ограничивалась стационарными расчетами в рамках приближения "Mixing Plane"("поверхность смешения"), параметры потока при переходе от венца к венцу осредняются вдоль шага в зазорах между рабочим колесом и направляющим аппаратом. Чаще всего данный метод применяется для численного моделирования турбин, компрессоры и насосы, а также вентиляторы. Метод полезен для лопаточных машин, обладающих большим количеством рабочих ступеней, тем, что позволяет существенно экономить вычислительные ресурсы и расчетное время, поскольку в моделировании участвует только один межлопаточный канал роторного и статорного венца, но в случае, когда течение имеет сложный и непредсказуемый характер (сверхзвуковые течения, течения с наличием больших отрывных зон) данный метод не всегда точно описывает картину течения и рассчитывает интегральные параметры.

Однако этот метод позволяет точно прогнозировать характеристики турбомашин вблизи расчетных режимов. Так же существует метод "Frozen Rotor который рассчитывает одно положение ротора компрессора по отношению к статору и параметры течения в потоке не проходят процедуру осреднения. Метод "Frozen Rotor" рассматривает поток, который протекает от одного компонента турбомашины к другому, изменяя систему отсчета при этом сохраняя относительное положение этих компонентов. Метод "Frozen Rotor"лучше использовать для мделирования не осесимметричных областей потока, таких как импеллеры, спирали, турбины или вытяжные трубки. Он также может использоваться для осевых компрессоров. Метод "Frozen Rotor"обладает такими преимуществами, как стабильная работа, использование меньшего количества вычислительных ресурсов, чем другие модели взаимодействия "ротор-статор и хорошо подходит для численного моделирования большого количества рабочих колес. Недостатком модели является низкая точность получаемых значений для локальных значений расхода и чувствительность результатов к относительному положению ротора и статора.[2]

В случае описания сложных течений приходится переходить к нестационарным решениям, но существующие методы "Domain Scaling"и "Phase Lagged"однако подобные расчеты чрезвычайно ресурсоемки и таким образом могут используются лишь на последних этапа проектирования, для проверочных расчетов отдельных ступеней. Только в последнее время стал доступен метод, позволяющий весьма эффективно решать нестационарные задачи ротор-статор взаимодействия в рамках одного межлопаточного канала, так называемый метод "Nonlinear Harmonic"(NLH), "Метод Нелинейного Гармонического Анализа". Под термином CFD (Computational Fluid Dynamic - вычислительная газовая динамика), который часто используется в последнее время, понимается именно численное интегрирование системы осредненных по Рейнольдсу трехмерных уравнений Навье-Стокса с подключением моделей турбулентности. [3]

# **Заключение**

Результатами исследования являются полученные газодинамические характеристики (политропный коэффициент полезного действия и напора

по полным параметрам) центробежного колеса при нулевом угле установки лопаток ВНА рисунок 3.

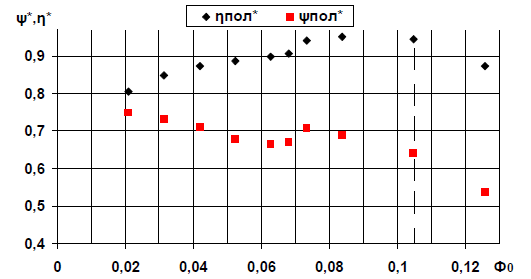


Рисунок 3 – Газодинамические характеристики ЦБК при θ=00

При небольшом снижении производительности, заметно повышение КПД колеса. Это подтверждает теорию, и связано с тем, что уменьшается скорость натекания на входные кромки колеса, а, следовательно, и потери на удар [4].

Как видно из графика, кривые газодинамических характеристик имеют

небольшой разрыв (резкое снижение КПД и напора) при значении условного

коэффициента расхода Ф = 0,07 (65 % от номинальной производительности). Как показал анализ потока, при уменьшении производительности угол атаки становится достаточно большим и происходит отрыв потока со всасывающей стороны лопатки.

Вихревая зона начинает образовываться на периферийной части лопатки, т.к. там

большие значения скоростей. При уменьшении расхода эта зона не исчезает и требуется дополнительная энергия на поддержание вихреобразования.

ВНА позволяют создавать положительную закрутку (в сторону вращения колеса) при уменьшении расхода и отрицательную при его увеличении, обеспечивая тем самым режим безударного входа потока в колесо и расширение рабочей зоны характеристики колеса (рисунок 4).

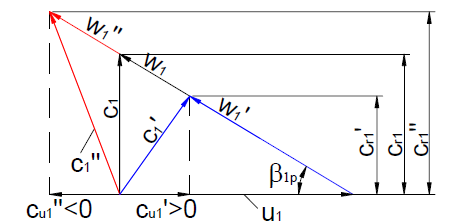


Рисунок 4 – Треугольники скоростей при разной закрутке на входе в РК

Угол лопатки по высоте на входе в осерадиальное колесо зачастую различен. Это связано с тем, что окружная скорость рабочего колеса на периферии и втулке отличается. Дальнейшая работа характеризуется целью нахождения оптимальных углов закрутки ВНА, которые обеспечивали бы максимальное значение КПД РК.

.

# **Список использованных источников**

1. Шишкин В.М. Повышение эффективности центробежных компрессоров общего назначения при работе на нерасчетных режимах изменением закрутки потока в ступенях/ НПО "Казанькомпрессормаш", НИИтурбокомпрессор.-Казань, 1988.-253с.

2. Japikse D., Nicholas C.Baines Introduction to Turbomachinery. Concepts ETI. Inc., 1997.

3. Д.В. Ворошнин, О.В. Маракуева, А.С. Муравейко, Создание CFD-модели многоступенчатого осевого компрессора. НТК "Климовские чтения-2016 СПб.: Изд. Скифия принт, 2016. С. 79 – 87

4. Галеркин, Ю.Б. Турбокомпрессоры [Текст]: учеб. пособие / Ю.Б. Галеркин, Л.И. Козаченко. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 374 с.

5. Байков Б.П. Справочное пособие «Турбокомпрессоры для наддува дизелей», 1975 г., Л.: Машиностроение, 200 с.

6. Ю.М. Ахметов, Д.А. Ахмедзянов, А.Б. Михайлова, А.Е.Михайлов «Особенности функционального проектирования газотурбинных двигателей для беспилотных летательных аппаратов», Уфа: УГАТУ, 2013г.

7. А.М. Ладошин, В.М. Яковлев Методическое пособие «Расчёт и проектирование центробежного компрессора ГТД», Калуга, 2001 г.

8. Холщевников К.В. "Теория и расчет авиационных лопаточных машин" 1986г., М.: Машиностроение, 606 с.