

Управление вторичными течениями в рабочих колесах осевых компрессоров газотурбинных двигателей

Алексеев И.И.*, Клепиков Д. С.**, Гогаев Г. П.***, Исаев А. М.****

*Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е.Жуковского и Ю.А.Гагарина,
ул. Старых Большевиков, 54а, Воронеж, 394064, Россия*

**e-mail: ivalexeev@mail.ru*

***e-mail: klepikov_denis@mail.ru*

****e-mail: gogaevgeorge@rambler.ru*

*****e-mail: phoenix-922@mail.ru*

Аннотация

Работа посвящена исследованию влияния активного управления вторичными течениями в рабочих колесах осевых компрессоров газотурбинных двигателей (ГТД). Предложены способы активного управления течением в радиальном зазоре и у втулки рабочих колес осевого компрессора, основанные на вдуве рабочего тела. Проведен анализ картины течения в межлопаточном канале рабочего колеса на расчетном и нерасчетном (срывном) режимах без управления и с активным управлением течения. По результатам расчётного исследования можно сделать вывод, что данное направление является перспективным и предложенные способы активного управления на втулке рабочих колес и в радиальном зазоре позволяют улучшить характеристики ступени и компрессора в целом.

В большей степени управляющий эффект проявляется на нерасчётных режимах работы ступени, и его значение зависит от направления, скорости, а также формы, количества и размещения каналов подвода рабочего тела.

Ключевые слова: вторичные течения, активное управление течением, осевой компрессор, численное моделирование.

Авиационные двигатели высокоманевренных самолетов характеризуются высоким уровнем технического совершенства, они должны быть надежными и обеспечивать необходимую тягу и удельные расход топлива в широком диапазоне изменения условий полета и режимов работы не только на расчетных, но и переходных и неустановившихся режимах работы, что определяет ко всем узлам двигателя требования газодинамического и конструктивного совершенства [1].

Одна из основных тенденций при проектировании компрессоров для двигателей 5-го и 6-го поколения высокоманевренных летательных аппаратов заключается в уменьшении количества ступеней при сохранении или даже увеличении степени повышения давления, повышении запасов газодинамической устойчивости, коэффициента полезного действия (КПД) и других параметров компрессора. При решении этой задачи наиболее остро встает вопрос обеспечения безотрывного обтекания рабочих поверхностей проточной части компрессора и уменьшения перетекания воздуха через радиальный зазор, что может быть

реализовано путём разработки и применения эффективных способов управления потоком.

В связи с этим, на базе Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж) ведется поиск перспективных направлений совершенствования силовых установок летательных аппаратов. В частности проводится оценка эффективности способов активного управления вторичными течениями в радиальном зазоре и на втулке рабочих колес осевых компрессоров газотурбинных двигателей.

Цель работы заключается в разработке эффективных способов управления вторичными течениями в рабочих колёсах осевых компрессоров газотурбинных двигателей силовых установок боевых летательных аппаратов для формирования современных технических требований к ним. Объектом исследования являются управляющие воздействия на вторичные течения в рабочих колёсах осевых компрессорах. Предмет исследования – влияние управляющих воздействий на вторичные течения рабочего тела [2].

Проведены:

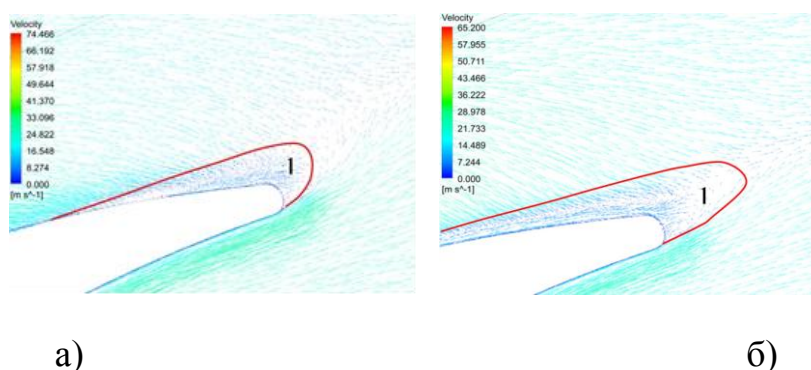
- 1) Численное моделирование течения в межлопаточном канале экспериментальной ступени.
- 2) Расчётное исследование эффективности управления течением на втулке рабочего колеса.

3) Расчётное исследование эффективности управления течением в радиальном зазоре рабочего колеса.

Управление течением на втулке

В ходе выполнения научной задачи построена трёхмерная модель экспериментального лопаточного венца рабочего колеса установки для газодинамического исследования параметров ступени осевого компрессора [3].

Расчеты проводились на расчетном и нерасчетном (срывном, угол атаки 7°) режимах работы. Результаты представлены на рисунке 1.

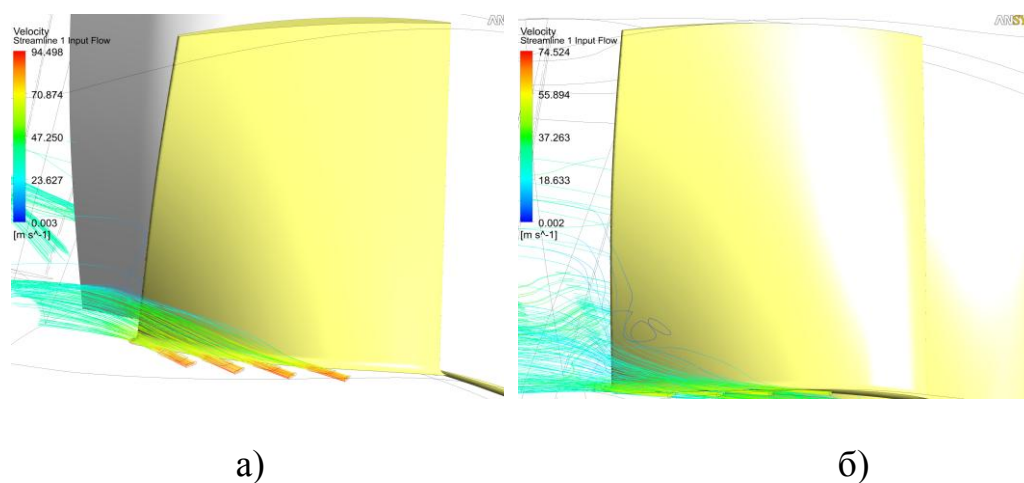


а) расчетный режим; б) нерасчетный (срывной режим)

Рисунок 1 – Визуализация течения на расчетном и нерасчетном режимах работы

Анализ полученных картин течения показывает увеличение зоны обратного течения рабочего тела на нерасчетном (срывном) режиме, вызываемое смещением точки отрыва пограничного слоя в зоне сопряжения спинки лопатки и втулки в направлении противоположном движению основного потока. Это приводит к увеличению потерь и, как следствие, существенному снижению КПД и запаса газодинамической устойчивости экспериментального рабочего колеса.

Предложен способ активного воздействия на эту зону, заключающийся во вдуве рабочего тела у втулки рабочего колеса, посредством выполнения на полке рабочей лопатки профилированных каналов. Проведён цикл расчётов на математической модели экспериментальной установки для гидродинамического исследования течения в рабочем колесе [4] с моделированием вдува рабочего тела и оценкой влияния управляющего воздействия на картину течения в межлопаточном канале и характеристики осевых компрессоров авиационных двигателей. Примеры визуализации течения вдуваемого рабочего тела представлены на рисунке 2.



- а) расположение каналов подвода под углом 15° к касательной к спинке;
- б) расположение каналов подвода вдоль пера по касательной к спинке

Рисунок 2 – Визуализация течения вдуваемого рабочего тела при различных вариантах установки подводящих каналов

После анализа влияния вдува на течение проведены расчёты с применением вдува на втулке на расчетном режиме с варьированием направления, скорости вдува, количества и размещения каналов подвода рабочего тела для

количественной оценки изменения характеристик рабочего колеса: отмечено увеличение КПД рабочего колеса за счёт уменьшения реальной работы на сжатие рабочего тела. Также сделан вывод о целесообразности вдува рабочего тела по направлению основного потока вдоль профиля рабочей лопатки, на втулке начиная с 2/3 хорды под углом 10-15° к касательной к спинке.

Изменение параметров рабочего колеса с применением различных вариантов вдува представлено в таблице 1.

Таблица 1

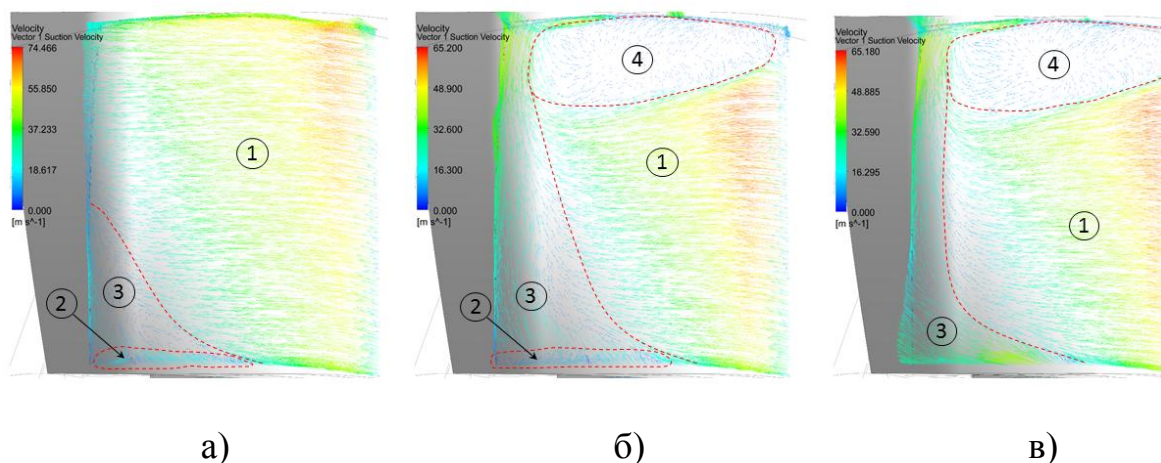
Сравнение параметров рабочего колеса при различных вариантах вдува

Параметры	Без вдува	Расположение каналов					
		Под углом 15° к касательной к спинке			Вдоль пера по касательной к спинке		
Скорость вдува, м/с	–	70	80	90	70	80	90
Полное давление на выходе, кПа	101,07	101,06	101,07	101,07	101,07	101,07	101,08
Полная температура на выходе, К	296,9	296,8	296,8	296,8	296,9	296,8	296,8
Реальная работа ступени, Дж/кг	870,1	852,1	845,9	841,5	862,6	858,3	854,9
Идеальная работа ступени, Дж/кг	790,7	786,2	786,9	790,8	792,6	792,9	797,2
Расход воздуха на вдув, кг/с	–	0,034	0,038	0,043	0,033	0,038	0,043
КПД рабочего колеса, %	90,8	92,2	93	93,9	91,9	92,4	93,2

Для анализа возможности стабилизации работы лопаточного венца на неустойчивых режимах работы посредством вдува проведён расчёт ступени на нерасчетном (срывном, угол атаки 7°) режиме работы без управляющего воздействия и с управляющим воздействием. Визуализация течения на спинке рабочей лопатки представлена на рисунке 3.

На рисунке 3(а) показаны три типичные зоны течения на поверхности спинки рабочей лопатки: 1 – зона основного течения, 3 – зона радиального течения, образующаяся из-за наличия разряжения в данной области межлопаточного канала, которое обусловлено куполообразным отрывом пограничного слоя в зоне 2 сопряжения спинки лопатки и втулки рабочего колеса.

При работе на срывном режиме появляется новая зона течения, рисунок 3(б): 4 – зона воздействия вихревого течения в верхней части межлопаточного канала, показывающая, насколько сильно вихрь загромождает межлопаточный канал. В зоне 1 на срывном режиме наблюдается увеличение скорости потока – это обусловлено уменьшением площади проходного сечения из-за загромождения вихреобразованиями межлопаточного канала; происходит увеличение зоны 2; зона 3 распространяется на всю высоту лопатки.



а) расчётный режим; б) срывной режим; в) срывной режим с применением вдува

Рисунок 3 – Векторное поле скоростей на спинке рабочей лопатки

С применением вдува на втулке рабочего колеса при его работе на срывном режиме зона отрыва потока практически исчезает; зона 3 уменьшается, но по-прежнему имеет большие размеры, поскольку из-за уменьшенного расхода воздуха сохраняются большие углы отставания на основной части пера лопатки. Однако градиент скорости в зоне 3, по сравнению со срывным режимом, значительно уменьшился, что также благоприятно сказывается на общей картине течения в межлопаточном канале. Сравнение параметров при работе на срывном режиме без вдува и с вдувом рабочего тела на втулке представлено в таблице 2. Применение вдува позволило восстановить КПД рабочего колеса практически до номинального значения, а рабочий процесс сделать более устойчивым.

Таблица 2

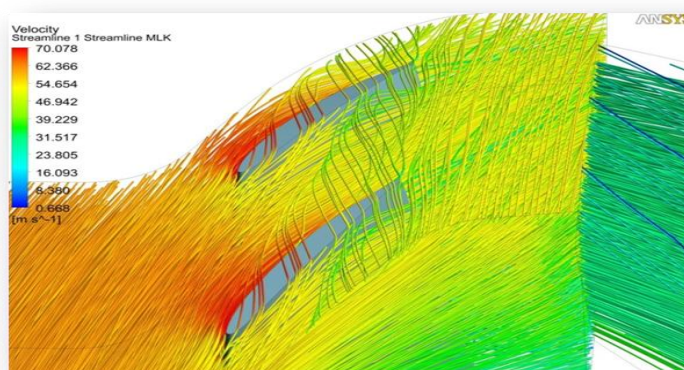
Сравнение параметров на нерасчетном (срывном) режиме без применения и с применением вдува

Параметры	Режимы работы ступени	
	Нерасчетный (срывной) режим	Нерасчетный (срывной) режим
	Без вдува	С вдувом
Полное давление на выходе, Па	101102	101121
Полная температура на выходе, К	297,13	297,129
Реальная работа компрессора, Дж/кг	1154,57	1159,79
Идеальная работа компрессора, Дж/кг	866,396	876,993
КПД рабочего колеса	78,05%	78,96%
КПД ступени	67,17%	68,63%

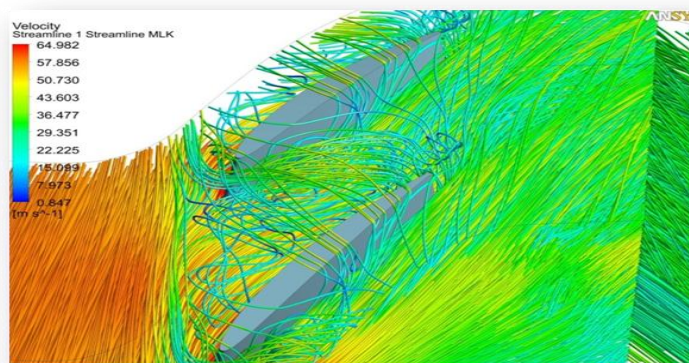
Управление течением в области радиального зазора

Вторым предлагаемым способом управления вторичными течениями в рабочих колесах осевых компрессоров является вдув воздуха в радиальный зазор между рабочим колесом и корпусом с целью уменьшения перетекания воздуха.

В ходе исследования данного способа проведен расчет экспериментальной ступени установки для газодинамического исследования [3] на расчетном и нерасчетном (срывном) режимах. Результаты данного расчета представлены на рисунке 4.



а)



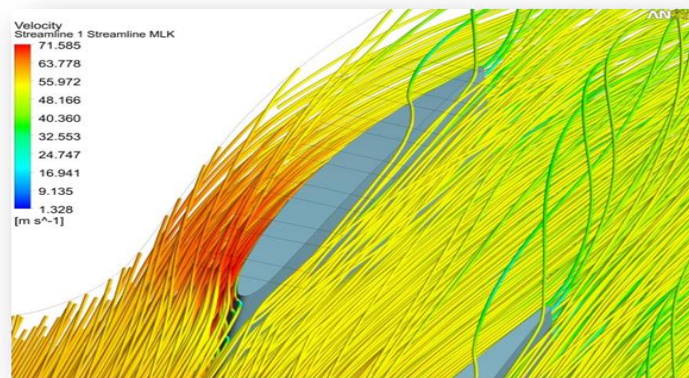
б)

а) расчетный режим; б) нерасчетный (срывной) режим

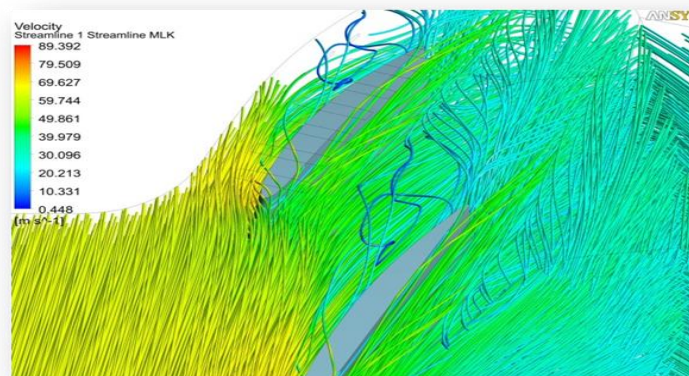
Рисунок 4 – Визуализация течения на расчетном и нерасчетном режимах работы

Как видно из рисунка 4 количество перетекающего через радиальный зазор воздуха на нерасчетном (срывном) режиме значительно возрастает.

Проведен расчет на расчетном и нерасчетном (срывном) режимах с применением активного управления в радиальном зазоре между рабочим колесом и корпусом на модели лопатки. Результаты расчета представлены на рисунке 5 и в таблице 3.



а)



б)

а) расчетный режим; б) нерасчетный (срывной) режим

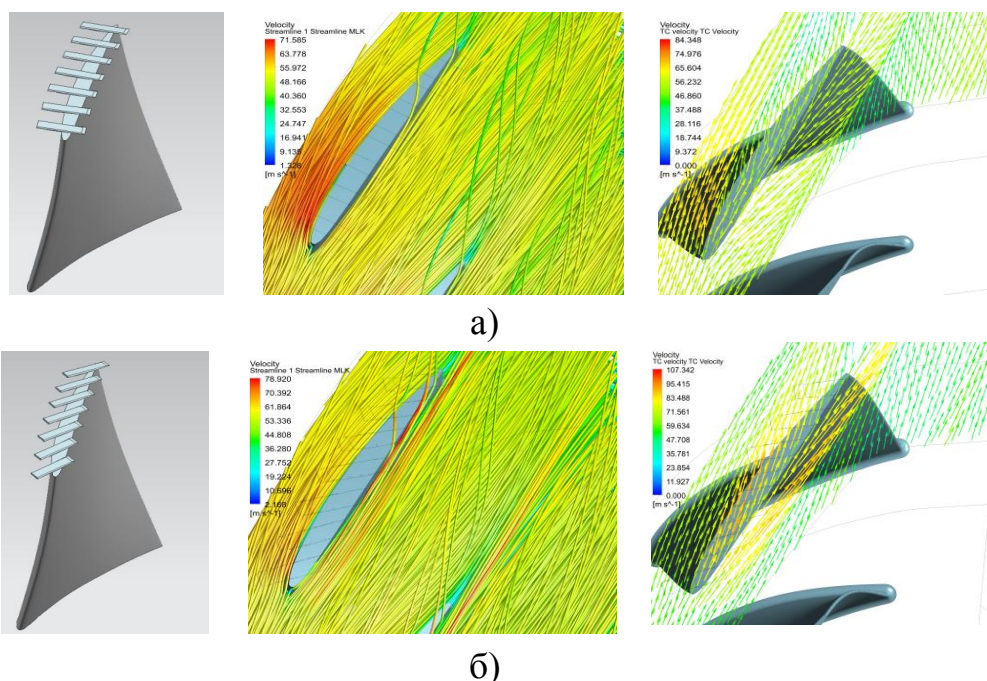
Рисунок 5 – Визуализация течения с применением вдува воздуха между рабочим колесом и корпусом

Сравнение параметров ступени на нерасчетном (срывном) режиме работы без применения и с применением вдува

Параметры	Режим работы ступени		
	Расчётный режим	Нерасчетный (срывной) режим	Нерасчетный (срывной) режим с применением вдува, 90 м/с
Полное давление на выходе, Па	101068	101102	101274
Полная температура на выходе, К	296,87	297,13	297
Реальная работа ступени, Дж/кг	870,13	1154,57	1157,51
Идеальная работа ступени, Дж/кг	790,66	866,4	1042,29
Расход воздуха через ступень, кг/с	2,3	1,6	1,6
Расход воздуха на вдув, кг/с	–	–	0,0382
КПД ступени, %	84,3	66	78,3

Так же в рамках данного расчетного исследования проведены расчеты на расчетном режиме с варьированием размещения каналов подвода рабочего тела и скорости вдува для оценки количественного изменения характеристик ступени.

Изменение параметров ступени с применением различных вариантов вдува представлено на рисунке 6 и в таблицах 4-5.



а) вдув перпендикулярно средней линии профиля;

б) вдув под углом 45° к средней линии профиля

Рисунок 7 – Визуализация течения с различным размещением отверстий вдува

Таблица 4

Сравнение параметров ступени при различном размещении каналов вдува

Параметры	Расположение подводящих каналов		
	Без вдува	Перпендикулярно средней линии профиля	Под углом 45° к средней линии профиля
Давление на входе, Па	100200	100200	100200
Давление на выходе, Па	101068	101065	101071
КПД ступени, %	84,3	85,1	84,7

Сравнение параметров ступени при различной скорости вдува

Параметры	Расположение подводящих каналов			
	Без вдува	С вдувом		
Скорость вдува, м/с	–	70	80	90
Полное давление на выходе, кПа	101,07	101,06	101,07	101,07
Полная температура на выходе, К	296,9	296,8	296,8	296,8
Реальная работа ступени, Дж/кг	870,1	852,1	845,9	841,5
Идеальная работа ступени, Дж/кг	790,7	786,2	786,9	790,8
Расход воздуха на вдув, кг/с	–	0,034	0,038	0,043
КПД ступени, %	84,3	85,5	86,3	87,2

Результаты расчетного исследования показали, что эффективность управления вторичными течениями в радиальном зазоре зависит от скорости вдува и размещения каналов подвода рабочего тела.

Выводы

По результатам расчётных исследований можно сделать следующие выводы:

- 1) Существует принципиальная возможность активного управления течением в рабочих колёсах осевых компрессоров посредством применения в качестве управляющего воздействия вдува рабочего тела у втулки и в

радиальный зазор рабочих колес, которые являются эффективными способами уменьшения вторичных течений.

- 2) В большей степени управляющий эффект проявляется на нерасчётных режимах работы ступени, эффективность управляющего воздействия зависит от направления, силы вдува, а также от формы, количества и размещения каналов подвода рабочего тела.

Авторы выражают благодарность научному руководителю

Черкасову Александру Николаевичу.

Библиографический список

1. Агульник А. Б., Бакулев В. И., Гогубев В. А., Кравченко И. В., Крылов Б. А. Термогазодинамические расчеты и расчет характеристик ГТД. - М.: Изд-во МАИ, 2002. – 256 с.
2. Черкасов А.Н., Алексеев А.А., Гребенюк А.Ю., Клепиков Д.С. Экспериментальная установка для параметрического исследования течения рабочего тела в ступени осевого компрессора // Тезисы докладов научно-технической конференции, посвященной 70-летию со дня основания КБХА, Воронеж, 2011. С. 26-28.
3. Экспериментальная установка для визуализации течения в межлопаточном канале рабочего колеса осевого компрессора. Патент на полезную

модель № 125338 от 07.11.2011. / Черкасов А.Н., Алексеев А.А., Клепиков Д.С.,
Матвеев А.Ю., Кривошеев С.Ю., Татарников А.Г.