

УДК 533.697.242

ПРИМЕНЕНИЕ СПОСОБА АКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ВТОРИЧНЫМИ ТЕЧЕНИЯМИ У ВТУЛКИ РАБОЧЕГО КОЛЕСА ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА

А. Н. ЧЕРКАСОВ¹, И. И. АЛЕКСЕЕВ², И. М. ГОЛЕВ³, П. П. БАСТРЫКИН⁴

¹gliden@inbox.ru, ²ivanalexeeff74@yandex.ru, ³imgolev@gmail.com, ⁴pavelbastrykin@yandex.ru

ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж)

Поступила в редакцию 28.08.2018

Аннотация. Представлены результаты исследования возможности применения нового способа активного управления вторичными течениями у втулки рабочего колеса осевого компрессора газотурбинного двигателя, основанного на вдуве рабочего тела с втулки рабочего колеса в область ее сопряжения со спинкой лопатки. По результатам расчетного исследования сделан вывод, что предложенный способ активного управления позволяет улучшить характеристики ступени осевого компрессора и повысить запас газодинамической устойчивости на нерасчетном (предсрывном) режиме работы. Предложено конструктивно-технологическое решение его реализации в конструкции компрессора низкого давления серийного двигателя типа АЛ-31 Ф.

Ключевые слова: осевой компрессор; запас устойчивости; способ управления течением; моноколесо; вторичные течения.

ВВЕДЕНИЕ

Аэродинамическое совершенствование проточной части осевых компрессоров турбореактивных двухконтурных двигателей летательных аппаратов для повышения запаса устойчивости является актуальной задачей [1].

Уменьшение запаса устойчивости компрессора низкого давления (КНД) при его дросселировании на высоких приведенных частотах вращения с наличием неравномерности потока на входе в турбореактивный двухконтурный двигатель с форсажной камерой сгорания со смещением потоков (ТРДДФсм) маневренного летательного аппарата может привести к помпажу двигателя. При этом, основное воздействие на запас устойчивости КНД при его работе на нерасчетных (предсрывных) режимах оказывает отрыв пограничного слоя (ПС) в области, прилегающей к месту сопряжения спинки

лопатки и втулки рабочего колеса (РК) последней ступени.

Применение способов пассивного управления течением в РК последней ступени КНД для повышения запаса устойчивости, таких как: надроторное устройство, луночная поверхность в комплексе с отбором ПС системой отверстий, выполненных на спинках лопаток РК [2, 3], показало их малую эффективность.

Решение задачи повышения запаса устойчивости необходимо искать на основе подходов, которые обеспечивают возможность основному потоку воздуха преодолеть действие факторов, приводящих к отрыву ПС в межлопаточном канале. Анализ существующих и перспективных способов управления течением в межлопаточных каналах осевых компрессоров (ОК) [4] указывает на возможность рационального выбора способа управления при определении этих факторов в рассматриваемой области.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Для разработки способа управления вторичными течениями у втулки РК авторами проведено исследование особенностей течения воздуха в межлопаточном канале РК с учетом влияния центробежных сил.

Исследование проведено на экспериментальной установке [5, 6], позволяющей визуализировать течение на ограничивающих поверхностях межлопаточного канала с помощью подкрашенной жидкости, подаваемой в область визуализации. Фиксация результатов эксперимента выполнялась на цифровую видеокамеру. Объектом исследования являлась ступень ОК (рис. 1), состоящая из входного направляющего аппарата (ВНА), РК и направляющего аппарата (НА), лопатки которых спрофилированы в программном комплексе (ПК) Mathcad и изготовлены с применением технологии 3D-печати.

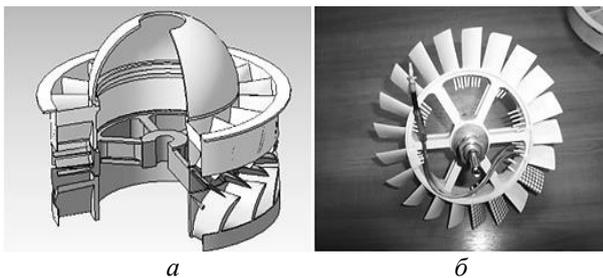


Рис. 1. Объект исследования:
а – трехмерная модель ступени ВНА, РК и НА;
б – экспериментальное РК, изготовленное на 3D-принтере

Видеоматериалы эксперимента позволили получить картины течения на ограничивающих поверхностях межлопаточного канала, представленные на рис. 2.

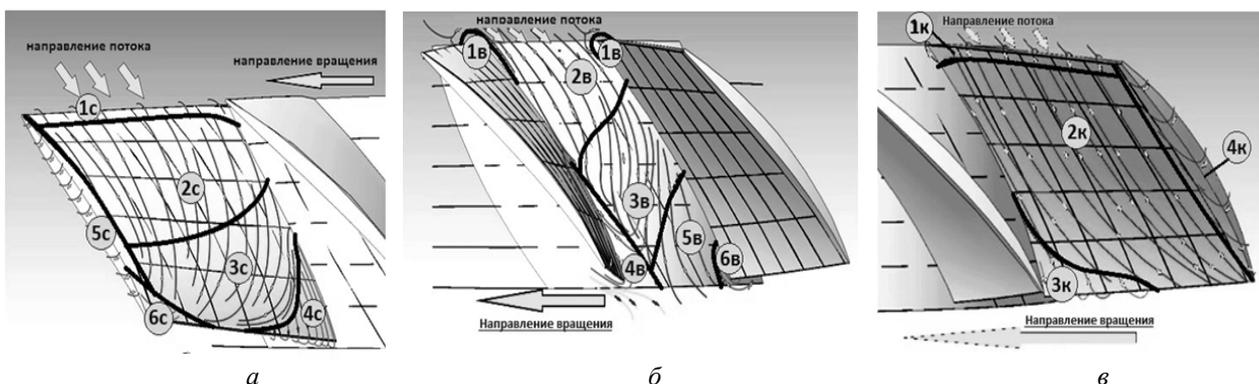


Рис. 2. Картины течения на ограничивающих поверхностях межлопаточного канала РК
а – на спинке; б – на втулке; в – на корыте лопатки

Анализ картин течения показал, что в области, прилегающей к месту сопряжения спинки лопатки и втулки РК, наблюдается отрыв ПС, возникающий вследствие резкого увеличения его толщины с обратным течением (область 4в и 4с), что вполне сопоставимо с известными ранее моделями картин течений Б. Лакшминараяна [7], Ю. М. Терещенко [8] и других авторов.

Результаты эксперимента позволили установить, что центробежные силы способствуют быстрому распространению отрыва ПС (область 4с, 4в) в сторону противоположную течению основного потока. На спинке лопатки в ПС наблюдается течение, направленное в сторону радиального зазора (область 3с). При этом отрыв ПС привел к появлению перетекания воздуха через заднюю кромку рабочей лопатки (РЛ) из области повышенного давления на корыте (область 3к, 6в) в область пониженного давления на спинке (область 4с, 4в), что сопровождается дополнительными потерями энергии.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Дальнейшее исследование картины течения в межлопаточном канале РК проводилось с использованием методов численного моделирования разработанной трехмерной модели экспериментальной ступени ОК (рис. 3).

Для этого геометрия модели, выполненная в ПК КОМПАС 3D, импортирована в ПК Ansys CFX (лицензия № 1022486 от 25.12.2013 г.), в котором проведено численное исследование как на расчетном, так и на нерасчетном (предсрывном) режимах работы экспериментальной ступени ОК.

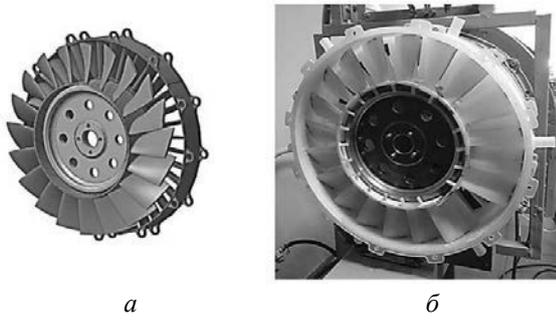


Рис. 3. Экспериментальная ступень осевого компрессора:
а – трехмерная модель ступени ОК;
б – ступень ОК изготовленная на 3D принтере

При создании численной модели в качестве рабочего тела задавался идеальный газ (Air Ideal Gas). Расчеты проводились в стационарной постановке задачи при постоянной частоте вращения рабочего колеса $n = 2800$ об/мин. Опция расчета передачи тепла – Total Energy. В качестве модели турбулентности выбрана модель SST, при этом количество элементов на данной модели составляет 4,1 млн ячеек.

Сравнение представленных на рис. 4 полей относительной скорости на спинке лопатки и втулке РК как на расчетном, так и на нерасчетном (предсрывном) режимах работы, показывает увеличение области отрыва ПС, что вполне коррелируется с полученными ранее картинами течения.

СПОСОБ АКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ

На основании анализа результатов расчетно-экспериментальных исследований предложен способ активного управления вторичными течениями у втулки РК [9]. Способ заключается во вдуве рабочего тела (воздуха) через подводящие каналы, выполненные во втулке РК, в область, прилегающую к месту сопряжения спинки лопатки и втулки, как изображено на рис. 5, для создания условий предотвращения отрыва ПС и вихреобразования, выравнивания направления и обеспечения равномерного поля скоростей потока на выходе из РК.

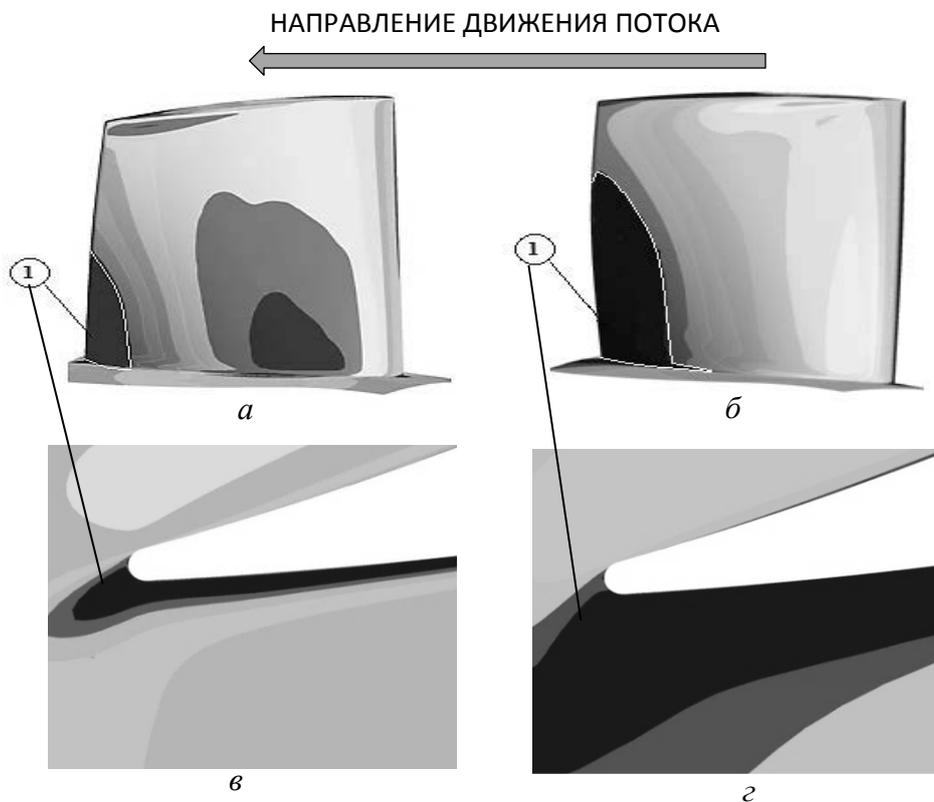


Рис. 4. Поля относительной скорости:
а – на спинке рабочей лопатки на расчетном режиме; *б* – на спинке рабочей лопатки на предсрывном режиме;
в – на втулке рабочей лопатки на расчетном режиме; *г* – на втулке рабочей лопатки на предсрывном режиме;
1 – область отрыва пограничного слоя

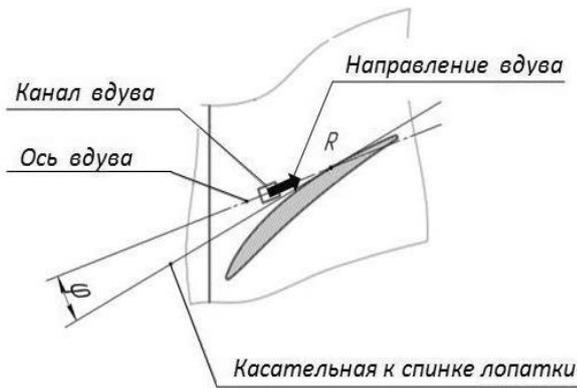


Рис. 5. Схема размещения канала вдува воздуха на втулке РК

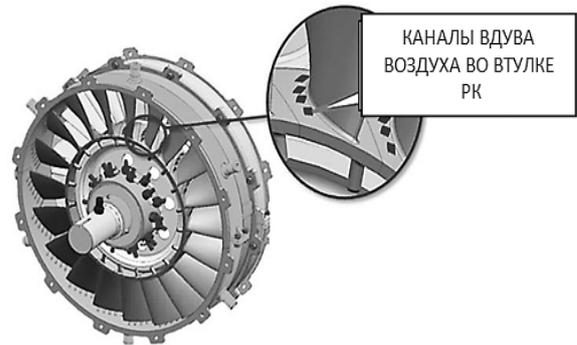


Рис. 6. Трехмерная модель экспериментальной ступени осевого компрессора с применением активного управления

Отбор рабочего тела для подвода его к 4-й ступени КНД ТРДДФсм, при установке на ней данного способа, предлагается производить от средних ступеней компрессора высокого давления (КВД), либо от любого другого внешнего источника сжатого рабочего тела.

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА АКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕЧЕНИЕМ

Для определения параметров, от которых зависит эффективность предлагаемого способа активного управления, проведено расчетное исследование экспериментальной ступени ОК. Во втулке РК разработанной трехмерной модели экспериментальной ступени ОК, представленной на рис. 6, спроектированы каналы вдува воздуха.

В расчетном исследовании изменялись: количество каналов вдува (1, 2, 3); скорость вдува ($W_{\text{вдув}} = 40, 50, 60$ м/с);

направление вдува ($\varphi = 5, 10, 15$ градусов). Где угол φ , это угол между осью вдува и касательной к спинке лопатки в точке R - точке предполагаемого вдува на спинке лопатки. Граничные условия при создании численной модели ступени применены аналогичные, как при расчете без активного управления.

Анализ векторных полей относительной скорости на спинке РЛ с применением наиболее эффективных вариантов предлагаемого способа активного управления, представленных на рис. 7, позволяет сделать вывод, что влияние управления течением распространяется не только на ПС на втулке РК, но и заметно изменяет течение в привтулочной области на поверхности спинки лопатки до 30 % ее высоты. Применение активного управления течением у втулки РК помогает основному потоку преодолевать воздействие факторов, приводящих к отры-

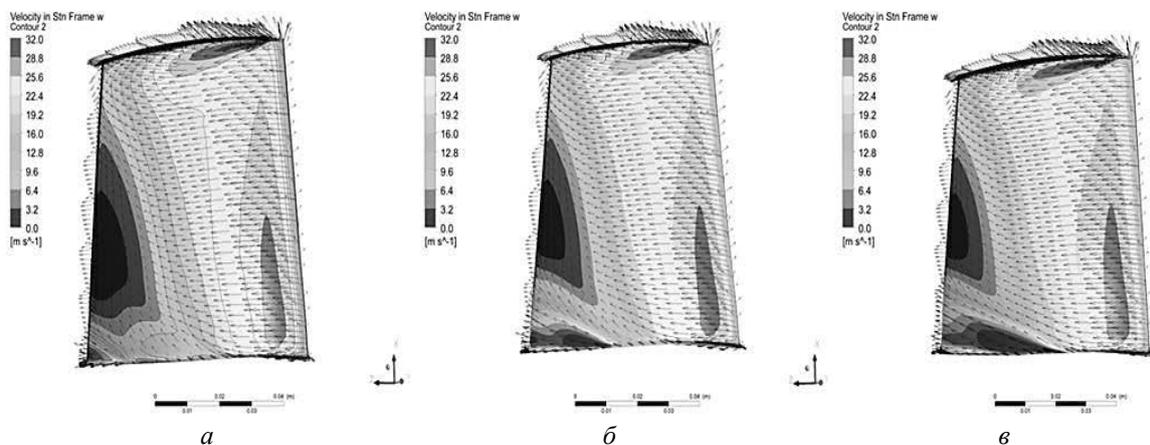


Рис. 7. Векторные поля относительной скорости на спинке рабочей лопатки:
 а – 1 канал, угол $\varphi = 15^\circ$, $W_{\text{вдув}} = 60$ м/с; б – 2 канала, угол $\varphi = 5^\circ$, $W_{\text{вдув}} = 50$ м/с;
 в – 3 канала, угол $\varphi = 5^\circ$, $W_{\text{вдув}} = 40$ м/с

Таблица 1

Влияние способа активного управления на поле распределения относительной скорости по высоте лопаток экспериментальной ступени на нерасчетном (предсрывном) режиме работы

Наличие активного управления	Высота расположения сечений рассматриваемых полей распределения относительной скорости по длине лопаток экспериментальной ступени, %		
	1	10	25
Без активного управления			
С активным управлением			

водящих к отрыву ПС в межлопаточном канале у втулки, что способствует выравниванию направления потока и обеспечению равномерности поля скоростей на выходе из РК.

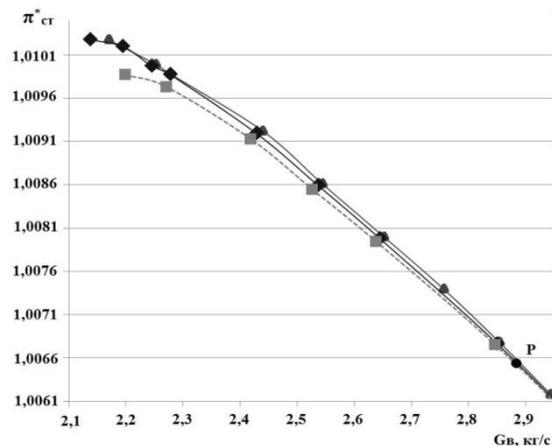
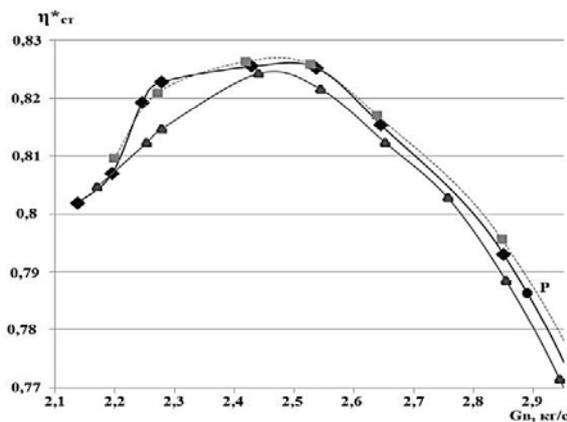
В свою очередь управление течением приводит к выравниванию углов атаки на НА в его привтулочной области. Это обеспечивает значительное уменьшение отрывных течений во всей ступени, что отражено в табл. 1.

Анализ обобщенной характеристики экспериментальной ступени, представленной на рис. 8, позволил сделать вывод, что наиболее эффективной является модель с двумя каналами, вдув из которых осуществляется со скоростью $w_{вдув} = 50$ м/с под

углом $\varphi = 5^\circ$ к касательной к спинке лопатки в точке на спинке лопатки РК, на которую направлен вдув.

При этом коэффициент полезного действия (КПД) ступени $\eta_{ст}^*$ определялся по формуле (1) с учетом затрат на сжатие воздуха, подаваемого от внешнего источника, КПД $\eta_{внеш}^*$ которого равен 70 %.

$$\eta_{ст}^* = \frac{c_p T_1^* \left(\pi_{ст}^{*k} - 1 \right) G_{в}}{\omega M + c_p T_{вд}^* \left(\frac{P_{вд}^*}{101325} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1} G_{вд} \cdot \eta_{внеш}^* \quad (1)$$



- ▲— вдув воздуха через 2 канала со скоростью 60 м/с, угол $\varphi = 5^\circ$;
- ◆— вдув воздуха через 2 канала со скоростью 50 м/с, угол $\varphi = 5^\circ$;
- без вдува; P – рабочая точка.

Рис. 8. Обобщенная характеристика экспериментальной ступени ОК с применением эффективных вариантов активного управления

Увеличение запаса устойчивости экспериментальной ступени ОК при вдуве воздуха со скоростью $W_{\text{вдув}} = 50$ м/с через два канала под углом $\varphi = 5^\circ$ к касательной к спинке лопатки, достигает 4 %. КПД ступени с учетом затрат работы на сжатие вдуваемого воздуха не уменьшается.

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ РЕАЛИЗАЦИИ НОВОГО СПОСОБА УПРАВЛЕНИЯ

Основная проблема применения предлагаемого способа активного управления заключается в возможности конструктивно-технологического решения. В существующих газотурбинных двигателях его применение с использованием устаревших технологий сильно усложняет конструкцию и технологический процесс изготовления РК. В связи с этим рассмотрены перспективные технологии, которые успешно внедряются и используются на передовых двигательных предприятиях, таких как ПАО «ОДК-УМПО», ПАО «НПО «Сатурн», ОАО «Авиадвигатель». Современные технологии позволяют найти новый подход к решению данной проблемы.

Авторами предложен вариант конструктивно-технологического решения реализации нового способа управления течением в конструкции КНД серийного двигателя типа АЛ-31Ф [10], конструктивная схема которого представлена на рис. 9. Отбираемый воздух от средних ступеней КВД по трубопроводам поступает во внутренние полости силовых стоек промежуточного корпуса (1). Далее через трубопровод (2), воздух поступает в канал, образованный верхней и нижней крышками с уплотнениями (3). Для уменьшения потерь давления в качестве уплотнений рекомендуется применить современные щеточные уплотнения. Воздух из канала поступает в междисковую область наддува (А). Данная область формируется задней цапфой, диском 3-й ступени (4) и диском 4-й ступени (5) КНД. Затем через каналы подвода воздуха выполненные в диске РК 4-й ступени, воздух поступает в полости вдува (Б). Данные полости образуются между углублениями в диске на поверхности втулки и вваренными в них пластинами с профилированными каналами вдува (6). Через эти каналы воздух вдувается в область сопряжения спинки лопатки и втулки РК.

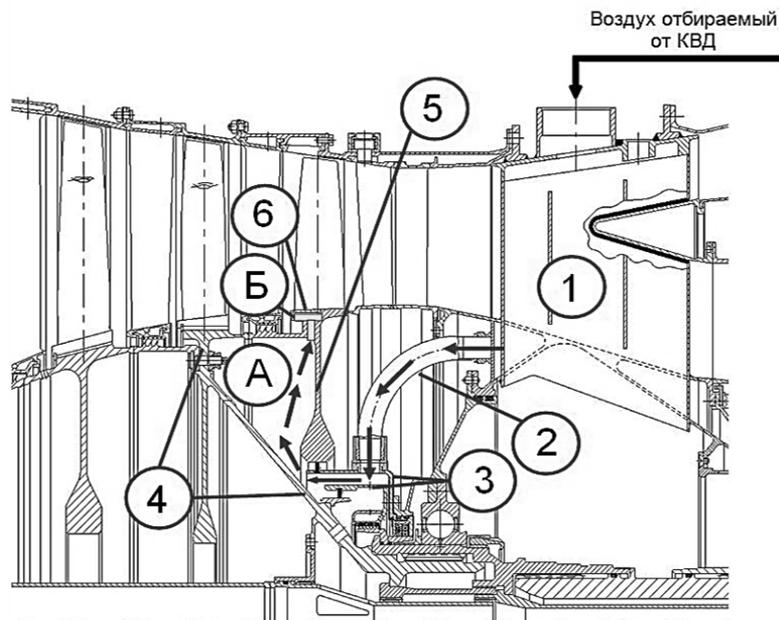


Рис. 9. Конструктивная схема компрессора низкого давления серийного двигателя типа АЛ-31Ф с активным управлением течением у втулки РК:

1 – стойка промежуточного корпуса; 2 – трубопровод; 3 – крышки с щеточными уплотнением; 4 – цапфа и диск РК 3-й ступени КНД; 5 – моноколесо 4 ступени; 6 – пластина с профилированными каналами вдува; А – междисковая область наддува; Б – полость вдува.

Для упрощения технологического процесса по изготовлению РК 4 ступени с применением нового способа, вместо традиционной конструкции рабочего колеса с замковым соединением предлагается моноколесо, изготовленное по схеме, близкой к схеме Blisk (Blade + Disk) [11, 12], путем сборки ранее обработанных диска и лопаток с помощью линейной сварки трением. При этом массово-габаритные параметры КНД не ухудшаются.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, эффективность предлагаемого способа активного управления течением у втулки РК ОК зависит от направления, скорости вдува и количества каналов вдува воздуха. Применение предлагаемого способа на экспериментальной низконапорной ступени позволило увеличить ее запас устойчивости на 4 %. Современные технологии позволяют изготовить конструкцию КНД двигателя типа АЛ-31Ф с предлагаемым способом активного управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Теория** авиационных двигателей: учебник / Ю. Н. Нечаев и др. М.: Изд-во ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 2006. 336 с. [Yu. N. Nechaev, et al., *Theory of an aircraft gas-turbine engines*, (in Russian). Moscow: Isdatelstvo VVIA im. prof. N. E. Zhukovskogo, 2006.]
2. **Исследование** и анализ аэродинамического воздействия на режим обтекания профиля лопатки, обеспечивающего улучшение характеристик ступени компрессора низкого давления: Аннотационная справка 1900.014 ТС Параметрическое исследование геометрических факторов, формирующих вихревую структуру потока газа при обтекании контура модифицированной лопатки КНД. Отчет МАИ, этап III. М. 2010. [“Research and analysis of aerodynamic impact on the flow regime around the blade profile, which gives improvement of low-pressure axial compressor stage characteristics” (in Russian), publ. 117C. Annotation certificate 1900.014 TS. Parametrical research of geometric factors, which forms vortex structure of gas flowing around the low-pressure axial compressor modified blade contour. MAI report, stage III. Moscow, 2010.]
3. **Щербаков М. А., Марчуков Е. Ю., Картовицкий Л. Л.** Вихревое структурирование потока в межлопаточном канале компрессорной решетки // Вестник МАИ. 2010. [М. А. Scherbakov, Е. Yu. Marchukov, L. L. Kartovitsky, “Vortex structuring of the flow in the passage of a compressor cascade”, (in Russian), in *Vestnik MAI*, 2010.]
4. **Черкасов А. Н., Алексеев И. И., Клепиков Д. С.** Направления совершенствования осевых компрессоров авиационных двигателей // Насосы. Турбины. Системы: науч.-техн. журнал. 2017. Воронеж, С. 24–32.

[A. N. Cherkasov, I. I. Alekseev, D. S. Klepikov, “Trend of improvement of a gas-turbine axial compressors” (in Russian), in *Nasosy. Turbiny. Systemy*, pp. 24-32, 2017.]

5. **Черкасов А. Н. [и др.]**. Патент на полезную модель № 125338 от 07.11.2011. Экспериментальная установка для визуализации течения в межлопаточном канале рабочего колеса осевого компрессора. [A. N. Cherkasov, et al., utility model patent № 125338 from 07.11.2011. Experimental device for visualization of the passage flow of an axial compressor.]

6. **Экспериментальная** установка для визуализации течения в ступенях осевых компрессоров / А. Н. Черкасов и др. // Насосы. Турбины. Системы: науч.-техн. журнал № 1 (22). 2017. Воронеж. С. 34–41. [A. N. Cherkasov, et al., “Experimental device for visualization of the passage flow of an axial compressors stages,” (in Russian), in *Nasosy. Turbiny. Systemy*, no. 1 (22), pp. 34-41, 2017.]

7. **Lakshminarayana B., Horlock J. H.** 1967 Leakage and secondary flow in compressor cascade. Aeronautical Research Council, R & M 3483. [B. Lakshminarayana, J. H. Horlock, *Leakage and secondary flow in compressor cascade. Aeronautical Research Council*, R & M 3483, 1967.]

8. **Терещенко Ю. М.** Аэродинамическое совершенствование лопаточных аппаратов компрессоров. М.: Машиностроение. 1988. 168 с. [Yu. M. Tereschenko, *Aerodynamic improvement of compressors blade machines*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1988.]

9. **Черкасов А. Н. [и др.]** Патент на полезную модель № 2633221 от 11.10.2017. Осевой компрессор. [A. N. Cherkasov, et al. Utility model patent № 2633221 from 11.10.2017. Axial compressor.]

10. **Конструктивно-технологическое** решение применения способа активного управления вторичными течениями на втулке рабочих колес осевого компрессора современного ГТД. / А. Н. Черкасов и др. // Современная наука: проблемы и перспективы. Ставрополь: Изд-во НИЦ Логос, 2017. [A. N. Cherkasov, et al. “Constructive and technological decision for the active control method of secondary currents on axial compressor impeller hub of modern gas turbine engine.” (in Russian), in *Sovremennaya nauka: problemy i perspektivy*, 2017.]

11. **Багров С. В., Уваров Л. Б.** Оптимизация технологических процессов изготовления осевых моноколес компрессоров газотурбинных двигателей // Полет. М.: Машиностроение. 2009. № 12. С. 24–32. [S. V. Bagrov, L. B. Uvarov, “Optimization of manufacturing of technological process of axial mono-wheel of a gas-turbine engine,” (in Russian), in *Polet*, no. 12, pp. 24-32, 2017.]

12. **Паутов А. Н.** Влияние конструкции блисков на технологию их производства с применением линейной сварки трением // Научно-технические проблемы современного двигателестроения. Уфа: изд-во УГАТУ, 2016. 359 с. [A. N. Pautov, “Influence of blisk construction on their manufacture technology with usage of linear friction welding,” (in Russian), in *Nauchno-tehnicheskie problemy sovremennogo dvigatelestroeniya*, p. 359, 2016.]

ОБ АВТОРАХ

ЧЕРКАСОВ Александр Николаевич, начальник кафедры авиационных двигателей ВУНЦ ВВС «ВВА» (г. Воронеж) канд. техн. наук, доцент, (Иркутское ВВАИУ, 1996). Иссл. в обл. повышения запаса устойчивости осевых компрессоров ГТД.

АЛЕКСЕЕВ Иван Иванович, преподаватель кафедры авиационных двигателей ВУНЦ ВВС «ВВА» (г. Воронеж), (Иркутское ВВАИУ, 1996). Иссл. в обл. повышения запаса устойчивости осевых компрессоров ГТД.

ГОЛЕВ Игорь Михайлович, профессор кафедры химии и физики ВУНЦ ВВС «ВВА» (г. Воронеж). (Воронежский политехнический институт, 1980) Доктор физико-математических наук. Иссл. в обл. совершенствования газодинамических процессов авиационных ГТД.

БАСТРЫКИН Павел Павлович, старший оператор научной роты (МАИ, 2017). Иссл. в обл. повышения запаса устойчивости осевых компрессоров ГТД.

METADATA

Title: The explanation of possible usage of an active control method of secondary currents on low-pressure axial compressor impeller hub of two-circuit gas-turbine engine with afterburner.

Authors: A. N. Cherkasov¹, I. I. Alekseev², I. M. Golev³, P. P. Bastrykin⁴

Affiliation: Military science center of Air Force «Prof. N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin military and air academy», Voronezh, Russia..

Email: ¹ gliden@inbox.ru, ² ivanalexeff74@yandex.ru, ³ imgolev@gmail.com, ⁴ pavelbastrykin@yandex.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 22, no. 3 (81), pp. 71-78, 2018. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: This article introduces the research result about possibility of using new active control method of secondary flows in the impeller hub of an axial-flow turbojet engine, based on injection of the working fluid from the impeller hub into the area of its interface with the blade back. According to the results of the calculated analysis, it was concluded that the proposed method of the active control allows to improve characteristics of an axial-flow compressor stage and raise stall margin on an off-design behavior. A constructive and technological solution for its implementation was suggested in construction of a low-pressure compressor of the current gas-turbine engine AL-31F.

Key words: axial compressor; work limit; flow control method; mono-wheel; secondary currents.

About authors:

CHERKASOV, Alexandr Nikolaevich, Head of the subdepartment, docent of Military science center of Air Force «Prof. N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin military and air academy», Voronezh, (IVVAIU, 1996). Candidate of technical sciences.

ALEKSEEV, Ivan Ivanovich, Faculty instructor of Military science center of Air Force «Prof. N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin military and air academy», Voronezh (IVVAIU, 1996).

GOLEV, Igor Mikhaylovich, Professor of chemistry and physics subdepartment of Military science center of Air Force «Prof. N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin military and air academy», Voronezh. Doctor of physical and mathematical sciences.

BASTRYKIN, Pavel Pavlovich, Science troop operator of Military science center of Air Force «Prof. N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin military and air academy», Voronezh, (MAI, 2017).