

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.285.07,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
АВТОНОМНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ «УРАЛЬСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
ПЕРВОГО ПРЕЗИДЕНТА РОССИИ Б.Н. ЕЛЬЦИНА», МИНИСТЕРСТВО
НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ,
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 07 июня 2019 г. № 7

О присуждении Серкову Сергею Александровичу, гражданство Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Идентификация и устранение углового отрыва потока в лопаточных венцах при решении задач численного моделирования течения в осевых компрессорах ГТД» по специальности 05.04.12 – Турбомашинны и комбинированные турбоустановки принята к защите 27 марта 2019 г. (протокол заседания № 6) диссертационным советом Д 212.285.07, созданным на базе ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Минобрнауки России, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; созданным приказом Минобрнауки России № 763/нк от 05.11.2013 г.

Соискатель, Серков Сергей Александрович, 1992 года рождения, в 2015 году окончил ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по специальности 140503 Газотурбинные, паротурбинные установки и двигатели; обучается в очной аспирантуре ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по направлению 13.06.01 Электро- и теплотехника (Турбомашинны и комбинированные турбоустановки),

предполагаемый срок окончания аспирантуры – 31.08.2019 г.; работает в должностях инженера и преподавателя (по совместительству) кафедры «Турбины и двигатели» Уральского энергетического института ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», Минобрнауки России.

Диссертация выполнена на кафедре «Турбины и двигатели» Уральского энергетического института ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Минобрнауки России.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор, Бродов Юрий Миронович, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», кафедра «Турбины и двигатели», заведующий кафедрой.

Официальные оппоненты:

Рассохин Виктор Александрович, доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», кафедра «Турбины, гидромашины и авиационные двигатели», научный руководитель кафедры;

Плотников Андрей Игоревич, кандидат технических наук, ОАО «Авиадвигатель», г. Пермь, Отдел расчетно-экспериментальных работ по компрессорам, начальник бригады

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – ОАО «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова», г. Санкт-Петербург, в своем положительном отзыве, подписанном Нечкиным Борисом Владимировичем, кандидатом технических наук, доцентом, заведующим лабораторией компрессорных установок, воздухоподготовки и шумоглушения энергетического оборудования отдела исследования турбоустановок, и Моховым Алексеем Валентиновичем, кандидатом технических наук,

ведущим инженером лаборатории аэродинамики турбин отдела исследования турбоустановок, указали, что диссертация Серкова С. А. посвящена важной научной и практической задаче, касающейся одного из основных элементов двигателя газотурбинной установки (ГТУ) – осевого компрессора, являющегося наиболее энергоемким элементом двигателя, потребляющим значительную долю мощности развиваемой турбиной, и во многом определяющим надежность и эффективность энергетической установки в целом. Выполненное Серковым С. А. исследование представляет собой законченную научно-исследовательскую работу прикладного характера и отвечает требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук Положением о присуждении ученых степеней, а ее автор, Серков Сергей Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.04.12 – Турбомашин и комбинированные турбоустановки.

Соискатель имеет 13 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 10 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 5 работ.

Другие публикации по теме диссертации представлены в виде 2 статей и 3 тезисов докладов, опубликованных в сборниках материалов Всероссийских (4) и Международных (1) научных конференций. Общий объем опубликованных работ – 9,52 п. л., авторский вклад – 7.31 п. л.

Наиболее значительные научные работы по теме диссертации:

1. Серков, С. А. Особенности верификации CFD-модели осевого компрессора. Часть 1: моделирование локальных эффектов и подбор параметров для совпадения с экспериментальными данными / Ю. М. Бродов, О. В. Комаров, В. А. Седунин, В. Л. Блинов, С. А. Серков // Компрессорная техника и пневматика. – 2018. – № 4. – С. 4–28 (2,64 п. л. / 2 п. л.).

2. Серков, С. А. Особенности верификации CFD-модели осевого компрессора. Часть 2: анализ интегральных параметров / Ю. М. Бродов, О. В. Комаров, В. А. Седунин, В. Л. Блинов, С. А. Серков // Компрессорная техника и пневматика. – 2018. – № 4. – С. 28–29 (0,35 п. л. / 0.25 п. л.).

3. Серков, С. А. Исследование прочностных характеристик лопаток осевого компрессора / В. А. Седунин, А. С. Нусс, С. А. Серков // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». – 2016. – № 3. – С. 90–99 (0,95 п. л. / 0.71 п. л.).

4. Серков, С. А. Верификация задачи численного моделирования течения воздуха в осевой компрессорной ступени / О. В. Комаров, В. А. Седунин, В. Л. Блинов, С. А. Серков // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение – 2016. – № 4. – С. 54–68 (1.54 п. л. / 1.25 п. л.).

5. Серков, С. А. Optimization approach and some results for 2d compressor airfoil / O. V. Komarov, V.A. Sedunin, V. L. Blinov, S. A. Serkov // International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems – 2016, - Vol. 8, № 3 P. 39–46; 0.77 п. л. / 0.6 п. л. (Scopus).

На автореферат диссертации поступили положительные отзывы:

1. **Кожухова Юрия Владимировича**, канд. техн. наук, и.о. директора Института энергетики и транспортных систем, и **Яблокова Алексея Михайловича**, ассистента кафедры компрессорной, вакуумной, холодильной техники и пневмосистем ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого». Содержит вопросы: 1) Не совсем понятно, как формула 3 (из автореферата) для фактора диффузорности применима к направляющему аппарату; 2) Не указано, какие программные комплексы использовались для численного моделирования; 3) В силу отсутствия данных по верификации численной модели на ряде других ступеней совпадение характеристик реальных испытаний и численного исследования может носить случайный характер; 4) в каких границах изменялось значение коэффициента влияния на вихревую вязкость a_1 ; 5) По каким критериям при стационарной постановке задачи определялась граница ГДУ.

2. **Новицкого Броцислава Брониславовича**, канд. техн. наук, доцента кафедры «Газотурбинные и нетрадиционные энергоустановки» ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э.

Баумана (национальный исследовательский университет)». Содержит вопросы: 1) С чем связан выбор именно фактора диффузорности для сравнения параметра? 2) В автореферате не показано, почему возможно использовать предложенную методику определения углового отрыва для перспективных высоконапорных ступеней осевых компрессоров.

3. **Тарасова Алексея Викторовича**, канд. техн. наук, первого заместителя директора – главного инженера ООО «Сибэкс», г. Екатеринбург. Содержит вопросы: 1) чем обусловлено увеличение расхода воздуха в осевом компрессоре с повернутым направляющим аппаратом второй ступени при сохранении напорности всего компрессора? 2) для какого режима работы ОК возможно применение данных критериев идентификации углового отрыва потока и на каком режиме необходимо применять оптимизацию лопаточного аппарата с помощью тангенциального навала?

4. **Власова Владимира Николаевича**, технического директора ООО «ПЛМ Урал», г. Екатеринбург. Содержит вопросы: 1) какие дополнительные способы влияния на совпадение результатов расчета и эксперимента были рассмотрены в исследовании при проведении верификации течения в ОК? 2) были ли рассмотрены вопросы, связанные с прочностью лопаточного аппарата при выработке рекомендации по аэродинамической оптимизации проточной части осевого компрессора низкого давления двигателя ДН80Л1?

5. **Максимова Сергея Юрьевича**, главного технолога по новой технике АО «Уральский завод гражданской авиации», г. Екатеринбург. Содержит вопросы: 1) с чем связан выбор только С-образной формы линия совмещения профилей по высоте лопатки? 2) почему верификация течения в ступенях ОК выполнена на модели компрессора 1980-х годов? С чем связан такой выбор?

6. **Мильмана Олега Ошеровича**, д-ра техн. наук, директора по науке, и **Кондратьева Антона Викторовича**, канд. техн. наук, инженера-испытателя ЗАО Научно-производственное внедренческое предприятие

«Турбоконт», г. Калуга. Содержит вопросы: 1) по тексту автореферата и в подписях к рисункам автор неоднократно употребляет конструкции типа «загромождение межлопаточного канала с помощью прямых физических величин», «загромождение канала критерием». Физические величины и критерии не загромождают канал, а используются для расчёта степени его загромождения вихрями; 2) непонятен смысл предложения «Однако, на выбранном режиме работы венца для применения оптимизации они [критерии] могут находиться не одновременно из-за различного характера течения в венцах и различной формы пера лопатки» на стр. 15; 3) на стр. 16 преимуществом кривой Безье 3 порядка названа возможность локального изменения формы линии совмещения профилей. Судя по описанию дальнейшей оптимизации, этим преимуществом автор не воспользовался; 4) по тексту автореферата присутствуют опечатки и несогласованности текста.

7. Панкова Сергея Владимировича, начальника отдела «Аэродинамика осевых компрессоров и вентиляторов ВРД. Газодинамическая устойчивость компрессоров» ФГУП «Центральный институт авиационного моторостроения имени П. И. Баранова», г. Москва. Содержит вопросы: 1) Не достаточно подробно представлены программные комплексы, применяемые для стационарного и нестационарного расчёта, а также модель турбулентности SST с $y^+ < 1$, разностная схема, расчётные сетки и др. особенности алгоритмов; 2) в отношении стационарного и нестационарного расчёта, заметим, что если окружная неравномерность в стационарном расчёте и не распространяется в соседние венцы, то распределения параметров по высоте (средних по шагу значений) учитываются. Вследствие турбулентного перемешивания в многоступенчатом компрессоре достаточно быстро уже за группой первых ступеней вырабатываются автотельные профили распределений по высоте средних по шагу параметров с завалами в корневых сечениях; 3) При использовании кривой Безье третьего порядка существенно меняется форма профилей, образующихся пересечением осесимметричных поверхностей тока

с модифицированной таким образом лопаткой. Исходя из этого, не понятно, что следует сохранить при профилировании, например, углы атаки или что-нибудь ещё? 4) при оптимизации лопаточных венцов следует учитывать также многообразие других особенностей конструкции. В случае рабочих лопаток следует учитывать также радиальные зазоры между вращающимися лопатками и наружным корпусом; 5) фактор диффузорности рассматривают, как критерий в смысле возможности осуществить желаемые величины параметров при проектировании. Но в расчетах, если не реализуются заявленные величины, то его величина не достигает критических значений просто потому, что поток не тормозится и не поворачивает на необходимый угол с образованием отрывов. 6) Из-за выбранного масштаба не удалось подробно рассмотреть рисунки 5 и 6.

8. **Ямалтдинова Артема Альбертовича**, канд. техн. наук, заместителя главного конструктора АО «Уральский турбинный завод», г. Екатеринбург. Содержит вопросы: 1) возможно ли использовать полученные результаты исследования в многоступенчатом осевом компрессоре при высоких дозвуковых числах Маха? 2) рассмотрена ли нестационарная постановка задачи для верификации течения в низкоскоростном дозвуковом компрессоре?

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- **установлено** значение коэффициента для определения вихревой вязкости потока при CFD расчете, обеспечивающее наилучшее совпадение результатов CFD расчета с экспериментальными данными на различных режимах работы ОК;
- **разработаны** критерии для идентификации углового отрыва в межлопаточном канале ОК при решении задачи численного моделирования;
- **разработан** критерий для определения размеров углового отрыва;
- **предложен** способ определения условий работы венца на основе разработанных критериев идентификации углового отрыва;

- **предложен и физически обоснован** подход к параметрическому проектированию формы линии совмещения плоских профилей лопаточного венца ОК в тангенциальном направлении с помощью кривой Безье третьего порядка;

- **разработаны** критерии для выбора режима работы лопаточного венца, на котором должна проводиться оптимизация формы ЛА с помощью тангенциального навала для достижения максимального эффекта.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- **предложены и обоснованы** внесенные коэффициенты для определения вихревой вязкости, которые могут быть применены в целях улучшения совпадения результатов CFD расчета с экспериментом для установки качественной и количественной картины течения в осевом низкоскоростном компрессоре. Установлено, что наилучшее совпадение результатов CFD расчета и эксперимента достигается при влиянии на вихревую вязкость с помощью коэффициента a_1 , который может варьироваться в диапазоне 0.27...0.4;

- **разработаны** два критерия (WS_a и TI_a) для идентификации углового отрыва в межлопаточном канале ОК на этапе CFD моделирования. Первый критерий идентифицирует отрыв потока от поверхности лопатки и показывает степень удаленности режима работы венца от своей границы ГДУ. Второй критерий позволяет определить размеры области всего вихревого движения потока в межлопаточном канале. В результате исследования выделены критические значения для критериев № 1 и № 2, которые находятся в диапазоне 1.6...1.8 и 4...7% соответственно. При этом получена диаграмма для определения работоспособности венца, которая отражает режим его работы на основе загромождения канала и степени устойчивости венца к отрыву потока;

- **предложена и подтверждена** эффективность использования линии совмещения плоских профилей по высоте лопатки с помощью кривой Безье 3 порядка. Для проверки эффективности применения тангенциального навала использованы установленные критерии № 1 и № 2. Определен максимальный прогиб пера лопатки, при котором достигается максимальная эффективность с точки зрения снижения размеров углового отрыва. В результате

применения тангенциального навала в направляющем аппарате исследуемого низкоскоростного двухступенчатого ОК увеличился запас газодинамической устойчивости на 5 %;

- **реализован и апробирован** способ идентификации углового отрыва потока в межлопаточном канале при анализе результатов CFD расчета натурального ОК ГТД типа ДН80Л1. Для снижения размеров углового отрыва выполнена двухэтапная оптимизация направляющего лопаточного аппарата второй ступени в CFD программе с помощью тангенциального навала и с помощью изменения угла установки всего венца. На натурном ОК реализовано изменение угла установки всего венца НА2 в качестве первого этапа оптимизации данной установки.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

- **сформулированы** рекомендации для стационарных RANS методов, которые позволяют приблизить результаты CFD расчета низкоскоростного ОК к эксперименту на режимах работы с устойчивой вихревой структурой в потоке;

- **сформулированы** рекомендации по идентификации углового отрыва и определения его размеров с использованием разработанных критериев при решении задачи численного моделирования для различных режимов работы ОК;

- **предложены** рекомендации по выбору режима для оптимизации лопаточного венца в целях повышения его аэродинамической эффективности во всем диапазоне режимов работы ОК;

- **разработана и впервые апробирована** на натурной ГТУ методика определения степени распространения углового отрыва как устойчивой структуры потока;

- **выработаны** рекомендации по оптимизации направляющего аппарата второй ступени с помощью введения тангенциального навала и изменения угла установки лопаток для снижения размеров углового отрыва потока в компрессоре низкого давления (КНД) ГТД типа ДН80Л1 и

предложены рекомендации для линии совмещения плоских профилей, а также рекомендации к выбору наиболее эффективного способа оптимизации венцов осевого компрессора.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

результаты получены при использовании наиболее современных апробированных и научно обоснованных программ, методик численного трехмерного расчета течений; результаты численного моделирования течения в межлопаточном канале осевого компрессора хорошо соотносятся с результатами проведенных испытаний и с экспериментальными данными других авторов; установлено качественное совпадение части авторских результатов с результатами, представленными в независимых источниках по данной тематике.

Личный вклад соискателя состоит в научно-техническом обосновании поставленных целей и задач исследования; предложении и обосновании критерия для определения размеров углового отрыва потока газа в окружном и радиальном направлениях; разработке критерия выбора режима для применения оптимизации лопаточного венца, на котором тангенциальный навал будет наиболее эффективен для всего диапазона работы ЛА; постановке и проведении расчетных и оптимизационных исследований, направленных на выполнение поставленных задач; обработке и анализе полученных данных исследования; разработке рекомендаций для инженерной практики по аэродинамическому совершенствованию лопаточных венцов ОК ГТУ; подготовке публикаций по выполненной работе; участии и обработке результатов испытаний ГТД типа ДН80Л1 на объекте эксплуатации.

Диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация Серкова С. А. представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой изложены новые научно обоснованные технические решения и разработки, имеющие существенное значение для развития энергетической отрасли России в части проектирования, доводки и модернизации новых высокоэффективных осевых компрессоров

газотурбинных установок. Работа соответствует критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, п. 9 Положения о присуждении ученых степеней.

На заседании 07 июня 2019 г. диссертационный совет принял решение присудить Серкову Сергею Александровичу ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 6 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 17, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель заседания –
заместитель председателя
диссертационного совета,

В. А. Мунц

Ученый секретарь
диссертационного совета

К.Э. Аронсон

7 июня 2019 г.