

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.285.07
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АВТОНОМНОГО
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «УРАЛЬСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ПЕРВОГО ПРЕЗИДЕНТА РОССИИ
Б.Н. ЕЛЬЦИНА», МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК
аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 26.06.2015 г. № 6

О присуждении Блинову Виталию Леонидовичу, гражданство Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Разработка принципов параметрического профилирования плоских решеток осевых компрессоров ГТУ на основании результатов многокритериальной оптимизации» по специальности 05.04.12 – Турбомашины и комбинированные турбоустановки принята к защите 23 апреля 2015 г., протокол № 4 диссертационным советом Д 212.285.07 на базе ФГАОУ ВПО «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, Блинов Виталий Леонидович, 1990 года рождения, в 2011 году окончил ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по специальности «Газотурбинные, паротурбинные установки и двигатели»; обучается в очной аспирантуре ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по специальности 05.04.12 – Турбомашины и комбинированные турбоустановки (срок окончания аспирантуры – 31.03.2016 г.); работает в должности ведущего инженера кафедры «Турбины и

двигатели» Уральского энергетического института ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», Минобрнауки России.

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

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор, Бродов Юрий Миронович, ФГАОУ ВПО «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», заведующий кафедрой;

Арбеков Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана», кафедра «Газотурбинные и нетрадиционные энергоустановки», доцент,

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 Хоменком Леонидом Арсеньевичем, доктором технических наук, профессором, заместителем генерального директора, и Нечкиным Борисом Владимировичем, кандидатом технических наук, доцентом, заведующим лабораторией компрессорных установок указала, что диссертация Блинова В.Л. посвящена важной научной и практической проблеме, касающейся одного из основных элементов двигателя газотурбинной установки

(ГТУ) – компрессора, являющегося наиболее энергоемким элементом установки, потребляющим значительную долю мощности развиваемой турбиной, и во многом определяющим надежность и эффективность энергетической установки в целом.

Автореферат соответствует основным положениям и результатам диссертации.

Выполненные Блиновым В.Л. исследования представляют собой законченную научно-исследовательскую работу прикладного характера и отвечают требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Диссертационная работа «Разработка принципов параметрического профилирования плоских решеток осевых компрессоров ГТУ на основании результатов многокритериальной оптимизации» соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор Блинов Виталий Леонидович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.04.12 – Турбомашины и комбинированные турбоустановки.

Соискатель имеет 15 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 12 работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях – 5. Другие публикации по теме диссертации представлены в виде 5 статей и 2 тезисов докладов, опубликованных в сборниках материалов Всероссийских (5) и Международных (2) научных конференций. Общий объем опубликованных работ – 5,5 п.л., авторский вклад – 2,55 п.л.

Наиболее значительные научные работы по теме диссертации:

1. Блинов, В. Л. Аэродинамическое совершенствование направляющей лопатки последней ступени осевого компрессора с целью снижения закрутки потока на выходе / О. В. Комаров, В. А. Седунин, В. Л. Блинов, А. А. Ращепкин // Компрессорная техника и пневматика. – 2013. – № 7. – С. 43–46 (0,35 п.л./0,25 п.л.).

2. Блинов, В. Л. Расчетное исследование влияния аэроупругости на прочностные характеристики рабочей лопатки осевого компрессора приводной ГТУ / О. В. Комаров, В. А. Седунин, В. Л. Блинов, А. А. Ращепкин // Тяжелое машиностроение. – 2013. – № 10. – С. 24–27 (0,35 п.л./0,1 п.л.).

3. Блинов, В. Л. Опыт разработки и реализации мер по аэродинамическому совершенствованию осевого компрессора стационарной ГТУ / О. В. Комаров, В. А. Седунин, В. Л. Блинов, А. В. Скороходов, А. О. Прокопец // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2014. – № 5-6. – С. 101–111 (0,95 п.л./0,25 п.л.).

4. Blinov, V. L. The application of modern Computational Fluid Dynamics techniques for increasing the efficiency and stability of an axial compressor in an industrial gas turbine / V. A. Sedunin, O. V. Komarov, V. L. Blinov, A. V. Skorokhodov, A. O. Procopets // Energy Production and Management in the 21st Century – 2 Volume Set. The Quest for Sustainable Energy. Edited By: C. A. Brebbia, E. R. Magaril, M. Y. Khodorovsky. WIT Transactions on Ecology and the Environment. – Series Volume 190, 2014. – P. 707–719 (0,9 п.л./0,25 п.л.).

5. Блинов, В. Л. Выбор параметров расчетной модели при решении задач многокритериальной оптимизации плоских компрессорных решеток / В. Л. Блинов, Ю. М. Бродов, В. А. Седунин, О. В. Комаров // Компрессорная техника и пневматика. – 2015. – № 1. – С. 36–42 (0,65 п.л./0,45 п.л.).

На автореферат диссертации поступили положительные отзывы:

1. **Чичировой Натальи Дмитриевны**, д-ра хим. наук, проф., зав. кафедрой «Тепловые электрические станции» и **Евгеньева Игоря Владимировича**, канд. техн. наук, доц. кафедры «Тепловые электрические станции» ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет». Замечания: 1) не обоснован выбор диапазона чисел Маха при исследовании компрессорных решеток; 2) автор упоминает в автореферате о предложенных им рекомендациях по выбору модели турбулентности, параметров расчетной сетки и по заданию граничных условий при решении задачи многокритери-

альной оптимизации формы профиля лопатки осевого компрессора, но в автореферате данные рекомендации отсутствуют.

2. **Кузменко Михаила Леонидовича**, д-ра техн. наук, проф., генерального директора ЗАО «АПТ-Центр», г. Рыбинск. Замечания: 1) параметрическое профилирование плоских решеток затруднительно использовать для оптимизации первых и средних ступеней многоступенчатых осевых компрессоров имеющих проточную часть с изменением диаметров втулки и периферии от входа к выходу (из-за высокой степени повышения полного давления); 2) достаточно большое количество параметров (11), описывающих единичный профиль, может служить определенным ограничением круга решаемых задач. Так для описания трехмерной геометрии одной ступени (рабочее колесо и направляющий аппарат) может потребоваться более 100 переменных, а в случае многоступенчатого компрессора количество параметров будет огромным с точки зрения решения задачи оптимизации; 3) из автореферата не ясно, как изменились напорные характеристики осевого компрессора натурной газотурбинной установки стационарного типа при использовании направляющего аппарата с новыми профилями. Не представлена расчетная оценка изменения положения границы устойчивой работы и повышения аэродинамической эффективности компрессора, что хоть как то могло объяснить существенное понижение линии рабочих режимов компрессора.

3. **Евгеньева Станислава Сергеевича**, д-ра техн. наук, проф., профессора кафедры «Теплотехника и энергетическое машиностроение» ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ». Замечания и вопросы: 1) не отмечены конкретные модели турбулентности, параметры расчетной сетки и граничные условия, используемые при численном исследовании течения в решетке профиля осевого компрессора (ОК); 2) на каких 2-х режимах работы осуществлялась оптимизация компрессорной решетки? 3) по результатам испытаний с оптимальной решеткой направляющего аппарата 4 ступени удалось повысить максимальный расход воздуха ОК на 3-5%. Не отмечено, что же происходит

при этом с границей устойчивой работы на малых расходах, близких к помпажу.

4. **Исаева Сергея Александровича**, д-ра физ.-мат. наук, проф., профессора кафедры механики ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации». Замечания и вопросы: 1) бэкграунд отсутствует. Не отмечены работы предшественников, в особенности по оптимизации элементов конструкций; 2) отсутствует методическая часть, в которой раскрываются постановка задачи, система управляющих уравнений, граничные условия, обоснование использованных моделей, выбор сеток. Упоминания о пакете явно недостаточно; 3) точность прогнозов и пределы применимости моделей и пакета не определены; 4) что нового внесено автором в программу многокритериальной оптимизации IOSO? 5) нет числа Рейнольдса, характеристик турбулентности, оценки вычислительной эффективности оптимизации.

5. **Спирин Василий Вячеславович**, генерального директора и **Юна Владимира Климентьевича**, д-ра техн. наук, главного конструктора компрессоров ЗАО «Институт энергетического машиностроения и электротехники», г. Санкт-Петербург. Замечания: 1) нет четкого обоснования границ применимости изложенных принципов, метода и алгоритма оптимизационного профилирования в отношении режимов и характера течения в плоской решетке осевого компрессора; 2) не следует переоценивать прикладную ценность данного метода и алгоритма оптимизации, а также некоторых задач, решенных в рамках диссертации, поскольку к настоящему времени дозвуковые плоские решетки профилей осевых компрессоров достаточно хорошо изучены и отработаны; 3) были ли рассмотрены ступени типа К-70 и К-100 отечественного производства с звуковыми и сверхзвуковыми скоростями? 4) по результатам исследований ОК ГТУ типа ГТК-10-4 удалось повысить расход воздуха через ОК на 3-5%, однако не известно, при этом граница помпажа осталась на прежнем месте.

6. **Сими́на Никола́я Оле́говича**, канд. техн. наук, начальника отдела проектирования турбин и **Зубалева Олега Валерьевича**, канд. техн. наук, ведущего инженера-проектировщика инженерно-конструкторского департамента ООО «Сименс Технологии Газовых Турбин», Ленинградская обл., Всеволожский район, Промышленная зона Горелово. Замечания: 1) в описании 2-й главы сформулирован вывод, что наиболее точные результаты при расчетах достигаются при скоростях $M < 0.4$, а при более высоких значениях этого параметра прогнозируется завышенный диапазон устойчивой работы решетки, в автореферате не указаны причины данного эффекта и способы, которые могли бы устранить это несоответствие при моделировании течения; 2) апробация методики была использована на достаточно устаревшем компрессоре ГТК-10, в автореферате доказательно не аргументирована возможность использования предложенной методики для перспективных высоконапорных ступеней компрессоров по результатам ее валидации на ГТК-10.

7. **Шифрина Бориса Ароновича**, канд. техн. наук, начальника Конструкторского бюро термодинамических и газодинамических установок ЗАО Научно-производственное внедренческое предприятие «Турбокон», г. Калуга. Замечание: приведенное автором работы смещение положения линии рабочих режимов ГТД вызывает вопросы.

8. **Валамина Александра Евгеньевича**, технического директора и **Шibaева Тараса Леонидовича**, канд. техн. наук, зам. главного конструктора по новому проектированию ЗАО «Уральский турбинный завод», г. Екатеринбург. Вопросы: 1) как отмечено в автореферате, оптимизация проводилась на двух режимах работы компрессорной решетки. Каким образом обоснован выбор данных режимов? 2) проводилось ли определение границы устойчивой работы осевого компрессора ГТУ типа ГТК-10-4 до и после внесения изменений в лопаточный аппарат и оценка повышения запаса газодинамической устойчивости за счет реализованных мероприятий?

9. **Кожухова Юрия Владимировича**, канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой «Компрессорная, вакуумная и холодильная техника» ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого». Вопросы: 1) проводилось ли численное исследование течения в компрессорной решетке при нестационарной постановке? 2) В автореферате приведены характеристики решеток из оптимизированных профилей на близкий угол поворота потока при разных постановках задачи, остается непонятным обеспечивают ли новые профили лопаток необходимое отношение давлений и расход? 3) В автореферате не приведены значения КПД ступени до и после оптимизации при равных массовых расходах и отношении давлений.

10. **Русецкого Юрия Адольфовича**, канд. техн. наук, зам. генерального директора ООО Научно-производственное предприятие «Реновационные технологии», г. Москва. Вопросы: 1) чем обоснован выбор к-е модели турбулентности? 2) На каком этапе производится оценка прочностных характеристик профилей (моментов сопротивления, изгиба и т.д.)? 3) Сколько машинного времени требуется для получения оптимизированного профиля?

11. **Тарасова Алексея Викторовича**, канд. техн. наук, доц., главного инженера – первого заместителя директора ООО «Сибэкс», г. Екатеринбург. Замечания: чем обусловлено смещение характеристики осевого компрессора с новым направляющим аппаратом четвертой ступени только по расходу рабочего тела на 5...7% относительных при сохранении напорности ступеней и всего компрессора? Суждение о том, что уменьшение потерь энергии в решетке профилей в широком диапазоне углов атаки приводит только к удалению характеристики от границы устойчивой работ не совсем верно. Должен увеличиваться и напор ступени, то есть изодрома должна перемещаться вправо и вверх.

12. **Бабия Юрия Игоревича**, директора ЗАО «Сигма Технологии», г. Москва. Вопросы: как выбиралась относительная значимость критериев оптимизации? Известно, что сходимость задачи оптимизации в значительной

степени зависит от количества переменных и критериев оптимизации. Как это учитывалось при постановке задачи оптимизационного исследования?

13. **Ермоленко Дмитрия Ивановича**, зам. главного конструктора СКБТ – главного конструктора по газотурбостроению ЗАО «Уральский турбинный завод», г. Екатеринбург. Без замечаний.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их широкой известностью своими достижениями по вопросам проектирования и эксплуатации газотурбинных установок и энергетического оборудования в целом, их высокой научной компетентностью в области газодинамических расчетов потока газа в проточных частях турбомашин, наличием публикаций в данных областях науки, способностью определить научную и практическую ценность диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- **предложен** нетрадиционный подход к параметрическому описанию формы профиля лопатки осевого компрессора для эффективного решения задачи ее оптимизации и выявления характерных зависимостей геометрических параметров профиля и аэродинамических характеристик компрессорной решетки;

- **разработан** автоматизированный алгоритм профилирования лопатки и программный код на его основе, опирающийся на предложенный подход к параметрическому описанию профилей и позволяющий получать файл с геометрией лопатки;

- **разработана и обоснована** схема автоматической многокритериальной оптимизации профиля лопатки осевого компрессора газотурбинной установки;

- **предложено** новое семейство оптимальных профилей лопаток осевых компрессоров, эффективно работающих в диапазоне чисел Маха от 0,4 до 0,8;

- **введено новое понятие** «топология профиля» – принципы параметрического описания геометрической формы профиля, наилучшим образом

позволяющие осуществлять его дальнейшую оптимизацию.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

– **применительно к проблематике диссертации результативно использованы** различные современные программные комплексы, в основе которых лежат методы вычислительной газовой динамики и алгоритмы оптимизации;

– **изложены** рекомендации по выбору критериев и ограничений оптимизации. Установлено, что наилучшие результаты при наименьшем числе циклов оптимизации с точки зрения получения семейства оптимальных профилей в широком диапазоне углов поворота потока достигаются при использовании в качестве целевых функций потерь полного давления на двух режимах работы решетки и угла поворота потока на режиме с углом атаки в крыльце профиля;

– **получены** семейства оптимальных профилей в исследуемом диапазоне параметров: при различных значениях числа Маха (0,4–0,8), густоты решетки (1–2,2) и относительной толщины профиля (7–14 %). **Установлено**, что полученные в результате оптимизации профили ОК по своим характеристикам, а также принципу распределения ключевых параметров соответствуют ведущим мировым аналогам, при этом имеют параметрическое описание. На основании проведенного анализа оптимизированных профилей **установлены** зависимости изменения геометрических параметров оптимального профиля (переменных оптимизации) при изменении угла поворота потока.

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

– **представлены** рекомендации по постановке задачи многокритериальной оптимизации плоских компрессорных решеток, которые могут быть использованы в инженерной практике при доводке и модернизации ОК ГТУ;

– **получено** семейство оптимальных профилей с известными характеристиками для различных параметров потока, пригодных к использованию при проектировании новых компрессоров. Представлены аналитические за-

висимости определяющих параметров профиля в соответствии с предложенной топологией от требуемого угла поворота потока в широком диапазоне значений числа Маха, густоты решетки и максимальной толщины профиля;

– **разработана и внедрена** новая конструкция направляющего аппарата четвертой ступени осевого компрессора ГТУ типа ГТК-10-4 на газоперекачивающем агрегате (станционный номер 37) Пангодинского линейно-производственного управления магистральными газопроводами ООО «Газпром трансгаз Югорск», которая позволила повысить запас газодинамической устойчивости компрессора при близких к номинальному значениям приведенной частоты вращения ротора.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что они получены при использовании наиболее современных апробированных и научно обоснованных программ, методик численного трехмерного расчета течений и программных комплексов многокритериальной оптимизации; 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; непосредственном участии в получении исходных данных и научных экспериментах, постановке и проведении расчетных и оптимизационных исследований; в обработке и интерпретации полученных данных, непосредственном участии в апробации результатов исследования; в разработке рекомендаций для инженерной практики по проектированию осевых компрессоров; в подготовке публикаций по выполненной работе.

Диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация Блинова В. Л. представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой изложены новые научно обоснованные технические реше-

ния 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, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842.

На заседании 26 июня 2015 г. диссертационный совет принял решение присудить Блинову В.Л. ученую степень кандидата технических наук по специальности 05.04.12 – Турбомашин и комбинированные турбоустановки.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 5 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 22 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 16, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

И.о. председателя диссертационного совета,
член совета (приказ ректора УрФУ от 16.06.2015 г.,
№ 2811/04),

д-р техн. наук, проф.



Плотников Петр Николаевич

Ученый секретарь
диссертационного совета



Аронсон Константин Эрленович

26 июня 2015 г.