

На правах рукописи

Прокопец Алексей Олегович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ПРИВОДНЫХ
СТАЦИОНАРНЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК В УСЛОВИЯХ
ЭКСПЛУАТАЦИИ ООО «ГАЗПРОМ ТРАНСГАЗ ЮГОРСК»**

Специальность 05.04.12 – Турбомашины и комбинированные турбоустановки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург - 2012

Работа выполнена в ООО «Газпром трансгаз Югорск» и ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» на кафедре «Турбины и двигатели».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Бродов Юрий Миронович

Научный консультант: кандидат технических наук, доцент
Комаров Олег Вячеславович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор, заслуженный
деятель науки РФ
Иванов Вадим Андреевич;
доктор технических наук, профессор, заслуженный
деятель науки РФ
Шабаров Александр Борисович

Ведущая организация: ООО «Газпром ВНИИГАЗ», г. Москва

Защита состоится 29 мая 2012 г. в 14⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.285.07 при ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5, ауд. Т-703.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью организации, просим направлять по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, УрФУ, учёному секретарю университета. Тел.: (343) 375-45-74, 375-48-51, факс: (343) 375-94-62, e-mail: d21228507@gmail.com, aturbo@yandex.ru.

Автореферат разослан 27 апреля 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, д-р техн. наук

Аронсон К.Э.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В настоящее время парк газотурбинных приводов газоперекачивающих агрегатов (ГПА) предприятия ООО «Газпром трансгаз Югорск», эксплуатирующего крупнейшую газотранспортную систему в мире, насчитывает более 1100 ГПА. В составе парка около 50 % – это ГТУ отечественного и зарубежного производства общепромышленного типа (стационарные), установленные в основном в 70-80-х годах прошлого века с наработкой около 100 тыс. часов либо значительно превышающей назначенный суммарный ресурс. Темпы реконструкции компрессорных цехов, с заменой физически и морально устаревших приводных ГТУ на более совершенные, в основном авиационного и судового типов, значительно отстают от темпов «старения» эксплуатируемых ГТУ. В связи с этим необходимо уделять особое внимание техническому состоянию работающих стационарных ГТУ и реализовывать мероприятия для максимально эффективной их эксплуатации в части вырабатываемой мощности, экономичности и надежности.

Помимо проблем, связанных с большой наработкой ГТУ стационарного типа, в процессе длительной эксплуатации в результате реализации различных инженерных решений при строительстве объектов, мероприятий по ремонтно-техническому обслуживанию и реконструкции ГТУ сформировалось многообразие основных и вспомогательных систем ГПА – типов конструкций КВОУ, регенеративных теплообменников, конструкций камер сгорания – для одного и того же типа ГТУ. Указанные причины приводят к отклонению (зачастую ухудшению) основных характеристик как ГТУ в целом, так и осевых компрессоров и турбин в частности, от паспортных значений.

В связи с этим актуальность работы, определяющая ее цели и задачи, заключается в исследовании влияния указанных факторов на основные характеристики ГТУ и разработке способов (методов) повышения эффективности работы стационарных ГТУ с учетом многообразия эксплуатационных факторов.

Цель работы: повышение эффективности работы ГТУ общепромышленного типа в условиях эксплуатации газотранспортного

предприятия ООО «Газпром трансгаз Югорск» на основе современных возможностей, знаний и достижений в области экспериментальных исследований и методов численных исследований с применением современных программных средств.

Для достижения указанной цели в ходе исследований поставлены и решены следующие **основные задачи**:

- Исследование причин недостаточной газодинамической устойчивости осевых компрессоров ГТУ типа ГТК-10-4 в различных условиях эксплуатации;
- Разработка метода проведения в условиях эксплуатации экспериментальных исследований с целью определения срывных и неустойчивых режимов работы и регистрации срывных явлений в проточной части осевых компрессоров стационарных ГТУ;
- Исследование влияния конструктивных особенностей системы воздухозабора и воздухоподготовки (КВОУ) на запас газодинамической устойчивости (ГДУ) осевых компрессоров ГТУ;
- Численное исследование процесса сжатия воздуха в проточной части ОК ГТУ ГТК-10-4 и верификация численного метода на основе экспериментальных данных. Уточнение физической картины обтекания лопаточных венцов ОК ГТУ ГТК-10-4 на номинальном и переменных режимах работы;
- Реализация и апробация способа повышения эффективности работы ГТУ типа ГТН-16 в условиях эксплуатации.

Научная новизна полученных результатов.

1. Предложен, обоснован и разработан метод проведения специальных экспериментальных исследований в условиях эксплуатации, направленных на определение неустойчивых режимов работы осевого компрессора ГТУ и регистрацию срывных явлений в проточной части ОК. На основании разработанного метода обоснованно определены границы газодинамической устойчивости работы осевого компрессора ГТУ ГТК-10-4.

2. Установлены причины появления срывных явлений в проточной части ОК на основании численного исследования процесса сжатия воздуха в ОК ГТУ типа ГТК-10-4. Уточнена физическая картина течения воздуха в проточной части компрессора.
3. Установлено влияние конструктивных характеристик системы воздухоподготовки и воздухоочистки ГТУ на запас ГДУ ОК на основе численных и экспериментальных исследований.
4. Предложен и обоснован способ повышения эффективности работы ГТУ типа ГТН-16 с учетом эксплуатационных факторов за счет перераспределения работы расширения продуктов сгорания между турбинами высокого и низкого давления путем раскрытия лопаток соплового аппарата (СА) ТНД.

Практическая значимость заключается в следующем:

1. Апробирован метод проведения специальных экспериментальных исследований по выявлению и регистрации срывных и неустойчивых режимов работы ОК ГТУ в условиях эксплуатации;
2. Установлены границы газодинамической устойчивости осевого компрессора ГТУ типа ГТК-10-4 с внесением соответствующих ограничений по приведенной относительной частоте вращения ротора ОК в систему управления ГТУ для предотвращения срывных режимов его работы и помпажа;
3. Определены «узкие» места в конструкции лопаточного аппарата ОК ГТУ ГТК-10-4 и показаны перспективы его совершенствования;
4. В условиях эксплуатации апробирован способ повышения эффективности работы ГТУ типа ГТН-16. Проведены работы по изменению угла установки лопаток СА ТНД с целью перераспределения работы расширения в турбине. Подтверждено повышение вырабатываемой мощности ГТУ на 4 %.

Достоверность и обоснованность результатов работы обеспечена:

- хорошей воспроизводимостью экспериментальных данных и сходимостью их с результатами численных исследований;
- совпадением результатов экспериментальных работ с теоретическими представлениями и опытными данными по теме исследований других авторов;

– тем, что основные результаты прошли промышленную апробацию и уже использованы для повышения эффективности эксплуатации стационарных ГТУ ООО «Газпром трансгаз Югорск» и предотвращения аварийных ситуаций на компрессорных станциях;

– использованием в работе современных, апробированных и научно обоснованных программ и методик на основе численного трёхмерного анализа течений в каналах и лопаточных аппаратах турбомашин.

Личный вклад соискателя заключается в постановке целей и задач исследования, научно-техническом обосновании положений, выносимых на защиту, участии в разработке метода проведения специальных экспериментальных исследований осевого компрессора ГТУ в условиях эксплуатации, анализе структурного и технического состояния парка газотурбинных ГПА ООО «Газпром трансгаз Югорск» и обобщении результатов проведения экспериментальных и численных исследований, а также в реализации и апробации способа повышения эффективности работы ГТУ типа ГТН-16.

Автор защищает следующие основные положения:

- Метод проведения специальных экспериментальных исследований ОК стационарных ГТУ в условиях эксплуатации с целью определения и регистрации срывных и неустойчивых режимов его работы;
- Результаты численных и экспериментальных исследований процесса сжатия воздуха в ОК ГТУ ГТК-10-4 и влияния конструктивных особенностей КВОУ на запас ГДУ ОК;
- Результаты реализации и апробации способа повышения эффективности работы ГТУ ГТН-16 за счет перераспределения работы расширения в турбине раскрытием лопаток СА ТНД.

Апробация результатов работы. Основные результаты исследований, изложенных в диссертации, были представлены и обсуждались:

- на ЛП научно-технической сессии РАН по проблемам газовых турбин (г. Самара, 2005);

- X, XI, XII, XIII, XIV, XV Международных симпозиумах «Потребители-производители компрессоров и компрессорного оборудования» (г. Санкт-Петербург, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2010);
- III и IV Международных научно-технических конференциях «Газотранспортные системы: настоящее и будущее» (г. Москва, 2009, 2011).

Реализация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы прошли промышленную апробацию и используются в ООО «Газпром трансгаз Югорск» при эксплуатации и ремонтно-техническом обслуживании стационарных ГТУ. Также отдельные результаты работы используются в научно-исследовательской деятельности и в учебном процессе подготовки специалистов, бакалавров и магистров кафедры «Турбины и двигатели» УрФУ.

Публикации. По теме повышения эффективности работы ГТУ опубликовано 23 работы, из них 5 статей в реферируемых изданиях по списку ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения по работе, списка использованной литературы, включающего 87 наименований. Работа изложена на 130 страницах, содержит 53 рисунка и 13 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** показана актуальность проблемы повышения эффективности работы стационарных ГТУ на основе анализа структуры парка приводных ГТУ и ГТД, эксплуатируемых на объектах ООО «Газпром трансгаз Югорск», а также на основе перспектив и сроков реконструкции компрессорных цехов, оснащенных стационарными ГТУ.

В **первой главе** проведен анализ научно-технической информации по теории лопаточных машин – осевых компрессоров и турбин. Особое внимание уделено процессам возникновения срывных явлений на лопаточном аппарате компрессоров для различных режимов их работы, причинам появления,

механизмам развития и предотвращения. Рассмотрены случаи полной потери газодинамической устойчивости ОК (помпажа) в системе компрессор-сеть.

В части главы, посвященной осевой газовой турбине, проведен анализ влияния основных характеристических безразмерных коэффициентов ступени турбины – параметра $x = u / c_{a0}$, коэффициента нагруженности (циркуляции) μ , коэффициента расхода \bar{c}_a – на ее экономичность. Показана возможность повышения внутреннего КПД ступеней и отсеков за счет перераспределения работы расширения газа между ними.

В третьем разделе главы сделан анализ накопленного в научно-технической практике опыта по способам определения и регистрации срывных и неустойчивых режимов работы отдельных венцов и отсеков ОК. Отмечено, что подобные экспериментальные исследования проводились в основном в заводских или лабораторных условиях либо на специализированных стендах, но не в условиях эксплуатации.

На основании рассмотренных материалов сформулированы основные задачи исследований.

Во **второй** главе описана предложенная и разработанная автором принципиальная схема проведения специальных экспериментальных исследований, позволяющих регистрировать (определять) срывные явления в проточной части ОК ГТУ, в том числе вращающийся срыв (рис.1).

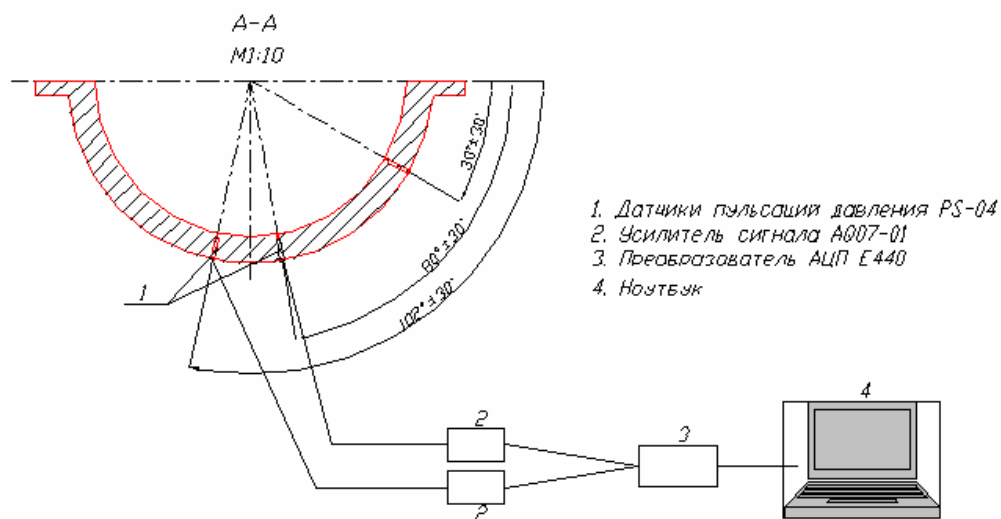
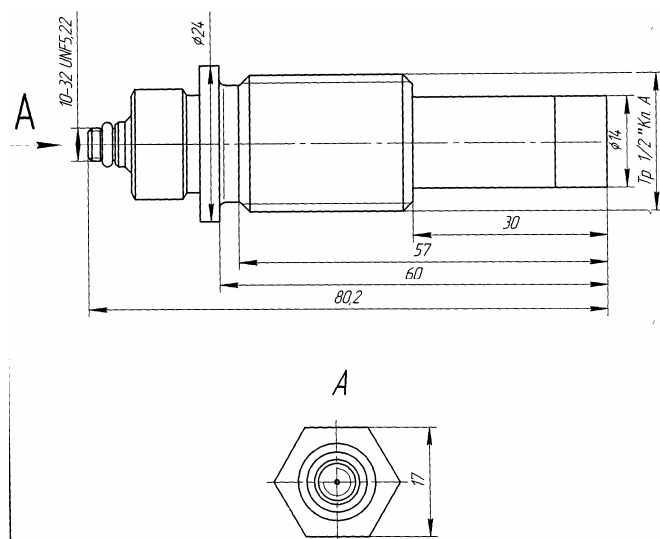


Рис. 1. Принципиальная схема измерений

Сигнал, передаваемый первичными датчиками PS-04 (рис.2), усиливается (усилитель AQ07-01) и передается на плату аналого-цифрового преобразователя E440 (изготовитель «L-card»), где сигнал преобразуется из аналоговой формы в цифровую. АЦП передает цифровой сигнал на ноутбук, где он регистрируется с помощью программы «LGraph2».



Характеристики датчика PS-04

Чувствительность ($\pm 20\%$), пКл/бар	400
Измеряемый диапазон, бар	0,1...250
Резонансная частота, кГц	> 120
Нелинейность (от полной шкалы)	$< 2\%$
Рабочий диапазон температур, $^{\circ}\text{C}$	$- 50...+ 200$
Полярность	положительная
Электрическая ёмкость, пФ	7...11
Сопротивление изоляции в нормальных условиях, Ом	$\geq 10^{10}$
Чувствительный элемент	ниобат лития
Материал корпуса	нержавеющая сталь
Материал мембраны	нержавеющая сталь

Рис. 2. Датчик измерения пульсаций. Основные характеристики

Основная сложность заключалась в разработке геометрических размеров и подборе характеристик датчиков под параметры среды, которые позволяли бы вести регистрацию сигнала с высокой точностью и в достаточно широком диапазоне температуры и давления воздуха в проточной части. Таким образом, закладывалась универсальность датчиков для разных типов ГТУ (ГТК-25И и ГТК-10-4).

Отработка схемы измерений и настройка оборудования проводились в условиях эксплуатации на натурной ГТУ типа ГТК-25И, в корпусе компрессора которой над рабочими лопатками пятой ступени были предварительно в период ремонтных работ выполнены отверстия под установку датчиков. В ходе проведения тестов осуществлялась как непрерывная запись сигналов с датчиков с последующей обработкой, так и экспресс-обработка информации с применением быстрого преобразования Фурье (БПФ) в режиме реального времени. Тесты показали работоспособность схемы измерений и большее удобство экспресс-обработки

сигналов с применением БПФ для отслеживания изменений пульсации давления в проточной части на переходных режимах работы ОК.

Дальнейшим этапом работы стали специальные экспериментальные исследования ОК ГТК-10-4, необходимость проведения которых объясняется следующим. Начиная с середины 90-х гг. прошлого века в ООО «Газпром трансгаз Югорск» реализована замена регенеративных теплообменников для отечественных ГТУ типа ГТК-10-4 производства разных фирм. Вследствие восстановления характеристик регенераторов при невысоком техническом состоянии ГТУ в целом и многообразии конструкций воздухозаборных камер, характеристики сети для осевого компрессора ГТУ изменились, что привело к большому числу аварийных остановов агрегатов по причине помпажа в ОК, в том числе с разрушением его проточной части.

Анализ «аварийных» трендов, выгруженных из САУ ГПА, показал, что аварийные остановки случались при режимах работы ОК в зоне, близкой к номинальной изодроме на характеристике компрессора, т.е. при приведенной относительной частоте вращения ротора ОК около 1,0. Это подтверждалось предварительным расчетом трехмерной модели ОК в газодинамическом пакете Ansys CFX на режимах, близких к номинальному, когда отрывным течениям могут быть подвержены последние ступени. Поэтому было принято решение об установке датчиков пульсаций над рабочими лопатками именно хвостовой группы ступеней – над девятой ступенью десятиступенчатого ОК ГТК-10-4. Дополнительно, на входном воздуховоде ОК, на линейном участке была установлена осредняющая напорная трубка для измерения расхода воздуха в компрессоре.

По результатам проведения 21 эксперимента, в пяти случаях при экспресс-обработке сигналов от датчиков пульсации с БПФ было зарегистрировано резкое повышение амплитуды пульсаций на частотах от 0 до 800 Гц. Последующий спектральный анализ записанных с датчиков сигналов и показаний штатных приборов подтвердил предварительные результаты: в этих пяти случаях зафиксированы пульсации давления среды

над рабочими лопатками 9-й ступени с превышением амплитуды относительно среднего значения в десятки раз.

На одном из таких режимов (рис.3) зарегистрировано резкое повышение амплитуды пульсаций на частоте 650 Гц, что соответствует основному тону изгибных колебаний лопаток 9-10-й ступеней ОК.

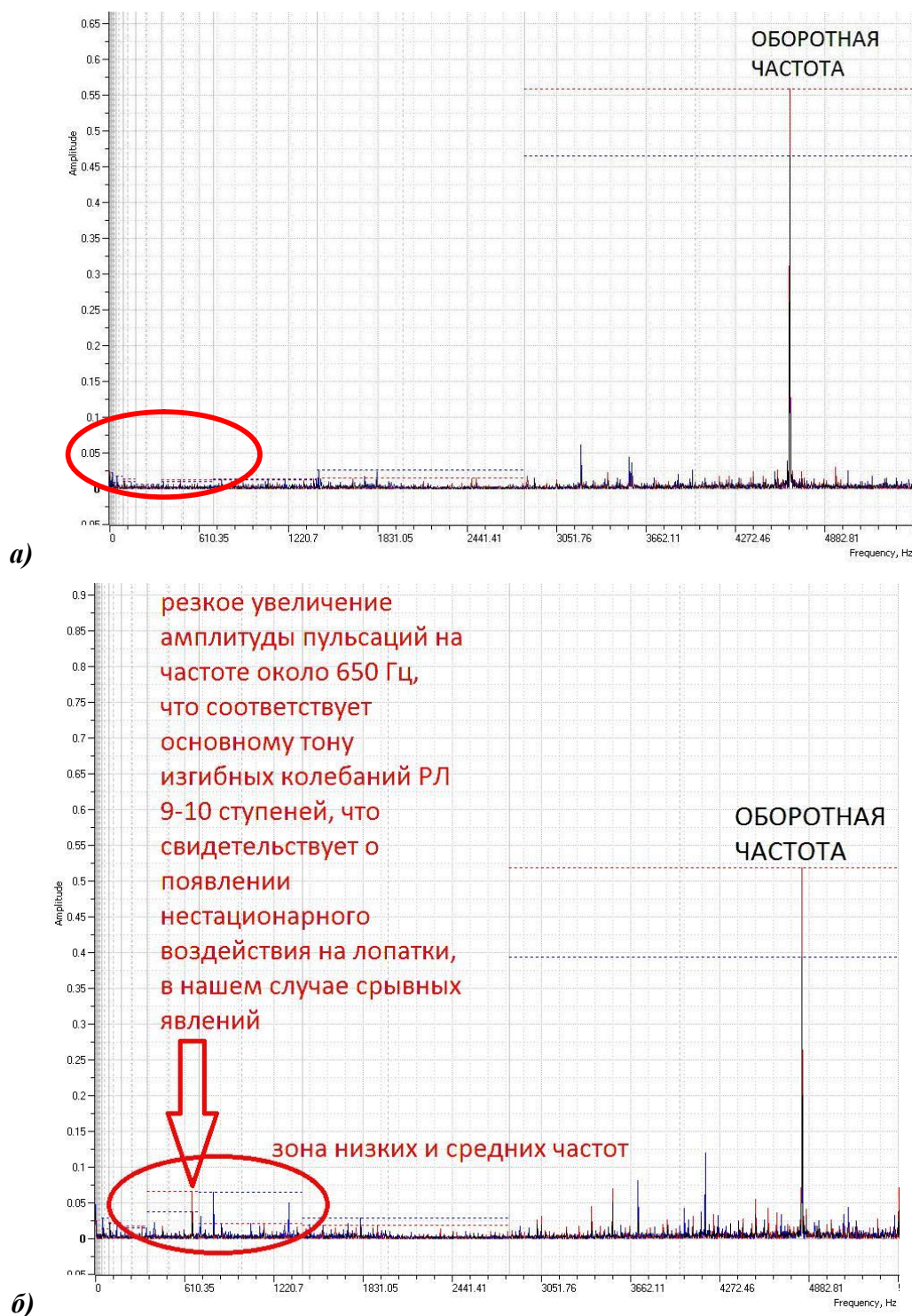


Рис. 3. Результаты спектрального анализа сигналов от датчиков пульсаций:
а – нормальная работа; **б** – наличие срывных явлений

Отработанная на основе выполненного исследования методика проведения испытаний позволила зарегистрировать срывные явления и установить, что граница устойчивой работы ОК ГТК-10-4 сужена до значения приведенной относительной частоты вращения $\bar{n}_{np}^{ок}=1,01$ (рис.4). В результате были внесены ограничения в САУ ГПА для предотвращения работы ГТУ на «срывных» режимах.

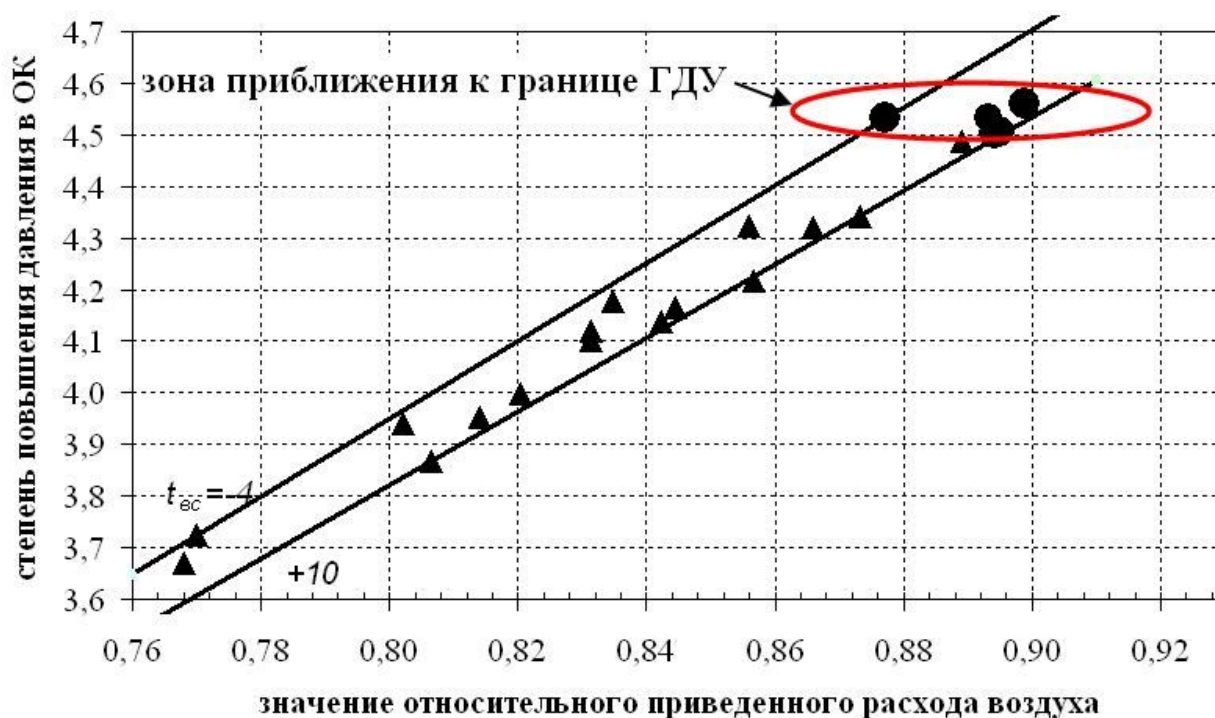


Рис.4. Зависимость степени повышения давления в ОК от расхода воздуха:

- ▲ — режимы, на которых не было зарегистрировано срывных явлений;
- — срывы потока зарегистрированы

В третьей главе представлены результаты исследования аэродинамического совершенства лопаточного аппарата ОК ГТК-10-4 на основе использования программного комплекса для численного решения уравнений Навье-Стокса – Ansys CFX.

После получения автором экспериментальных данных проведены верификация газодинамических расчётов на трехмерной модели осевого компрессора ГТК-10-4 на режимах, аналогичных режимам работы при проведении испытаний, и последующее сопоставление результатов расчёта с результатами испытаний.

Установлено, что даже на номинальном режиме работы ОК имеется значительный угол атаки (в спинку) в среднем сечении НА четвёртой ступени. Наиболее сильно это проявляется на лопатках направляющего аппарата (отдельно это будет показано ниже). Зафиксирована отрывная область вблизи втулки направляющего аппарата седьмой ступени, имеется отрывная область на периферии рабочей лопатки третьей ступени.

Расчеты подтвердили экспериментальные данные автора – на частичных режимах работы ОК, близких к номинальному, последняя группа ступеней (с седьмой по десятую) работает с отрывными течениями, в том числе в периферийной зоне вблизи корпуса (рис. 5).

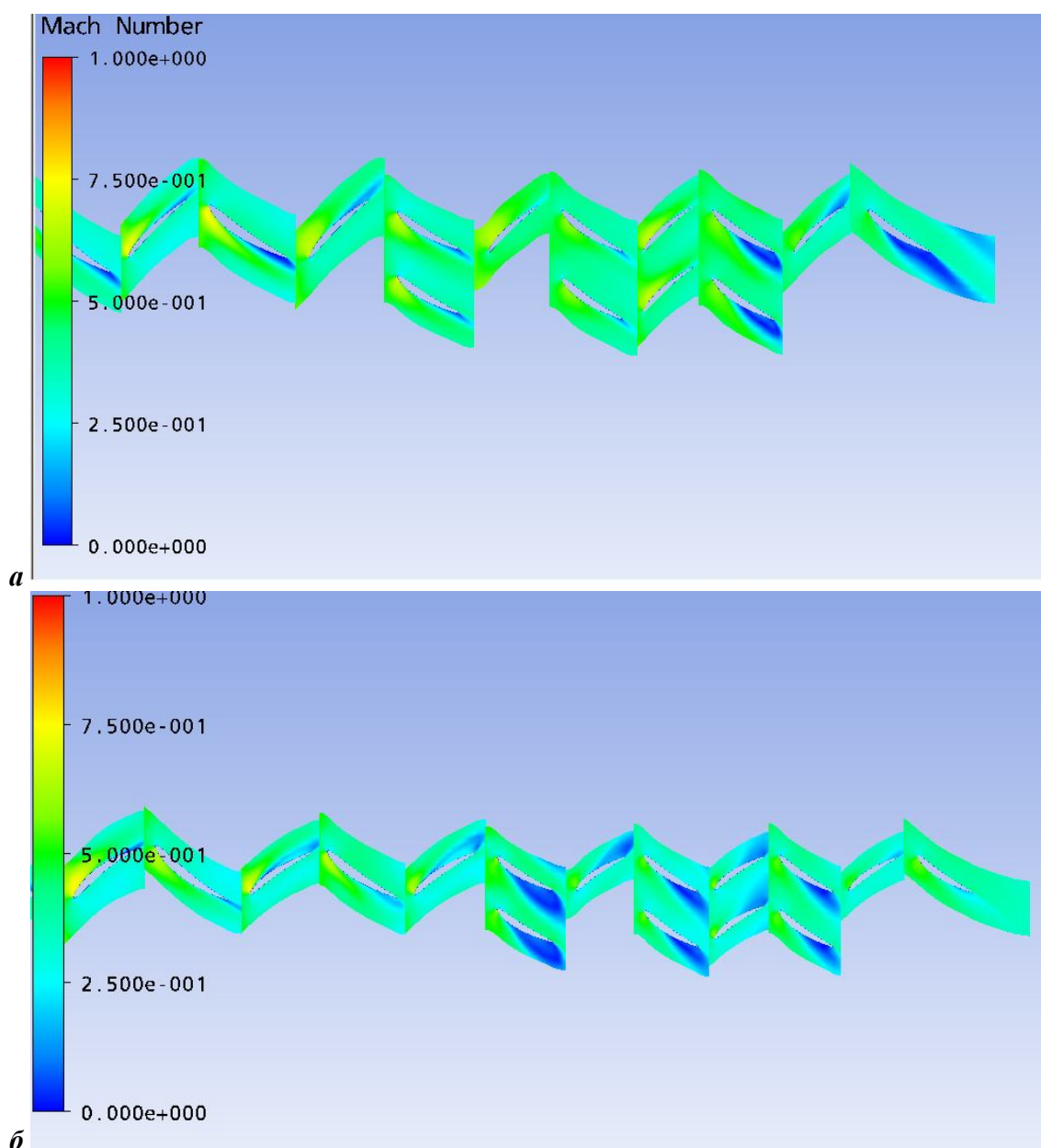


Рис. 5. Значение числа Маха в последних ступенях ОК GTK-10-4 в среднем сечении (а) и вблизи периферии (б) при относительной частоте вращения 1,05

Для объяснения причин возникновения отрывных областей был проведён детальный анализ распределения осевой (расходной) составляющей скорости по высоте лопатки для каждой из ступеней.

На рис.6 представлен пример, из которого видно, что на периферии канала имеется существенное снижение расходной составляющей скорости; это, в свою очередь, приводит к большим углам атаки на входе в рабочее колесо третьей ступени и, как следствие, к отрыву потока на периферии лопатки. Аналогично для корневого сечения направляющего аппарата седьмой ступени и соответствующего распределения расходной составляющей скорости на выходе из РК седьмой ступени. Анализ и обобщение полученных результатов позволили установить, что входная группа ступеней ОК (до 5-й) работает с существенным смещением основного потока в район корневого сечения.

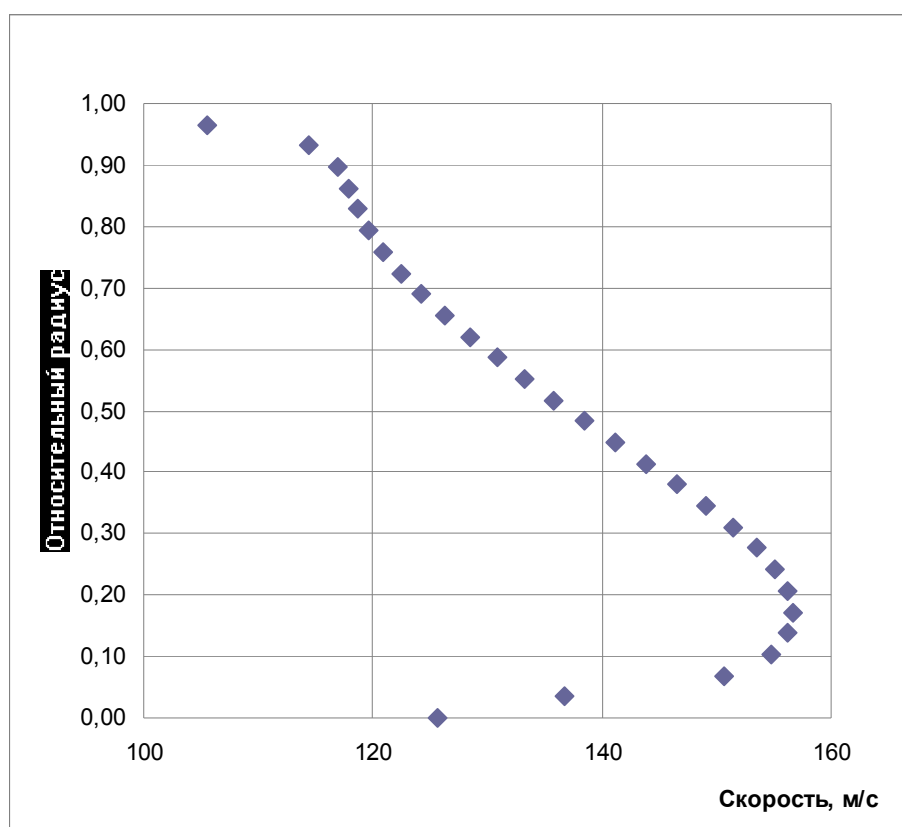


Рис. 6. Распределение расходной составляющей скорости по высоте канала на выходе из НА второй ступени

Показано, что направляющий аппарат четвёртой ступени ОК характеризуется пониженными значениями КПД и степени повышения

давления относительно соседних ступеней. На основании этого сделан вывод о неудачном согласовании 4-й ступени и, в частности, направляющего аппарата 4-й ступени с остальным компрессором.

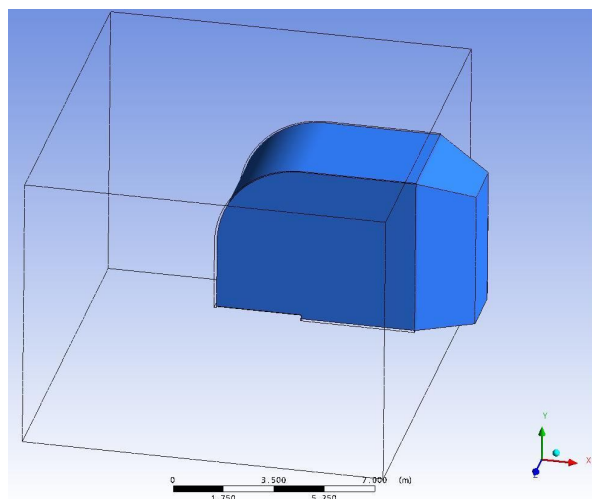
Представлены результаты расчетного исследования влияния конструкции воздухозаборной камеры (ВЗК) ГПА с ГТК-10-4 на колебания расхода воздуха через ГТУ при неблагоприятных погодных условиях (например, сильный боковой ветер). Предпосылками к проведению исследований стали опытные данные автора. При проведении испытаний ГТК-10-4 на напорной трубке, установленной на подводящем воздуховоде ОК на участке за КВОУ, было зарегистрировано подобное явление, создающее еще более сложные условия для работы последних ступеней компрессора при частоте вращения ротора турбокомпрессора, близкой к номинальной. При снижении расхода вследствие таких колебаний в последних ступенях углы атаки мгновенно достигают критических значений и возможно развитие срыва с последующим помпажом ОК.

Численный эксперимент был поставлен в программном комплексе Ansys CFX для штатной конструкции воздухозаборной камеры и для камеры с дополнительными боковыми «окнами» (рис.7, *а* и *б*) при моделировании потока бокового ветра 10 м/с.

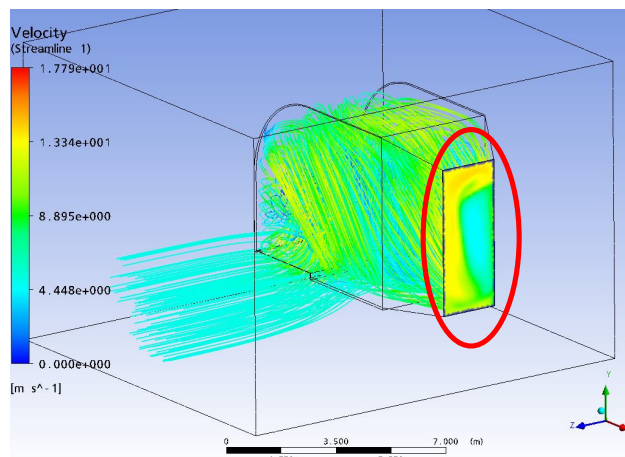
На рис. 8 представлен график изменения во времени расхода воздуха через входное устройство. Установлено, что для штатной конструкции ВЗК колебания носят гармонический характер с периодом $\approx 1,65$ с при изменении расхода до 4 % вследствие генерации вихря во входной части ВЗК (рис.7, *в*). Для случая с дополнительными «окнами» (рис.7, *г*) неравномерность во времени расхода в два раза меньше. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами экспериментов.

Подобные численные исследования были проведены и для новой конструкции ВЗК для ГТК-10-4 ОАО «35-й Мехзавод». Неравномерность расхода воздуха во времени при тех же условиях численного эксперимента

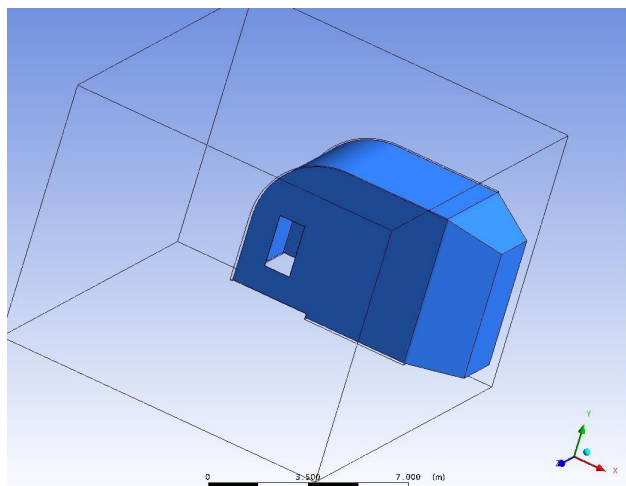
не установлена, что связано, по нашему мнению, со значительным увеличением объема ВЗК.



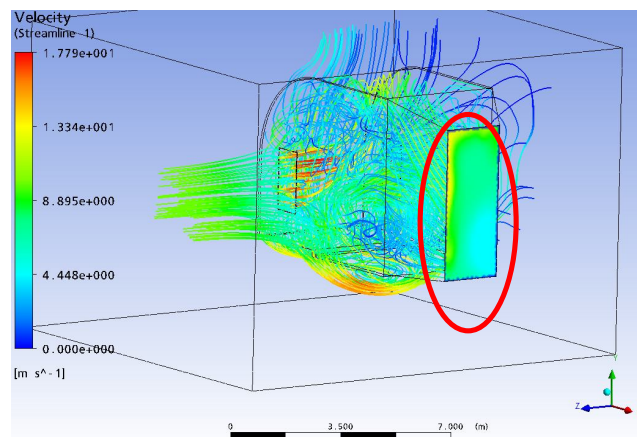
a



б



б



з

Рис. 7. Варианты исполнения ВЗК (а, б). Линии тока воздуха, проходящего через ВЗК, и равномерность распределения скоростей на выходе из домена (в, з)

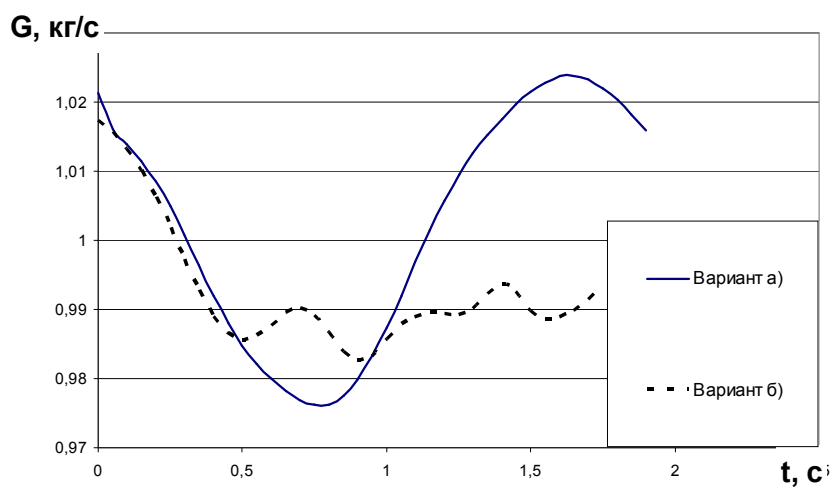


Рис. 8. Изменение во времени расхода через КВОУ при боковом ветре 10 м/с

В четвертой главе представлены результаты реализации и апробации способа повышения мощности и экономичности ГТУ типа ГТН-16 за счет изменения угла установки лопаток соплового аппарата ТНД. Способ актуален для ГТУ, работающих с пониженными коэффициентами технического состояния по КПД и мощности и часто работающих на частичных режимах с пониженной приведенной частотой вращения ТВД.

На основании характеристики турбины высокого давления в виде зависимости внутреннего КПД ступеней от характеристического коэффициента $x = u / c_{ad}$, имеющих крутую форму, произведены расчеты, основанные на перераспределении работ расширения газа между отсеками турбин высокого и низкого давления путем раскрытия проходного сечения СА ТНД. За счет увеличения располагаемого теплоперепада, приходящегося на ТВД, повышается частота вращения ротора ТВД, точка на характеристиках ступеней ТВД смещается в сторону большего внутреннего КПД и увеличенная работа сжатия в компрессоре позволяет повысить располагаемый теплоперепад на всю турбину в целом. Поскольку способ крепления сопловых лопаток ТНД позволяет изменять угол их установки, то технологических сложностей по изменению проходного сечения СА ТНД нет.

Расчеты проводились для двух контрольных сечений, по которым выполняется контроль горла решетки при облопачивании обоймы ТНД. По результатам расчетного исследования был выбран один из вариантов (рис.9).

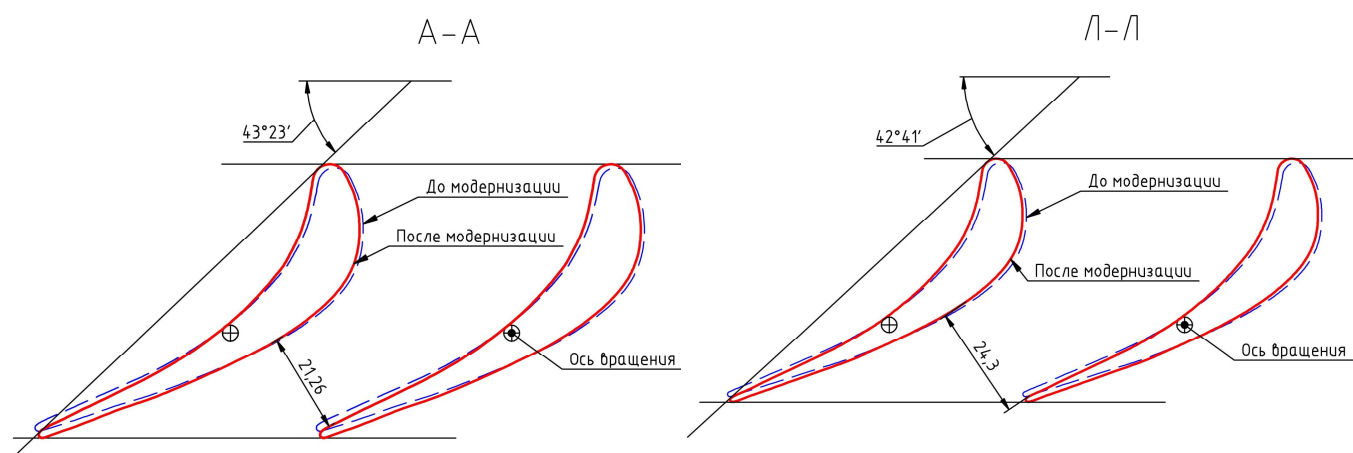


Рис.9. Контрольные сечения решетки СА ТНД ГТН-16 до и после модернизации

Представлены результаты теплотехнических испытаний ГТУ ГТН-16 со штатным положением СА ТНД и раскрытым согласно проведенному исследованию (угол установки увеличен на 2^0). Результаты обработки данных испытаний приведены на рис.10.

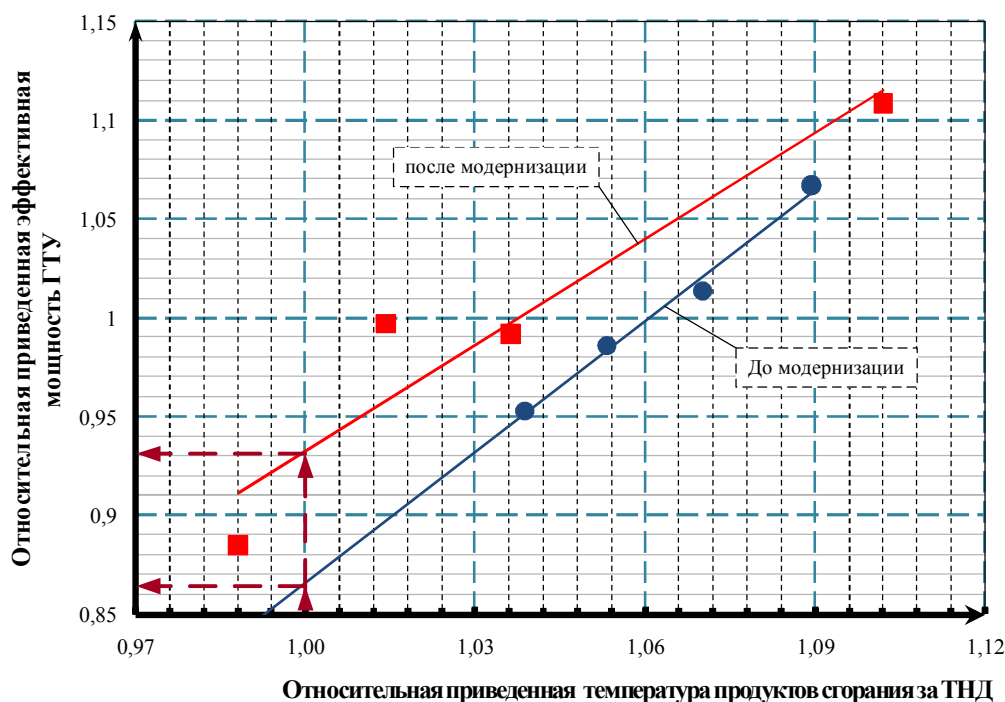


Рис.10. Результаты обработки экспериментальных данных по испытаниям ГТУ типа ГТН-16 с измененным углом установки СА ТНД

По результатам обработки экспериментальных данных мощность, вырабатываемая ГТУ, приведенная к нормальным условиям, увеличилась не менее чем на 4%. Мощность определялась по потребляемой мощности центробежного нагнетателя природного газа.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработана и апробирована методика проведения специальных экспериментальных исследований осевого компрессора приводной стационарной ГТУ в условиях эксплуатации, направленных на выявление срывных и неустойчивых режимов его работы.
2. Установлено, что граница устойчивой работы ОК ГТК-10-4 вследствие изменения характеристик сети в системе компрессор-сеть сужена. Внесены

предложения по ограничению максимальной частоты вращения ротора турбокомпрессора в зависимости от температуры воздуха на всасе ОК с целью исключения попадания рабочей точки в зону неустойчивой работы.

3. Проведены численные исследования характера обтекания лопаточного аппарата ОК ГТК-10-4 с применением современных программных средств. Результаты имеют хорошую сходимость с экспериментальными данными. Уточнена физическая картина обтекания лопаточных венцов. Установлены и показаны причины недостаточного запаса ГДУ в части особенностей профилирования лопаток ступеней компрессора. Созданы предпосылки для выполнения работ по совершенствованию конструкции лопаточного аппарата ОК с целью увеличения его экономичности и газодинамической устойчивости.
4. Установлено при помощи численных методов исследований влияние конструкции ВЗК ГТУ ГТК-10-4 на работу ОК при неблагоприятных климатических условиях и приближении рабочей точки на характеристике компрессора к границе устойчивости. Результаты хорошо соотносятся с данными испытаний.
5. Реализован и апробирован способ повышения эффективности работы ГТУ типа ГТН-16 за счет оптимального выбора нагруженности турбинных ступеней с помощью изменения угла установки лопаток СА ТНД. Прирост вырабатываемой эффективной приведенной мощности установки составил не менее 4 %.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

Список публикаций по теме повышения эффективности работы газотурбинных установок насчитывает 23 позиции.

Основные результаты диссертации изложены в следующих научных работах, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК:

1. Влияние геометрических параметров первой ступени осевого компрессора на диапазон и эффективность ее регулирования / Б.С. Ревзин, А.О. Прокопец, А.В. Рожков // Компрессорная техника и пневматика. 2006. №11. 5 с.

2. О рациональности конструкторских решений по регулируемому входному направляющему аппарату компрессора ГТУ / Б.С. Ревзин, В.А. Седунин, А.П. Парамонов, А.О. Прокопец // Тяжелое машиностроение. 2009. №4. С. 7-9.
3. Проектирование первой ступени осевого компрессора ГТУ, работающей с регулируемым входным направляющим аппаратом / Ю.М. Бродов, О.В. Комаров, В.А. Седунин, А.О. Прокопец // Компрессорная техника и пневматика. 2011. №3. С. 9-12.
4. Вариантные расчеты первой ступени осевого компрессора ГТУ с регулируемым входным направляющим аппаратом / Ю.М. Бродов, О.В. Комаров, В.А. Седунин, А.О. Прокопец // Компрессорная техника и пневматика. 2011. №4. С. 29-32.
5. Совершенствование лопаточного аппарата осевого компрессора газотурбинных установок / А.О. Прокопец, Ю.М. Бродов, О.В. Комаров, В.А. Седунин // Тяжелое машиностроение. 2012. №2. С. 29-35.

Работы по теме диссертации, опубликованные в других изданиях:

6. Исследование режимов работы осевого компрессора модернизированного газоперекачивающего агрегата мощностью 25 МВт / А.О.Прокопец [и др.] // Десятый международный симпозиум «Потребители-производители компрессоров и компрессорного оборудования - 2004»: сб. науч. тр. Санкт-Петербург: Издательство Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, 2004. С.137-141.
7. О причинах возникновения и методе диагностирования вращающегося срыва при модернизации стационарных ГТУ / А.О. Прокопец [и др.] // Вестник УГТУ-УПИ: Теплоэнергетика. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. С. 300-305.
8. Противодействие развитию вращающегося срыва в осевом компрессоре модернизированных ГТУ / С.В. Алимов, А.О. Прокопец // LIІ науч.-техн. сессия по газовым турбинам: сб. тез. Самара, 2005. С. 197-198.
9. Повышение эффективности работы стационарных приводных газотурбинных установок в условиях эксплуатации ООО «Газпром трансгаз Югорск» / А.О. Прокопец, Ю.М. Бродов, О.В. Комаров, А.В. Скороходов // IV Международная конференция «Газотранспортные системы: настоящее и будущее (GTS-2011)», Москва, 26-27 октября 2011 г.: тез. докл. М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2011. С. 122.

Подписано в печать 23.04.2012.		Формат 60x84 1/16.
Бумага типографская.	Плоская печать.	Усл. печ.л. 1,16
Уч.-изд. л. 1,0	Тираж 100 экз.	Заказ ____

Ризография НИЧ УрФУ
620002, Екатеринбург, ул. Мира,19