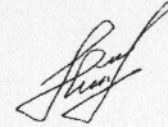


поторек
Ц 61

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ОДЕССКАЯ НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ ПИЩЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

ЩЕРБАКОВ ОЛЕГ НИКОЛАЕВИЧ



УДК 621.515

**РАСШИРЕНИЕ ДИАПАЗОНА УСТОЙЧИВОЙ РАБОТЫ СТУПЕНЕЙ
ЦЕНТРОБЕЖНЫХ КОМПРЕССОРОВ ПУТЕМ АКТИВНОГО
ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ТЕЧЕНИЕ В БЕЗЛОПАТОЧНЫХ ДИФФУЗОРАХ**

Специальность 05.05.14 – Холодильная, вакуумная и компрессорная техника,
системы кондиционирования

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Одесса – 2014

Диссертация является рукописью.

Работа выполнена в Сумском государственном университете Министерства образования и науки Украины.

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент,
Калинкевич Николай Васильевич,
Сумский государственный университет
МОН Украины,
доцент кафедры технической теплофизики

Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор
Лавренченко Георгий Константинович,
президент Украинской ассоциации производителей
технических газов «УА-СИГМА»

кандидат технических наук, доцент
Очеретяный Юрий Александрович,
доцент кафедры судовой теплоэнергетики
и холодильной техники
Одесской национальной морской академии

Защита диссертации состоится “06” октября 2014 г. в 14:00 в ауд. 108 на заседании специализированного ученого совета Д41.088.03 в Одесской национальной академии пищевых технологий по адресу: 65082, ул. Дворянская, 1/3, г. Одесса, Украина.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Одесской национальной академии пищевых технологий по адресу: 65082, ул. Дворянская, 1/3, г. Одесса, Украина.

Автореферат разослан “28” августа 2014 года.

Ученый секретарь специализированного
ученого совета Д41.088.03,
доктор технических наук, профессор


В. И. Милованов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Центробежные компрессоры (ЦК) широко применяются во многих отраслях промышленности. ЦК зачастую работают на различных режимах по производительности, поэтому очень важно обеспечить их безопасную (устойчивую) работу в широком диапазоне расходов.

Ступени с безлопаточными диффузорами (БЛД) обладают пологими характеристиками и достаточно широкой зоной устойчивой работы в области больших производительностей. Кроме того, они имеют ряд дополнительных преимуществ по сравнению с диффузорами других типов: они проще в изготовлении, а более равномерное распределение давлений за рабочим колесом (РК) способствует повышению динамической прочности ротора. Однако в области малых расходов эффективность ступеней с БЛД резко снижается и возникает режим помпажа. Возникающие при помпаже колебания расхода и давления газа вызывают повышение нагрузок на ротор и подшипники машины, что может привести к их разрушению и как следствие к большим материальным убыткам. Это, в большей мере относится к компрессорам высокого и сверхвысокого давления, нагнетателям природного газа, а также турбокомпрессорам нефтегазового комплекса и химических производств.

Поэтому расширение диапазона устойчивой работы и повышение эффективности ступеней с БЛД в области малых производительностей является актуальной научно-технической задачей.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Диссертационное исследование проводилось в рамках плана научно-исследовательских работ кафедры технической теплофизики Сумского государственного университета (СумГУ), а также плана научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ ПАО «Сумское машиностроительное научно-производственное объединение им. М.В. Фрунзе» (г. Сумы, Украина). Научные разработки реализованы во время выполнения госбюджетной научно-исследовательской работы по теме «Исследование рабочих процессов энергетических машин» (заказчик – Министерство образования и науки Украины, номер государственной регистрации 0110U004210).

Цели и задачи исследования. Цель исследования – расширить диапазон устойчивой работы ступеней ЦК с БЛД и определить влияние конструктивных параметров ступенчатых БЛД и режима вдува на характеристики диффузоров и ступеней в целом.

Задачи исследования:

1. Проанализировать факторы, которые вызывают возникновение неустойчивых режимов работы ЦК и рассмотреть существующие методы расширения диапазона устойчивой работы ЦК.

2. Разработать математическую модель течения в БЛД, учитывающую подвод массы, импульса, момента импульса и энергии за счет вдува. Реализовать разработанную модель в виде программного комплекса, позволяющего рассчитывать течения в БЛД средствами вычислительной техники.

3. Провести численное исследование и определить закономерности влияния конструктивных параметров ступенчатых БЛД и режима вдува на характеристики БЛД и на характер течения в диффузоре.

4. Разработать экспериментальную модель ступенчатого БЛД с системой вдува. Разработать методику проведения экспериментального исследования.

5. Выполнить экспериментальное исследование ступенчатого диффузора и вдува в БЛД. Определить влияние вдува на характеристики диффузора и ступени в целом.

Объект исследования – процесс течения газа в БЛД ступени ЦК.

Предмет исследования – методы активного воздействия на течение в БЛД ступени ЦК.

Методы исследования: математическое моделирование; экспериментальное исследование на аэродинамическом стенде.

Обоснованность и достоверность результатов исследования обеспечивается использованием методики и средств измерения, обеспечивающих допустимую погрешность определения основных величин, и хорошим согласованием расчетных и экспериментальных данных.

Научная новизна полученных результатов:

1. Впервые предложена математическая модель течения закрученного вязкого сжимаемого газа в БЛД с подводом массы, импульса, момента импульса и энергии за счет вдува.

2. Впервые разработана методика расчета течений в ступенчатых БЛД.

3. Доказано теоретически и подтверждено экспериментально, что применение радиально-направленного вдува в БЛД влияет на величину возникающих в диффузоре отрывных зон, а также сдвигает помпаж в область меньших производительностей.

4. Получены экспериментальные характеристики ступени ЦК со ступенчатым БЛД, а также характеристики ступенчатого диффузора и данные о структуре течения в нем при различных режимах вдува и без него. Полученные экспериментальные данные позволили развить физические представления о процессе взаимодействия основного и вдуваемого потоков.

Практическое значение полученных результатов:

1. Создана компьютерная программа, позволяющая на стадии проектирования рассчитывать характеристики и параметры течения в БЛД с целью выбора оптимального варианта диффузора и режима вдува.

2. Предложена принципиальная схема системы защиты ЦК от помпажа, основанная на применении вдува в БЛД. Использование предлагаемой схемы позволяет снизить потребляемую мощность по сравнению с широко используемой схемой антипомпажного регулирования, при которой газ перепускается с нагнетания на вход в РК.

3. Полученные экспериментальные данные о структуре течения в БЛД со вдувом пригодны для корректировки новых расчетных моделей течения в БЛД.

4. Результаты диссертационной работы используются на промышленном предприятии ПАО «Сумское НПО им. М.В. Фрунзе», а также в учебном процессе на кафедре технической теплофизики СумГУ.

Личный вклад соискателя заключается в анализе состояния вопроса, разработке математической модели течения в БЛД, разработке алгоритмов численного решения модельных задач, проведении численных исследований [1, 3, 7, 9]; планировании и проведении экспериментов, обработке экспериментальных данных [2, 5, 6]; сопоставлении результатов теоретического и экспериментального исследования [3, 4]; формулировании выводов [6].

Работа [5] написана соискателем самостоятельно.

Постановка задач; формулировка основных теоретических положений для создания математической модели; анализ результатов исследования выполнены совместно с научным руководителем, канд. техн. наук, доц. Калинкевичем Н.В.

Апробация результатов работы. Результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на ежегодной научно-технической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых «Современные проблемы холодильной техники и технологии» (г. Одесса, 2010 г.); Всеукраинской межвузовской научно-технической конференции «Современные технологии в промышленном производстве» (г. Сумы, 2010 г.); научно-технических конференциях преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов факультета технических систем и энергоэффективных технологий СумГУ «Современные технологии в промышленном производстве» (г. Сумы, Украина, 2011, 2012 и 2013 гг.); VIII Международной научно-технической конференции, посвященной 90-летию Одесской государственной академии холода «Устойчивое развитие и искусственный холод» (г. Одесса, Украина, 2012 г.); Всеукраинской научно-технической конференции молодых ученых и студентов «Состояние, достижения и перспективы холодильной техники и технологии» (г. Одесса, Украина, 2013 г.); международной конференции 8th IIR International Conference on Compressors and Coolants «Compressors 2013» (Паперника, Словацкая Республика, 2013 г.); международных конференциях 7th и 8th International Conference on Compressors and their Systems (г. Лондон, Великобритания, 2011 и 2013 гг.).

Публикации. Основное содержание диссертации отражено в 15 публикациях, из них: 5 статей в научных журналах, утвержденных положением ГАК МОН Украины [1-5] (в том числе 1 личная публикация [4] и одна публикация [3], которая включена в наукометрическую базу Scopus); 4 статьи в сборниках трудов международных конференций [6-9] (2 из которых: [6] и [9] обрабатываются наукометрической базой Scopus); а также 6 тезисов докладов на конференциях [10-15].

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх разделов, заключения, списка использованной литературы и приложений. Содержание работы изложено на 180 страницах машинописного текста, включая 74 рисунка (49 страниц), 3 таблицы (6 страниц) и список литературы из 112 наименований (11 страниц).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работ по расширению диапазона устойчивой работы ступеней ЦК с БЛД, отмечена связь работы с научными программами, указаны научная новизна и практическое значение полученных результатов, представлена информация об апробации работы и публикациях по теме диссертации.

В первом разделе представлены результаты проведенного обзора научно-технической информации, посвященной теоретическим и экспериментальным исследованиям течений в БЛД, а также способам расширения диапазона устойчивой работы центробежных ступеней.

Среди многочисленных работ, посвященных теоретическим и экспериментальным исследованиям течений в БЛД, следует особо отметить научные труды таких исследователей, как W. Jansen, R. Dean, Y. Senoo, D. Jarikse, Ю.Б. Галеркин, Г.Н. Ден, А.С. Нуждин, Р.А. Измайлов. Анализ публикаций по данной теме позволил сделать вывод о том, что в области малых производительностей в БЛД возникают отрывные течения, что влечет за собой снижение эффективности, а также может спровоцировать возникновение помпажа. Следовательно, для расширения диапазона устойчивой работы и для повышения эффективности работы ступеней в области малых производительностей целесообразно использовать способы управления отрывом потока.

Обзор научно-технической информации по теме диссертации показал, что существует ряд исследований, посвященных т.н. «безотрывным» БЛД. Среди наиболее известных работ следует отметить исследования Г.Н. Дена, А.Н. Шерстюка, В.Я. Полякова, Т.Н. Скороходовой и др. Однако рекомендации, предложенные различными авторами, несколько противоречат друг другу. Кроме того, было установлено, что применение «безотрывных» диффузоров зачастую приводит к снижению эффективности работы ступеней в области больших производительностей. Выполненный обзор литературы показал, что в последнее время наблюдается повышенный интерес к исследованию активных способов расширения диапазона устойчивой работы ступеней центробежных и осевых компрессоров (работы Z. Sprakovszky, G. Skoch, E. Nelson, A. Stein и др.). В большинстве из названных работ рассмотрено влияние вдува или отсоса газа в различных элементах проточной части, однако данных о применении их в БЛД не представлено.

В результате анализа имеющейся научно-технической информации были определены перспективные способы расширения диапазона устойчивой работы ступеней ЦК с БЛД, а именно, применение ступенчатых диффузоров, а также вдува газа в БЛД.

Во втором разделе представлена разработанная математическая модель течения газа в БЛД, учитывающая подвод массы, импульса, момента импульса и энергии за счет вдува. Основные уравнения были получены из основных законов сохранения, записанных для элементарного контрольного объема (рисунок 1). При выводе уравнений было принято, что течение в диффузоре установившееся осесимметричное. Рабочая среда основного и вдуваемого потоков – сжимаемый идеальный газ с постоянной удельной теплоемкостью.

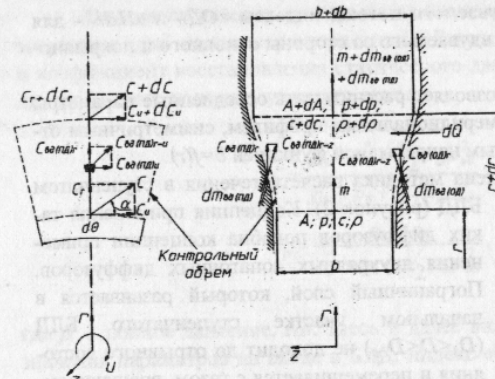


Рисунок 1 – Контрольный объем в БЛД

Полученная система дифференциальных уравнений состоит из уравнения неразрывности, уравнения импульса, уравнения момента импульса, уравнения энергии в форме первого закона термодинамики, уравнения состояния идеального газа, соотношения между компонентами скорости и уравнения, полученного из определения полной температуры:

$$\frac{dr}{\rho} + \frac{dc_r}{c_r} = \frac{dm_{\text{вд}}(\text{ОД})}{\dot{m}} + \frac{dm_{\text{вд}}(\text{ПД})}{\dot{m}} - \frac{dA}{A}; \quad (1)$$

$$\frac{dc_r}{c_r} + \frac{p}{\rho \cdot c_r^2} \cdot \frac{dp}{p} = \frac{dr}{r} \cdot ctg^2 \alpha - \frac{1}{2} C_f \cdot \frac{1}{\sin \alpha} \cdot \frac{dA_{\text{см}}}{A} - \left(1 - \frac{c_{\text{вд}}(\text{ОД})r}{c_r}\right) \cdot \frac{dm_{\text{вд}}(\text{ОД})}{\dot{m}} - \left(1 - \frac{c_{\text{вд}}(\text{ПД})r}{c_r}\right) \cdot \frac{dm_{\text{вд}}(\text{ПД})}{\dot{m}}; \quad (2)$$

$$\frac{dc_u}{c_u} = \frac{dr}{r} - \left(1 - \frac{c_{\text{вд}}(\text{ОД})u}{c_u}\right) \cdot \frac{dm_{\text{вд}}(\text{ОД})}{\dot{m}} - \left(1 - \frac{c_{\text{вд}}(\text{ПД})u}{c_u}\right) \cdot \frac{dm_{\text{вд}}(\text{ПД})}{\dot{m}} - \frac{1}{2} C_f \cdot \frac{dA_{\text{см}}}{A}; \quad (3)$$

$$\frac{dT^*}{T^*} = \frac{dm_{\text{вд}}(\text{ОД})}{\dot{m}} \cdot \left(\frac{T^*_{\text{вд}}(\text{ОД})}{T^*} - 1\right) + \frac{dm_{\text{вд}}(\text{ПД})}{\dot{m}} \cdot \left(\frac{T^*_{\text{вд}}(\text{ПД})}{T^*} - 1\right) + \frac{dq}{c_p T^*}; \quad (4)$$

$$\frac{dp}{p} - \frac{dr}{\rho} - \frac{dT}{T} = 0; \quad (5)$$

$$\frac{dT}{T} + \frac{c^2}{c_p \cdot T} \cdot \frac{dc}{c} = \left(1 + \frac{c^2}{2 \cdot c_p \cdot T}\right) \cdot \frac{dT^*}{T^*}; \quad (6)$$

$$\frac{dc}{c} - \sin^2 \alpha \cdot \frac{dc_r}{c_r} - \cos^2 \alpha \cdot \frac{dc_u}{c_u} = 0; \quad (7)$$

где \dot{m} – массовый расход газа, кг/с; r – радиус, м; p – статическое давление, Па; c – скорость, м/с; T – температура, К; T^* – полная температура, К; ρ – плотность, кг/м³; α – угол потока, град; C_f – коэффициент трения; A – площадь, м²; $A_{\text{см}}$ – площадь смоченной поверхности, м²; dq – удельная теплота, Дж/кг; c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг·К).

Индексы r и u используются для обозначения проекций абсолютной скорости в радиальном и окружном направлении соответственно; индекс «вд» –

для обозначения параметров вдуваемого потока; индексы «ОД» и «ПД» – для обозначения параметров потока, вдуваемого со стороны основного и покрывного дисков соответственно.

Представленная модель позволяет рассчитывать осредненные параметры течения в БЛД с произвольным меридиональным профилем, симметричным относительно плоскости r - u , заданным непрерывной функцией $b=f(r)$.

В работе также представлена методика расчета течения в ступенчатом

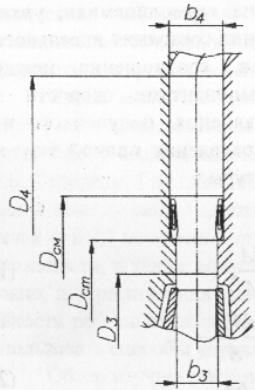


Рисунок 2 – Схема ступенчатого БЛД

БЛД (рисунок 2). Концепция применения таких диффузоров подобна концепции применения двухрядных лопаточных диффузоров. Пограничный слой, который развивается в начальном участке ступенчатого БЛД ($D_3 < D < D_{cm}$) не доходит до отрывного состояния и перемешивается с газом, вращающимся в циркуляционных зонах, образовавшихся за ступенчатым расширением. Считается, что при $D = D_{cm}$ смешение между основным потоком и завихренной его частью заканчивается и поток на выходе из зоны смешения имеет равномерное распределение параметров по ширине. Развивающийся же в широкой части ступенчатых БЛД ($D_{cm} < D < D_4$) пограничный слой не успевает дойти до отрывного состояния, или отрывается при меньших расходах.

Для расчета потерь полного давления в области за внезапным расширением на участке $D_{cm} < D < D_{cm}$ была предложена формула, подобная используемой при плоском течении, но с учетом закрутки потока:

$$\Delta p_{\text{в.р.}}^* = \left(\frac{\gamma}{\sin \alpha_{cm}} \right)^2 \frac{\rho_{cm} \cdot c_{cm}^2}{2} \left(1 - \frac{b_{cm} D_{cm}}{b_{cm} D_{cm}} \right)^2, \quad (8)$$

где γ – эмпирический коэффициент, полученный в дальнейшем на основании опытных данных, b – ширина БЛД, м. Индекс «см» используется для обозначения параметров в сечении внезапного расширения, индекс «см» – для параметров в конце зоны смешения.

Статическое давление в конце зоны смешения рассчитывается интегрированием уравнения (2) с использованием модели невязкого несжимаемого газа. Остальные параметры течения в конце зоны смешения определяются исходя из полученных значений полного и статического давлений.

Для расчета параметров пограничного слоя используется методика, предложенная профессором Г.Н. Деном. В качестве критерия отрыва используется формпараметр Бури. Коэффициент трения C_f рассчитывается в соответствии с рекомендациями D. Jarikse.

Поскольку течение со вдувом представляет собой процесс с подводом энергии, то для оценки характеристик БЛД используются коэффициент потерь и коэффициент восстановления статического давления, рассчитанные с учетом динамического напора вдуваемого потока:

$$\zeta = \frac{P_3^* - P_4^* + \frac{1}{2} \rho_{вд} c_{вд}^2}{P_3^* - P_3 + \frac{1}{2} \rho_{вд} c_{вд}^2}; \quad (9)$$

$$C_p = \frac{P_4 - P_3}{P_3^* - P_3 + \frac{1}{2} \rho_{вд} c_{вд}^2}, \quad (10)$$

где P^* – полное давление, Па. Здесь и далее индекс «3» используется для обозначения параметров на входе в БЛД; индекс «4» – для параметров на выходе из диффузора.

В качестве режимного параметра для построения характеристик используется угол потока на входе в БЛД:

$$\alpha_3 = \arctg \left(\frac{c_{r3}}{c_{u3}} \right). \quad (11)$$

На основании представленной модели был разработан программный комплекс, позволяющий рассчитывать характеристики и параметры течения в БЛД. С его помощью были проведены численные исследования влияния расхода и направления вдуваемого газа на характеристики и структуру течения в БЛД. Схема БЛД представлена на рисунке 3. Здесь $\bar{D} = D/D_2$ – относительный диаметр, $\bar{b} = b/D_2$ – относительная ширина диффузора, D_2 – наружный диаметр РК, м. Направление вдуваемого потока характеризуется углом β , который в дальнейшем назван углом вдуваемого потока.

Во втором разделе представлены результаты расчета коэффициента потерь

полного давления ζ и коэффициента восстановления статического давления C_p . На рисунках 4 и 5 представлены расчетные характеристики ступенчатого БЛД при различных значениях β при $\dot{m}_w = 0,02 \cdot \dot{G}_{p,m}$ и $\dot{m}_w = 0,04 \cdot \dot{G}_{p,m}$ соответственно, а также характеристики БЛД с параллельными стенками с той же относительной шириной на входе $\bar{b}_3 = 0,045$. Здесь и далее $\dot{G}_{p,m}$ – производительность ступени в

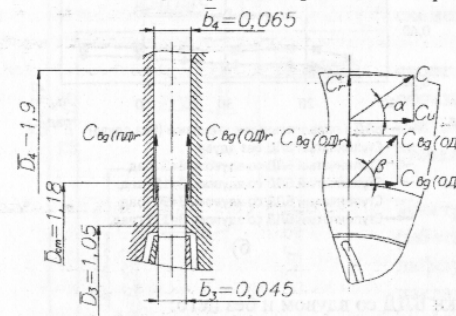


Рисунок 3 – Схема ступенчатого БЛД со вдувом

рабочей точке, кг/с. При расчетах принято, что в формуле (8) $\gamma=0,77$.

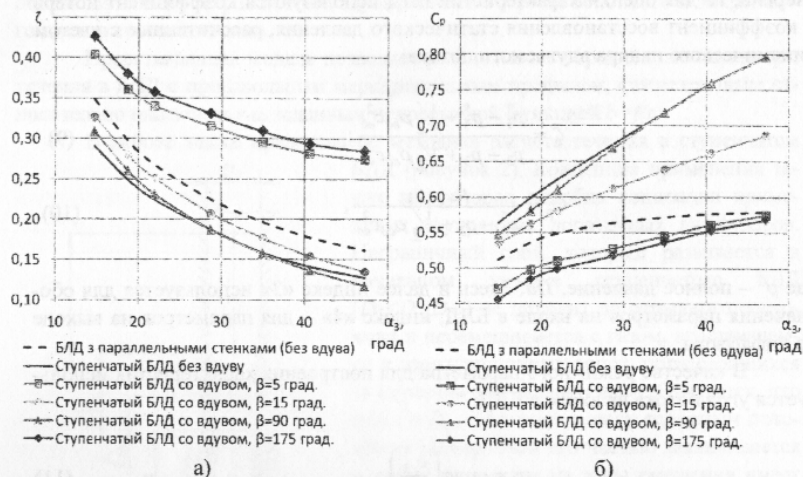


Рисунок 4 – Характеристики БЛД со вдувом и без него:

а) коэффициент потерь; б) коэффициент восстановления статического давления

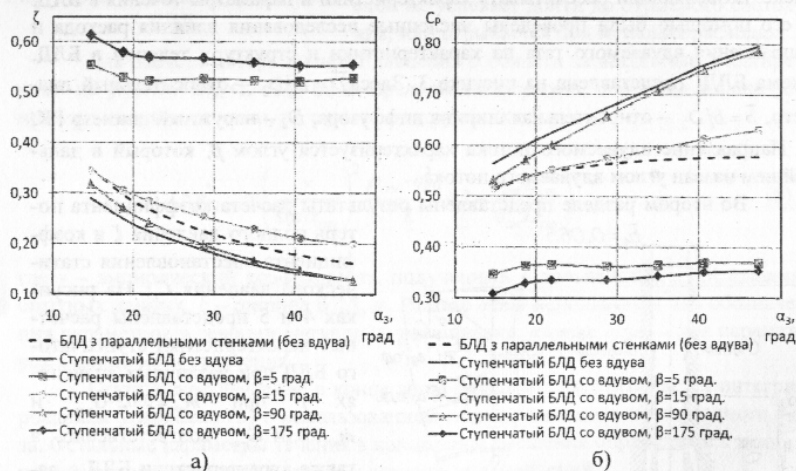


Рисунок 5 – Характеристики БЛД со вдувом и без него:

а) коэффициент потерь; б) коэффициент восстановления статического давления

Анализ полученных расчетных результатов позволили сделать следующие выводы:

- применение ступенчатых БЛД в сравнении с БЛД с параллельными стенками с той же шириной на входе позволяет получить большее торможение потока при меньшем уровне потерь. Это объясняется тем, что отрывные потери, возникающие в ступенчатых диффузорах в области за внезапным расширением значительно меньше, чем потери на трение в БЛД с постоянной шириной. Кроме того, как показал расчет пограничного слоя, отрыв потока в широкой части ступенчатых БЛД возникает при меньших расходах, что позволяет расширить зону устойчивой работы ступеней в области малых производительностей;

- применение вдува в БЛД позволяет сдвинуть режим при котором возникает отрыв потока в область меньших производительностей, что косвенно подтверждает возможность расширения диапазона устойчивой работы ступеней с помощью вдува. Чем больше расход, или угол вдуваемого потока, тем меньше производительность, при которой возникает отрыв потока;

- при вдуве в БЛД возникают потери на смешение основного и вдуваемого потоков. Потери смешения возрастают с увеличением расхода, или угла вдуваемого потока. Как показал расчет характеристик БЛД с учетом динамического напора вдуваемой струи, наименьший уровень потерь и большее торможение потока обеспечивает вдув в радиальном направлении.

В третьем разделе дано описание экспериментальной установки, программы испытаний и применявшихся средств измерений, изложена методика

обработки опытных данных, выполнена оценка погрешности определения основных величин.

Экспериментальные исследования проводились на аэродинамическом стенде АД-400 научно-исследовательского комплекса ПАО «Сумское НПО им. М.В. Фрунзе». Стенд выполнен по открытой схеме, рабочей средой является воздух.

Модельная ступень (рисунок 6) состоит из РК закрытого типа с 11-ю S-образными лопатками (угол выхода лопаток равен 32°) и БЛД с параллельными стенками.

Для исследования влияния вдува конструкция исходной ступени была доработана (рисунок 7). Во входном участке диффузора были установлены кольцевые накладки 1, играющие роль соплового аппарата. После установки накладок значительные относительные ширины диффузора на входе снизилась до значения $\bar{b}_3=0,045$

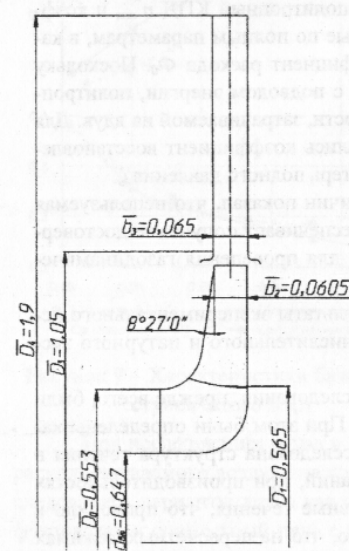


Рисунок 6 – Конструктивная схема базовой ступени

($b_3/b_2=0,75$). Относительный наружный диаметр соплового аппарата $\bar{D}_{\text{сн}}=1,18$. Относительная ширина диффузора за сопловым аппаратом равна относительной ширине диффузора базовой ступени $B_f=0,065$. На поверхностях накладок, прилегающих к дискам диффузора 2, выполнены канавки, через которые вдувался воздух. Каждая из накладок имеет 90 радиально-направленных проточек, равномерно расположенных по окружности. Ширина проточек – 4 мм, глубина – 1,5 мм. Воздух, используемый для вдува в БЛД, подавался от заводской пневмостии по двум независи-

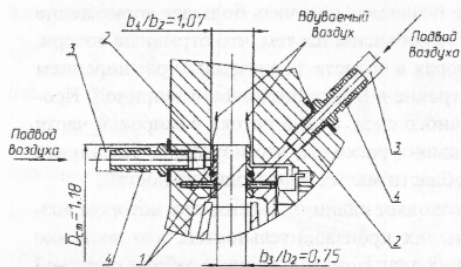


Рисунок 7 – Конструктивная схема БЛД после доработки:

- 1 – накладки для вдува; 2 – диск диффузора;
3 – рукав; 4 – штуцер

мым линиям: одна служила для вдува со стороны основного диска диффузора, вторая – со стороны покрывного. При проведении исследования определялись характеристики ступени, характеристики БЛД, структура течения в диффузоре, а также влияние режима вдува на границу возникновения помпажа. Режим помпажа диагностировался по уровню колебаний давления на расходомерной диафрагме. Для оценки эффективности двухзвенной ступени использовались политропный КПД $\eta_{\text{пол}}^*$ и коэффициент политропного напора $\psi_{\text{пол}}^*$, рассчитанные по полным параметрам, в качестве режимного параметра – условный коэффициент расхода Φ_p . Поскольку течение со вдувом представляет собой процесс с подводом энергии, политропный КПД ступени рассчитывался с учетом мощности, затрачиваемой на вдув. Для оценки эффективности работы БЛД использовались коэффициент восстановления статического давления ζ_p и коэффициент потерь полного давления ζ .

Расчет погрешностей определяемых величин показал, что используемая методика экспериментального исследования обеспечивает получение достоверных экспериментальных данных с допустимой для проведения газодинамических исследований точностью.

В четвертом разделе представлены результаты экспериментального исследования, а также сравнение результатов вычислительного и натурного экспериментов.

При проведении экспериментального исследования, прежде всего, были проведены испытания ступени с базовым БЛД. При этом были определены характеристики ступени и диффузора, а также исследована структура течения в базовом БЛД. Как показали результаты испытаний, при производительностях меньших оптимальной, в БЛД возникали отрывные течения, что приводило к повышению потерь. Кроме того, было выявлено, что на нерасчетных режимах снижение эффективности ступени связано с повышением потерь смешения струй и следов, выходящих из РК.

На рисунке 8 представлены экспериментальные характеристики ступени со ступенчатым БЛД. Как показали результаты экспериментального исследования, применение суженого ступенчатого БЛД позволило сдвинуть границу возникновения помпажа в область меньших производительностей на 9%. При этом в области близкой к оптимальному режиму работы и зоне меньших расходов изменение политропного КПД и коэффициента политропного напора ступени находилось в пределах погрешности измерений. В области больших производительностей эффективность двухзвенной ступени снизилась. Это вызвано неблагоприятным течением из-за резкого сужения на участке между выходом из РК и входом в диффузор.

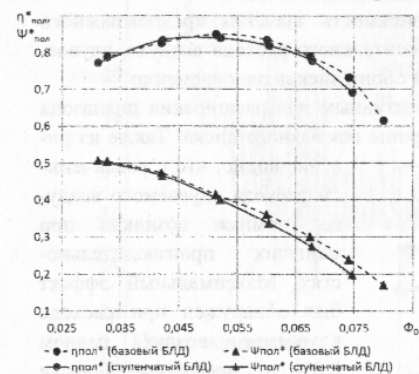


Рисунок 8 – Экспериментальные характеристики ступени с базовым и ступенчатым БЛД ($M_{U2} \approx 0,51$)

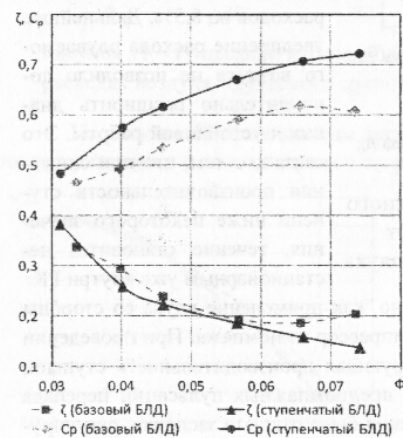


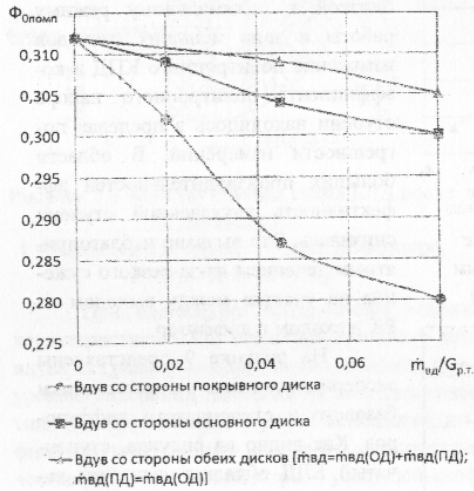
Рисунок 9 – Характеристики базового и ступенчатого БЛД

При исследовании вдува в БЛД, прежде всего, было определено влияние расхода вдуваемого воздуха на границу возникновения помпажа. При этом исследовались варианты вдува как отдельно со стороны каждого из дисков диффузора, так и совместный вдув с обеих сторон. В качестве критерия возникновения помпажа использовалось значение амплитуды перепада давления на диафрагме, соответствующее предположительной производительности.

Результаты экспериментов показали, что вдув в БЛД позволяет сдвинуть границу помпажа в область меньших производительностей.

На рисунке 10 представлена зависимость значения предпомпажного условного коэффициента расхода от относительного расхода воздуха, вдуваемого со стороны основного, покрывного и обоих дисков одновременно.

Как видно из рисунка более эффективным для расширения диапазона устойчивой работы оказался вдув со стороны покрывного диска. Также из рисунка видно, что с увеличением расхода вдуваемого воздуха, помпаж возникал при меньших производительностях.



Максимальный эффект был обнаружен при расходе вдуваемого воздуха равном 8,0% от производительности компрессора на номинальном режиме. При этом помпаж сдвинулся в область меньших расходов на 8,5%. Дальнейшее увеличение расхода вдуваемого воздуха не позволило дополнительно расширить диапазон устойчивой работы. Это связано с тем, что при снижении производительности ступени ниже некоторого значения, течение становится нестационарным уже внутри РК.

Рисунок 10 – Зависимость предпомпажного условного коэффициента расхода от относительного расхода вдуваемого воздуха

На рисунке 11 продемонстрировано, как применение вдува со стороны покрывного диска позволило вывести компрессор из помпажа. При проведении данного эксперимента задвижка, регулирующая производительность ступени, плавно прикрывалась до возникновения предпомпажных пульсаций перепада давления на диафрагме. После их выявления была открыта заслонка, регулирующая подачу вдуваемого воздуха, и установлен расход вдуваемого воздуха, равный 4,5 % от производительности ступени в рабочей точке. В результате амплитуда колебаний перепада давления уменьшилась, работа ступени стабилизировалась. Затем производительность ступени вновь была снижена до возникновения предпомпажных пульсаций, после чего расход вдуваемого воздуха был увеличен до 8,0 % и работа ступени вновь стабилизировалась.

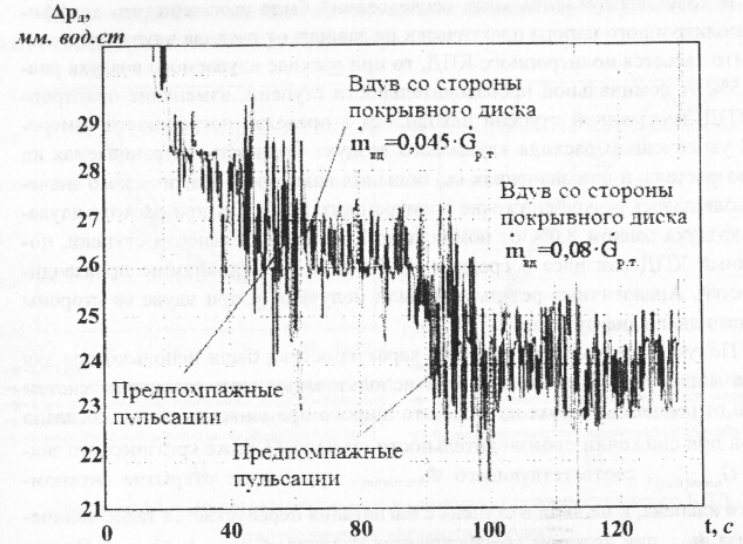


Рисунок 11 – Пульсации перепада давления на диафрагме при различных расходах воздуха, вдуваемого со стороны покрывного диска

На рисунке 12 представлены экспериментальные характеристики ступени при различных режимах вдува со стороны покрывного диска.

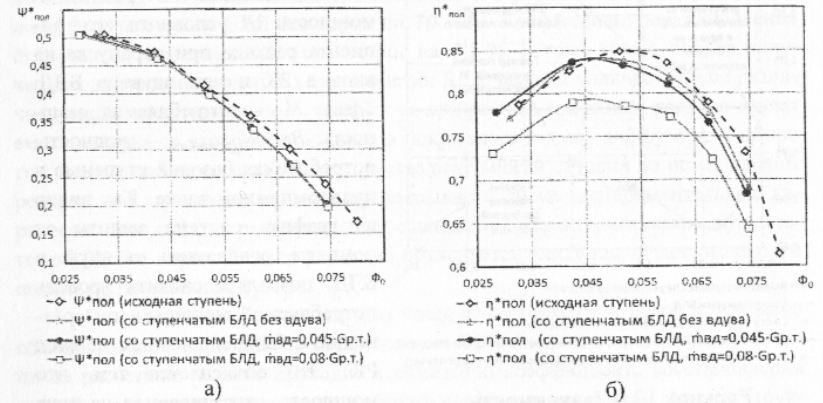


Рисунок 12 – Характеристики ступени со ступенчатым БЛД при различных режимах вдува со стороны покрывного диска диффузора: а) коэффициент политропного напора; б) политропный КПД

В ходе экспериментальных исследований было выявлено, что коэффициент политропного напора практически не зависит от расхода ддуваемого воздуха. Что касается политропного КПД, то при расходе ддуваемого воздуха равном 4,5% от номинальной производительности ступени, изменение политропного КПД двухзвенной ступени находилось в пределах погрешности измерения. С увеличением расхода ддуваемого воздуха мощность, затрачиваемая на вдув, возрастала, и при значениях $\dot{m}_{вд}$ больших некоторого критического значения, наблюдалось резкое снижение политропного КПД. Так при расходе ддуваемого воздуха равном 8,0% от номинальной производительности ступени, политропный КПД снизился в среднем на 4-5% во всем диапазоне производительностей. Аналогичные результаты были получены и при вдуве со стороны основного диска диффузора.

Полученные экспериментально характеристики были использованы для расчета мощности, потребляемой при использовании двух различных систем защиты от помпажа. Первая из них – это широко применяемая схема, согласно которой при снижении производительности ступени \dot{G} ниже критического значения $\dot{G}_{помп(баз)}$, соответствующего $\Phi_{помп(баз)}$, происходит открытие антипомпажного клапана, и на вход в ступень с нагнетания перепускается такое количество газа $\dot{m}_{пер}$, при котором обеспечивается условие $(\dot{G} + \dot{m}_{пер}) = \dot{G}_{помп(баз)}$. Вторая основана на использовании вдува в БЛД. Расчеты были выполнены для значений условного коэффициента расхода меньших, чем значение Φ_0 при помпаже для базовой ступени ($\Phi_0 \leq \Phi_{помп(баз)} = 0,0339$).

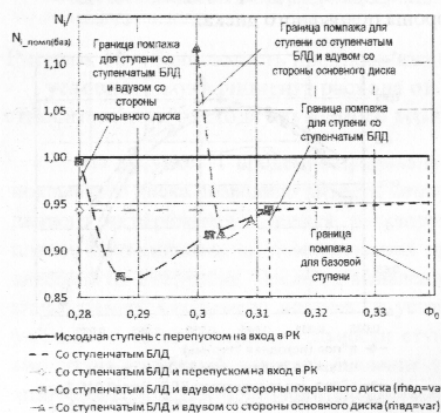


Рисунок 13 – Зависимость потребляемой мощности от условного коэффициента расхода при перепуске на вход в РК и при вдуве в БЛД

На рисунке 13 представлена зависимость потребляемой мощности от условного коэффициента расхода при перепуске на вход в РК и при вдуве в БЛД. Здесь N_i – потребляемая мощность, Вт; $N_{i, помп(баз)}$ – мощность, потребляемая базовой ступенью в предпомпажной точке. Как видно из графика система защиты от помпажа, основанная на вдуве в БЛД, позволяет снизить уровень потребляемой мощности по сравнению с байпасированием на вход РК. Это объясняется тем, что мощность, затрачиваемая на вдув в диффузоре, меньше, чем мощность, необходимая для сжатия перепускаемого газа в РК.

На рисунке 14 представлены экспериментальные характеристики ступенчатого БЛД при различных режимах вдува.

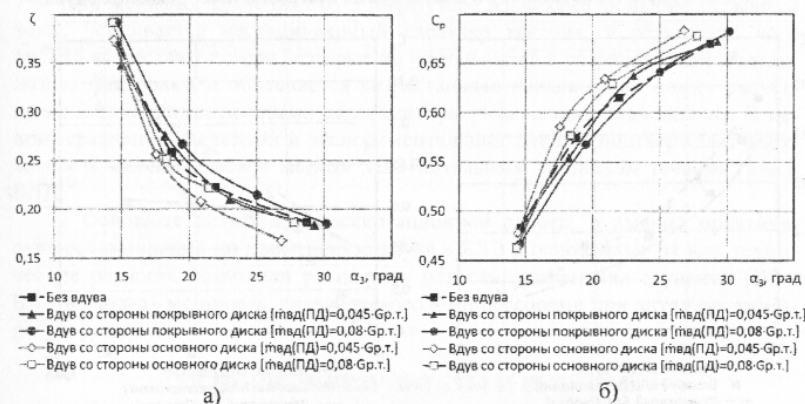


Рисунок 14 – Экспериментальные характеристики ступенчатого БЛД при различных вариантах вдува:

а) коэффициент потерь полного давления; б) коэффициент восстановления статического давления

Как видно из рисунка, при вдуве со стороны основного диска (расход ддуваемого воздуха равен 4,5% от производительности ступени на номинальном режиме), коэффициент потерь снизился по сравнению с коэффициентом потерь ступенчатого БЛД без вдува на 10-12%. Коэффициент восстановления статического давления при этом возрос на 4-5 %. В тоже время, анализ полученных экспериментальных характеристик БЛД, выявил количественное различие между характеристиками диффузора при равных значениях расхода ддуваемого воздуха со стороны основного и покрывного дисков диффузора. Так при том же расходе воздуха (4,5% от производительности ступени на номинальном режиме), но вдуваемом со стороны покрывного диска экспериментальные характеристики диффузора практически совпадают с характеристиками ступенчатого БЛД без вдува. Данное различие объясняется влиянием неравномерности потока по ширине диффузора.

Из рисунка также следует, что увеличение расхода воздуха, ддуваемого со стороны любого из дисков диффузора, до 8,0% от производительности ступени на расчетном режиме приводит к снижению коэффициента восстановления статического давления и к росту значений коэффициента потерь. Анализ структуры течения в БЛД со вдувом подтвердил, что с ростом расхода ддуваемого воздуха увеличиваются потери смешения основного и ддуваемого потоков.

На рисунке 15 представлено сравнение расчетных и экспериментальных характеристик базового и ступенчатого БЛД, на рисунке 16 – расчетные и экспериментальные характеристики ступенчатого БЛД при различных режимах вдува.

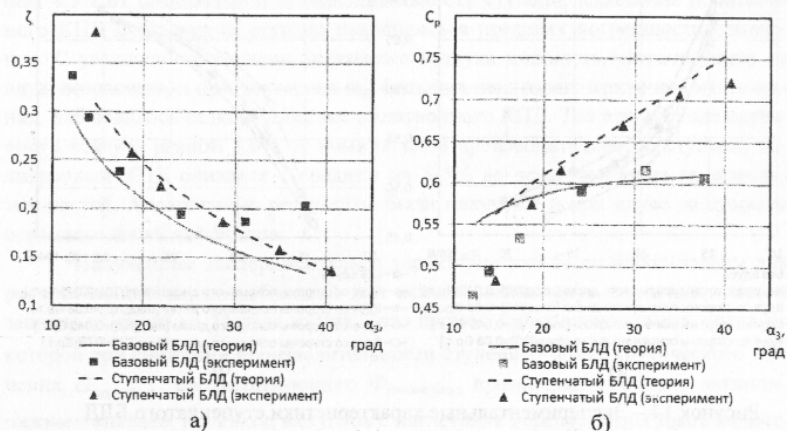


Рисунок 15 – Расчетные и экспериментальные характеристики базового и ступенчатого БЛД:

а) коэффициент потерь полного давления; б) коэффициент восстановления статического давления

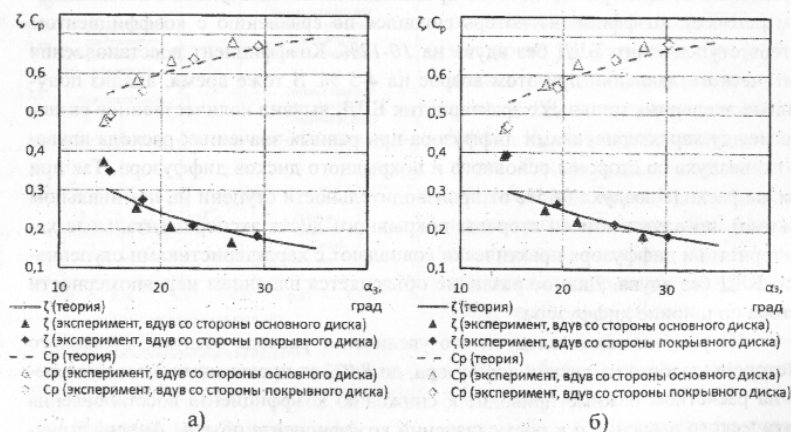


Рисунок 16 – Расчетные и экспериментальные характеристики ступенчатого БЛД со вдувом:

а) $\dot{m}_{вд} = 0,045 \cdot \dot{G}_{р.м.}$; б) $\dot{m}_{вд} = 0,08 \cdot \dot{G}_{р.м.}$

Расхождение между расчетными и экспериментальными данными при средних значениях углов потока на входе в БЛД ($18^\circ < \alpha_3 < 30^\circ$) не превышает 7%. При меньших значениях α_3 в диффузоре возникают большие отрывные зоны, усиливается нестационарный характер течения, в результате чего сильно возрастают потери, которые не учитываются в разработанной модели. Этими факторами и объясняется возрастающее расхождение между расчетными и экспериментальными данными при уменьшении значений α_3 . В целом, сравнение расчетных и экспериментальных данных подтверждает адекватность математической модели действительным процессам течения газа в БЛД.

Основные результаты диссертационной работы, а именно практические рекомендации по применению вдува в БЛД и основанные на них технические решения позволили расширить область применения ступеней ЦК с БЛД и снизить мощность, потребляемую компрессорами при антипомпажном регулировании.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Диссертационная работа посвящена способам расширения диапазона устойчивой работы ступеней ЦК путем активного воздействия на поток в БЛД.

По результатам выполненной работы можно сделать следующие выводы:

1. Проанализировав причины возникновения нестационарных режимов работы ЦК в области малых производительностей, установлено, что для расширения диапазона устойчивой работы ЦК необходимо применять способы управления отрывом потока. Наиболее целесообразными для расширения диапазона устойчивой работы ЦК являются методы активного воздействия на течение, в частности вдув в БЛД.

2. Результаты расчетно-теоретического анализа, полученные с помощью разработанной математической модели течения в БЛД со вдувом, продемонстрировали возможность расширения диапазона устойчивой работы ступеней ЦК за счет применения вдува в БЛД. При этом анализ полученных результатов расчета показал, что при вдуве возникают потери смешения, величина которых существенно зависит от направления вдуваемого потока. Определено, что наименьший уровень потерь обеспечивает вдув в радиальном направлении.

3. Результаты расчетного и экспериментального исследований показали, что применение ступенчатых БЛД позволяет получить большее торможение потока при меньшем уровне потерь, чем применение БЛД с параллельными стенками с той же шириной на входе. Кроме того, применение суженных на входном участке ступенчатых БЛД позволяет расширить зону устойчивой работы ступеней в области малых производительностей.

4. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили возможность расширения диапазона устойчивой работы ступеней с ЦК с помощью радиально-направленного вдува в БЛД. Лучшие результаты по расши-

рению диапазона устойчивой работы продемонстрировал вдув, осуществляемый со стороны покрывного диска диффузора. Чем больше расход вдуваемого газа, тем меньше производительность ступени при которой начинается помпаж. Благодаря вдуву в БЛД диапазон устойчивой работы ступени может быть расширен до тех пор пока, помпажные явления не начинают формироваться в РК. Применение вдува в БЛД позволяет снизить потребляемую мощность при антипомпажном регулировании по сравнению с широко используемой системой байпасирования на вход в РК. Определено, что политропный КПД ступени, рассчитанный с учетом затрачиваемой на вдув мощности, существенно зависит от расхода вдуваемого газа. При больших расходах вдуваемого газа, мощность, затрачиваемая на вдув, а также потери смешения, резко возрастают, в результате чего политропный КПД снижается. Коэффициент политропного напора ступени практически не зависит от расхода вдуваемого воздуха.

5. Согласование расчетных и экспериментальных данных по характеристикам и структуре течения в БЛД с различной геометрией и при различных режимах вдува подтверждает адекватность математической модели.

6. Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе на кафедре технической теплофизики СумГУ, а также на промышленном предприятии ПАО «СНПО им. М.В. Фрунзе».

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

1. Калинкевич, Н. В. Расчет течений в безлопаточных диффузорах центробежных компрессоров [Текст] / Н. В. Калинкевич, О. Н. Щербаков // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2010. – № 3 (21). – С. 36–42.

Личный вклад: анализ состояния проблемы, разработка математической модели, создание алгоритмов численного решения, подготовка материалов к публикации.

2. Калинкевич, Н. В. Экспериментальное исследование течения газа в безлопаточном диффузоре центробежного компрессора [Текст] / Н. В. Калинкевич, О. Н. Щербаков // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія гірничо-електромеханічна. – 2011. – № 22 (195). – С. 86–97.

Личный вклад: планирование и проведение экспериментальных исследований, обработка экспериментальных данных, подготовка материалов к публикации.

3. Mykola Kalinkevych. Numerical Modeling of the Flow in a Vaneless Diffuser of Centrifugal Compressor Stage [Электронный ресурс] / Mykola Kalinkevych and Oleg Shcherbakov // ISRN Mechanical Engineering. – 2013. – Vol. 2013, Article ID 602384. – 9 pages. – Режим доступа до журналу: <http://www.hindawi.com/journals/isrn/2013/602384/>

Личный вклад: проведение численных исследований, подготовка материалов к публикации.

✓ 4. Щербаков, О. Н. Методика экспериментального исследования вдува в безлопаточном диффузоре центробежного компрессора [Текст] // Холодильная техника та технологія. – 2014. – № 1 (147). – С. 57–62.

✓ 5. Калинкевич, Н. В. Экспериментальное исследование воздействия на пограничный слой в безлопаточном диффузоре центробежной ступени [Текст] / Н. В. Калинкевич, О. Н. Щербаков // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2014. – № 1 (35). – С. 11–15.

Личный вклад: разработка экспериментальной модели, планирование и проведение экспериментальных исследований, обработка экспериментальных данных, формулирование выводов, подготовка материалов к публикации.

6. M. Kalinkevych. Investigation of the gas flow in the vaneless diffusers of the centrifugal compressors [Текст] / M. Kalinkevych, O. Shcherbakov, O. Gusak, V. Ihnatenko // 7th International Conference on Compressors and their Systems, 5–6 September, 2011. – London, UK. – P. 51–60.

Личный вклад: разработка математической модели, создание алгоритмов численного решения, выполнение расчетов, подготовка материалов к публикации.

7. Калинкевич, Н. В. Численное и экспериментальное исследование течения в безлопаточном диффузоре центробежного компрессора [Текст] / Н. В. Калинкевич, О. Н. Щербаков // Збірник наукових праць VIII Міжнародної науково-технічної конференції «Сталий розвиток і штучний холод», 8–10 жовтня, 2012. – Одеса. – С. 364–369.

Личный вклад: подготовка и проведение экспериментальных и численных исследований, обработка данных, сравнение результатов численного и натурального экспериментов, подготовка материалов к публикации.

8. Oleg Shcherbakov. Numerical Investigation of Injection in Vaneless Diffuser of Centrifugal Compressor [Текст] / Oleg Shcherbakov, Mykola Kalinkevych, Viktoriya Ihnatenko // 8th International Conference on Compressors and Coolants “Compressors 2013”, 2–4 September, 2013. – Papiernicka, Slovakia. – 8 pages.

Личный вклад: разработка математической модели течения, создание алгоритмов численного решения, выполнение расчетов, формулирование выводов, подготовка материалов к публикации.

9. Mykola Kalinkevych. Investigation of Gas Flow with Injection in Vaneless Diffuser of Centrifugal Compressor [Текст] / M. Kalinkevych, O. Shcherbakov, V. Ihnatenko // 8th International Conference on Compressors and their Systems, 9–10 September, 2013. – London, UK. – P. 501–510.

Личный вклад: разработка математической модели течения, создание алгоритмов численного решения, выполнение расчетов, формулирование выводов, подготовка материалов к публикации.

10. Щербаков, О. М. Дослідження течії в'язкого газу у безлопаткових диффузорах відцентрових компресорів [Текст] / О. М. Щербаков, М. В. Калинкевич, В. М. Ігнатенко // Сучасні технології в промисловому виробництві :

матеріали Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції (Суми, 19–23 квітня 2010 року). – Суми : СумДУ, 2010. – Ч. 3. – С. 73–74.

Личный вклад: анализ состояния проблемы, подготовка материалов к публикации.

11. Щербаков, О. Н. Расчет течения вязкого газа в безлопаточных диффузорах центробежных компрессоров [Текст] / О. Н. Щербаков // Сучасні проблеми холодильної техніки та технології : збірник тез доповідей щорічної науково-технічної конференції студентів, аспірантів, молодих вчених (27–28 квітня 2010 року) – Одеса : ОДАХ, 2010. – С. 85–86.

12. Калининвич, Н. В. Экспериментальное исследование течений газа в безлопаточном диффузоре центробежного компрессора [Текст] / Н. В. Калининвич, О. Н. Щербаков // Сучасні технології в промисловому виробництві : матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій (м. Суми, 18–22 квітня 2011 року). – Суми : СумДУ, 2011. – Ч. 3. – С. 26–27.

Личный вклад: планирование и проведение экспериментальных исследований, обработка опытных данных, подготовка материалов к публикации.

13. Калининвич, Н. В. Численное исследование течения в безлопаточном диффузоре центробежного компрессора [Текст] / Н. В. Калининвич, О. Н. Щербаков // Сучасні технології в промисловому виробництві : матеріали II Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції (м. Суми, 17–20 квітня 2012 р.). – Суми : СумДУ, 2012. – Ч. 3. – С. 80.

Личный вклад: проведение численных исследований, подготовка материалов к публикации.

14. Калининвич, Н. В. Экспериментальное исследование вдува в безлопаточном диффузоре центробежного компрессора [Текст] / Н. В. Калининвич, О. Н. Щербаков // Стан, досягнення і перспективи холодильної техніки і технології : матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених та студентів (22 квітня 2013 року). – Одеса : ОДАХ, 2013. – С. 104–105.

Личный вклад: планирование и проведение экспериментальных исследований, обработка опытных данных, формулирование выводов, подготовка материалов к публикации.

15. Калининвич, Н. В. Методика экспериментального исследования вдува в безлопаточном диффузоре центробежного компрессора [Текст] / Н. В. Калининвич, О. Н. Щербаков // Сучасні технології у промисловому виробництві : матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій (м. Суми, 23–26 квітня 2013 р.). – Суми : СумДУ, 2013. – Ч. 2. – С. 37.

Личный вклад: разработка экспериментальной модели, планирование экспериментальных исследований, разработка методики обработки экспериментальных данных, анализ погрешностей определения основных величин, подготовка материалов к публикации.

АННОТАЦИЯ

Щербаков О. Н. Расширение диапазона устойчивой работы ступеней центробежных компрессоров путем активного воздействия на течение в безлопаточных диффузорах. – Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.05.14 – “Холодильная, вакуумная и компрессорная техника, системы кондиционирования”. – Одесская национальная академия пищевых технологий. МОН Украины, Одесса, 2014.

Диссертация посвящена способам расширения диапазона устойчивой работы ступеней центробежных компрессоров с безлопаточными диффузорами.

Проанализировав причины возникновения нестационарных режимов работы ступеней центробежных компрессоров, установлено, что для расширения диапазона их устойчивой работы в области малых производительностей необходимо применять способы управления отрывом потока, в частности вдув в безлопаточных диффузорах.

В работе представлены математическая модель течения в безлопаточных диффузорах со вдувом, а также результаты численного и физического экспериментов. Доказано, что применение вдува в безлопаточных диффузорах позволяет расширить диапазон устойчивой работы ступеней центробежных компрессоров в области малых производительностей. Лучшие результаты по расширению диапазона устойчивой работы продемонстрировал вдув, осуществляемый со стороны покрывного диска диффузора. Чем больше расход вдуваемого газа, тем меньше производительность ступени при которой возникает помпаж. Благодаря вдуву в безлопаточном диффузоре диапазон устойчивой работы ступени может быть расширен до тех пор пока, помпажные явления не начинают формироваться в рабочем колесе. Продемонстрировано, что применение вдува в безлопаточном диффузоре позволяет снизить потребляемую мощность при антипомпажном регулировании по сравнению с широко используемой системой байпасирования на вход в рабочее колесо. Определено, что политропный КПД ступени, рассчитанный с учетом затрачиваемой на вдув мощности, существенно зависит от расхода вдуваемого газа. При больших расходах вдуваемого газа, мощность, затрачиваемая на вдув, а также потери смешения, резко возрастают, в результате чего политропный КПД снижается. Коэффициент политропного напора ступени практически не зависит от расхода вдуваемого воздуха. Сравнение расчетных и экспериментальных данных по структуре течения и характеристикам безлопаточных диффузоров подтвердило корректность разработанной математической модели.

Результаты работы имеют практическое значение для производителей компрессорного оборудования при проектировании центробежных компрессоров с широким диапазоном устойчивой работы.

Ключевые слова: центробежный компрессор, безлопаточный диффузор, диапазон устойчивой работы, помпаж, вдув.

АНОТАЦІЯ

Щербаків О. М. Розширення діапазону стійкої роботи ступенів відцентрових компресорів шляхом активного впливу на течію у безлопаткових дифузорах. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.14 – холодильна, вакуумна та компресорна техніка, системи кондиціонування. – Одеська національна академія харчових технологій, Одеса, 2014.

Дисертація присвячена способам розширення діапазону стійкої роботи ступенів відцентрових компресорів з безлопатковим дифузорами.

У роботі наведені математична модель течії у безлопаткових дифузорах з урахуванням вдуву, а також результати числового та фізичного експериментів. Доведено, що застосування вдуву у безлопаткових дифузорах дозволяє розширити діапазон стійкої роботи ступенів відцентрових компресорів при малих продуктивностях. Порівняння результатів натурного та числового експериментів підтвердило коректність розробленої математичної моделі.

Результати роботи мають практичне значення для виробників компресорного обладнання при проектуванні відцентрових компресорів з широким діапазоном стійкої роботи.

Ключові слова: відцентровий компресор, безлопатковий дифузор, діапазон стійкої роботи, помпаж, вдув.

ABSTRACT

Shcherbakov O. M. Extending of the stable flow range of centrifugal compressors using dynamic stabilization techniques in vaneless diffusers. – Manuscript.

The thesis for Candidate of science degree by specialty 05.05.14 – “Refrigerating, vacuum and compressor technique, air conditioning systems”. – Odessa national academy of food technologies, Ministry of Education and Science of Ukraine, Odessa, 2014.

This thesis is dedicated to techniques for extending the stable flow range of centrifugal compressor stages with vaneless diffusers.

Mathematical model for gas flow in vaneless diffuser with mass, momentum angular momentum and energy addition is presented. The results from numerical simulations and experiments are reported. It was shown that injection in vaneless diffusers improves the stable flow range. Comparing the results of simulations and experiments it was shown that the presented mathematical model is adequate and accurate.

Keywords: centrifugal compressor, vaneless diffuser, stable flow range, surge, injection.