На правах рукописи

СОЛОВЬЁВА Ольга Александровна

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ОПТИМИЗАЦИИ БЕЗЛОПАТОЧНЫХ ДИФФУЗОРОВ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ КОМПРЕССОРНЫХ СТУПЕНЕЙ

Специальность: 05.04.06 - Вакуумная, компрессорная техника и пневмосистемы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ») в научно-исследовательской лаборатории «Газовая динамика турбомашин».

Научный руководитель:	доктор технических наук, профессор **Галеркин Юрий Борисович**
Официальные оппоненты:	**Хисамеев Ибрагим Габдулхакович,** доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет», (г. Казань), заведующий кафедрой «Холодильной техники и технологии»
	Евдокимов Василий Евгеньевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, общество с ограниченной ответственностью научно-производственная фирма «ЭНТЕХМАШ», (Ленинградская обл., Всеволожский р-н, пос. им. Свердлова), технический директор
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет»

Защита состоится «05» июня 2018 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.229.09 ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», расположенного по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, Главное здание, аудитория 118.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке и на официальном сайте ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (http://www.spbstu.ru/)

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.т.н., профессор — Петриченко Михаил Романович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Одной из основных отраслей машиностроения является компрессоростроение. Компрессоры – машины, в которых механическая энергия привода используется для увеличения потенциальной и кинетической энергии газа. Основной путь снижения потребляемой компрессором энергии – повышение коэффициента полезного действия компрессора. Коэффициент полезного действия определяется техническим уровнем газодинамического проекта – выбором оптимальной формы проточной части.

Отечественные промышленные компрессоры во второй половине прошлого столетия имели по преимуществу ступени с лопаточными диффузорами, обеспечивающими высокий КПД на расчетном режиме. Наряду с повышением максимального КПД на расчетном режиме актуальным является расширение диапазона экономичной работы. Пологую характеристику КПД и широкую зону устойчивой работы имеют ступени с безлопаточными диффузорами (БЛД). Дополнительные преимущества БЛД: отсутствие износа лопаток диффузора, удешевление изготовления, отсутствие шаговой неравномерности давлений.

Обширное исследование ступеней с БЛД было предпринято в Проблемной лаборатории компрессоростроения ЛПИ с 1965 г. Достижения политехнической школы компрессоростроения привели к созданию Метода универсального моделирования. Это набор компьютерных программ для проектирования и оптимизации центробежных компрессоров. Программы показали высокую эффективность при создании компрессоров, в том числе с безлопаточными диффузорами.

В современной модели потерь БЛД Метода универсального моделирования используется 9 эмпирических коэффициентов, которые требуют тщательной идентификации. Актуальной задачей совершенствования математических моделей является использование обобщенных результатов CFD-расчетов БЛД взамен достаточно сложной и требующей большого количества эмпирических коэффициентов математической модели БЛД.

Цель работы

Разработка математической модели для расчета газодинамических характеристик безлопаточных диффузоров, исследование вязкого пространственного движения газа в БЛД различной формы, оптимизация формы безлопаточных диффузоров малорасходной и высокорасходной центробежной компрессорной

ступени методами вычислительной газодинамики.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

– выбрать и проанализировать методику расчетов и обработки результатов расчета;

– выполнить расчет серии БЛД в широком диапазоне конструктивных и газодинамических параметров методами вычислительной газодинамики;

– провести анализ структуры течения в безлопаточных диффузорах;

– исследовать влияние ширины, длины, критериев подобия, относительной шероховатости, угла входа потока на газодинамические характеристики безлопаточных диффузоров;

– оптимизировать безлопаточные диффузоры высокорасходной и малорасходной центробежной компрессорной ступени;

– обобщить результаты расчетного исследования БЛД центробежных компрессорных ступеней и сформулировать результаты в виде математической модели расчета характеристик БЛД.

Научная новизна работы

– впервые выполнен расчетный анализ серии безлопаточных диффузоров в широком диапазоне конструктивных и газодинамических параметров методами вычислительной газодинамики;

– предложены рекомендации по проектированию БЛД малорасходных центробежных компрессорных ступеней, позволяющие повысить КПД центробежных компрессорных ступеней;

– разработана математическая модель для расчета характеристик безлопаточных диффузоров центробежных компрессорных ступеней в виде аппроксимирующих алгебраических уравнений для использования в новой версии компьютерных программ Метода универсального моделирования – метода оптимального газодинамического проектирования центробежных компрессоров. Разработанная математическая модель, в отличие от предшествующей, позволяет рассчитать характеристики безлопаточных диффузоров с меньшим количеством эмпирических коэффициентов, требующих тщательной идентификации;

– предложена система уравнений расчета параметров потока на выходе из диффузора на основе газодинамических функций. Расчет по предложенным уравнениям исключает необходимость итерационного процесса, который

применяется в существующих версиях Метода универсального моделирования.

Методы исследования

В качестве метода исследования применялся численный эксперимент. При решении поставленных задач применялся CFD-метод – пакеты программ ANSYS CFX и NUMECA Fine/Turbo.

Личный вклад автора состоит в разработке математической модели расчета характеристик безлопаточных диффузоров центробежных компрессорных ступеней в виде аппроксимирующих алгебраических уравнений, исследовании вязкого пространственного движения газа в безлопаточных диффузорах в широком диапазоне конструктивных и газодинамических параметров методами вычислительной газодинамики, выработке рекомендаций по проектированию безлопаточных диффузоров малорасходных центробежных компрессорных ступеней.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту

– результаты исследования структуры потока, а именно, размеры и положение зоны отрыва потока в зависимости от относительной ширины БЛД, угла потока и скоростного коэффициента на входе;

– газодинамические характеристики безлопаточных диффузоров в широком диапазоне конструктивных и газодинамических параметров;

– выработанные рекомендации по проектированию безлопаточных диффузоров малорасходных центробежных компрессорных ступеней;

– разработанная математическая модель для расчета характеристик безлопаточных диффузоров центробежных компрессорных ступеней в виде аппроксимирующих алгебраических уравнений.

Практическая значимость работы

Разработана математическая модель для расчета характеристик БЛД в виде аппроксимирующих алгебраических уравнений для расчета безлопаточных диффузоров центробежных компрессорных ступеней для использования в новой версии компьютерных программ Метода универсального моделирования – метода оптимального газодинамического проектирования центробежных компрессоров.

Разработанная математическая модель и способ расчета на основе газодинамических функций переданы разработчикам 8 версии Метода универсального моделирования (компьютерные программы – «Centrifugal stage performance map calculation» и «Centrifugal compressor performance map calculation»), копия акта

внедрения представлена в приложении.

Достоверность результатов

Достоверность результатов обеспечена тщательной отработкой методики расчетного исследования БЛД центробежных компрессорных ступеней и применением современных вычислительных программ. Результаты расчетов качественно совпадают с экспериментальными данными.

Апробация работы

Результаты работы были представлены на 12 российских и международных конференциях (в т. ч. XVI Международной научно-технической конференции по компрессоростроению, г. Санкт-Петербург, 2014, «9th International Conference on Compressors and their Systems 2015» Британского общества инженеров-механиков, г. Лондон; «International Conference on Numerical Methods in Industrial Processes» Всемирной академии науки, техники и технологии, г. Париж, 2015 г.; XVII Международной научно-технической конференции по компрессоростроению, г. Казань, 2017 г., XI Всероссийском форуме студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и инновации в технических университетах» в 2017 году в СПбПУ, где был диссертанту вручён диплом за лучший доклад на секционном заседании).

Результаты работы удостоены премии конкурса грантов правительства Санкт-Петербурга в 2012, 2013, 2014 годах. Диссертант являлся получателем стипендии Президента на 2014 – 2015 годы и стипендии Правительства РФ аспирантам образовательных организаций высшего образования, соответствующим приоритетным направлениям модернизации и технологического развития экономики России, на 2015 – 2016 годы.

Публикации

По теме диссертации автором опубликовано 17 печатных работ, из них 7 работ в журналах из перечня ВАК («Компрессорная техника и пневматика»), 1 работа в трудах, входящих в международную базу цитирования Scopus.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 162 страницах, диссертация содержит 104 рисунка, 4 таблицы, список использованных источников, включающий 49 наименований, приложение.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, поставлена цель работы, представлена научная новизна, методы исследования, личный вклад, основные положения, выносимые на защиту, практическая значимость работы, достоверность результатов, апробация, публикации, структура и объем диссертации.

В главе 1 представлен анализ исследования безлопаточных диффузоров и рекомендаций по проектированию. Безлопаточные диффузоры были объектами интенсивных исследований отечественных ученых, результаты которых проанализированы и использованы при работе над диссертацией. Первые исследования БЛД выполнены В.Ф. Рисом в середине прошлого столетия. Теоретическое исследование течения и потерь проведены Г.Н. Деном. В Проблемной лаборатории компрессоростроения ЛПИ исследовались БЛД разной формы. В зарубежных публикациях содержится ограниченная информация по безлопаточным диффузорам. Сведений о применении современных возможностей вычислительной газодинамики для исследования и разработки рекомендаций по расчету и проектированию не имеется. Практика математического моделирования БЛД основана на применении полуэмпирических уравнений с большим количеством эмпирических коэффициентов, что усложняет корректную идентификацию модели. Актуальным является исследование методами вычислительной газодинамики БЛД с целью получения информации о структуре и особенностях течения и для аппроксимации данных по эффективности безлопаточных диффузоров взамен сложной математической модели с эмпирическими коэффициентами.

В главе 2 проведен расчетный анализ серии БЛД с относительной шириной b_2 / D_2 =0,014 – 0,100 при углах входа потока α_2 =10 - 90^0, при значениях скоростных коэффициентов λ_{c2} =0,39 - 0,82 и соответствующих им числах Рейнольдса Re_{b2} =87 500 - 1 030 000 по программе ANSYS CFX.

На основании предварительных исследований для расчетов выбрана модель турбулентности k-ε. На примере БЛД шириной b_2 / D_2 =0,057 проведено исследование влияния количества элементов расчетной сетки на результаты расчета. Построены структурированные сетки Н–типа, состоящие из одного блока, с числом элементов 96250, 225216 и 550000. Влияние количества элементов оказалось пренебрежимо малым, дальнейшие расчёты выполнены с использованием расчетной сетки,

состоящей из 225216 элементов. По результатам исследования сектор расчета принят равным 30^0.

Проведен анализ структуры течения в безлопаточных диффузорах. Исследованы условия отрыва, который наступает при нулевом касательном напряжении на стенке, рисунки 1-3.

Рисунок 1 – Линии тока в меридиональной плоскости БЛД с $b_2 / D_2 = 0{,}1$ при $\alpha_2 = 10^0$

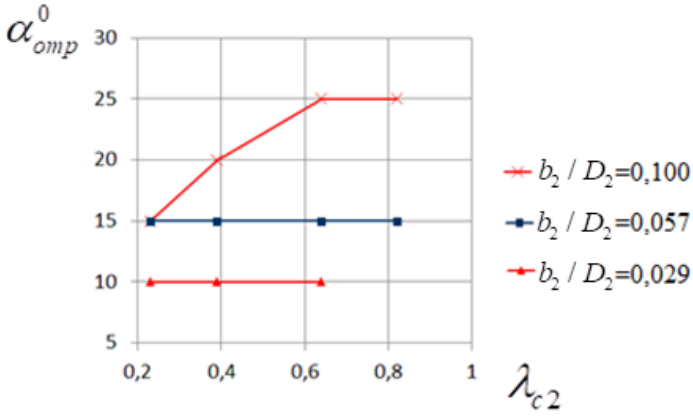

Рисунок 2 – Зависимость углов потока, при которых прекращается безотрывное течение в БЛД, от скоростного коэффициента

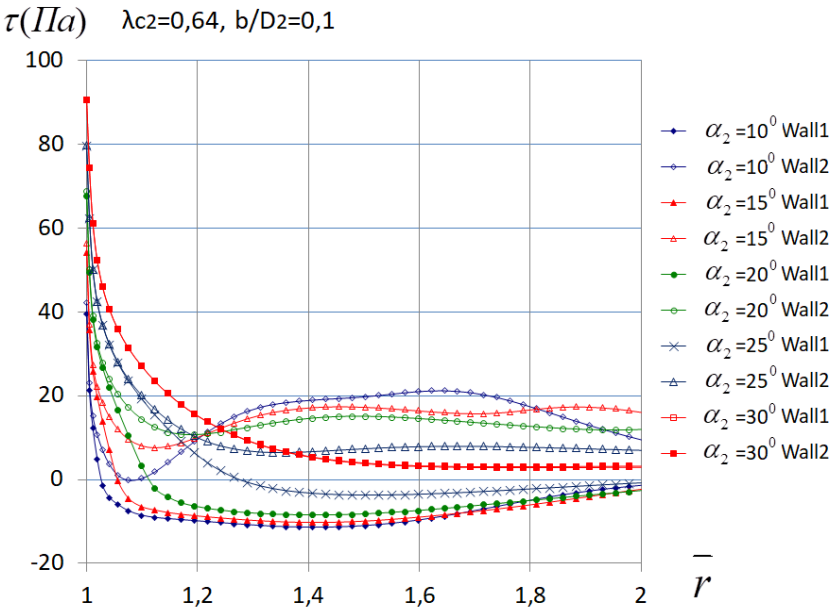

Рисунок 3 – Касательные напряжения на обеих стенках БЛД с $b_2 / D_2 = 0{,}1$ при α_2 =10-30^0, λ_{c2} =0,64, $\bar{r} = r / r_2$

В диффузорах с $b_2 / D_2 \geq$ 0,029 отрывы возникают при α_2 =10-25^0 в зависимости от ширины диффузора. Возникновение отрыва при α_2 =25^0 в широких диффузорах потребовало уточнения существующей рекомендации принимать угол потока на расчетном режиме $\alpha_{2\,расч}$ =20 - 25^0. При относительной ширине более 0,08 нужно выполнить условие $\alpha_{2\,расч} \geq$ 30 - 35^0.

Изучена структура течения в БЛД на разных радиусах (рисунок 4), показаны условия перехода к развитому течению (смыкание пограничных слоев), рисунок 5.

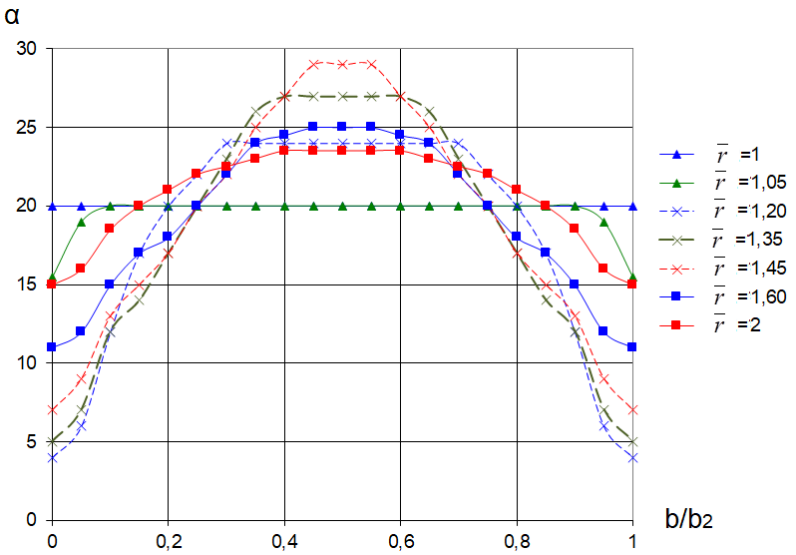

Рисунок 4 – Распределение угла потока по ширине БЛД на разных радиусах,

b_2 / D_2=0,057, λ_{c2}=0,64, Re_{b2}=521000, α_2=20^0

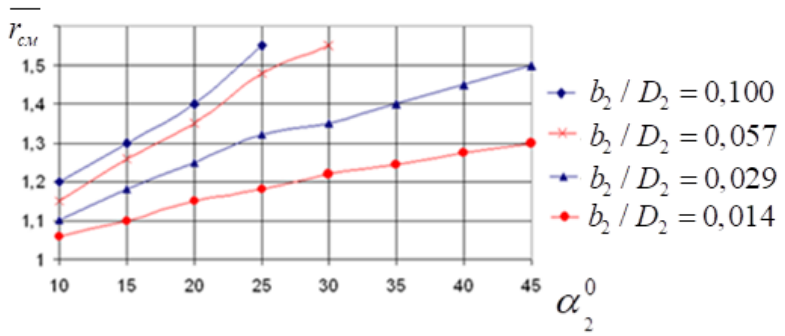

Рисунок 5 – Относительный радиус перехода к развитому течению в зависимости от α_2 для диффузоров с b_2 / D_2 =0,014-0,100

Во всех диффузорах происходит смыкание пограничных слоев на относительном радиусе $\bar{r}_{см}$ = 1,08 - 1,55 в зависимости от относительной ширины и угла α_2. В большей части БЛД при b_2 / D_2 <0,030 течение носит развитый характер.

Удовлетворительное соответствие результатов расчетов и экспериментальных данных С. Роджерса делает возможным переход к изучению газодинамических характеристик БЛД, рисунок 6.

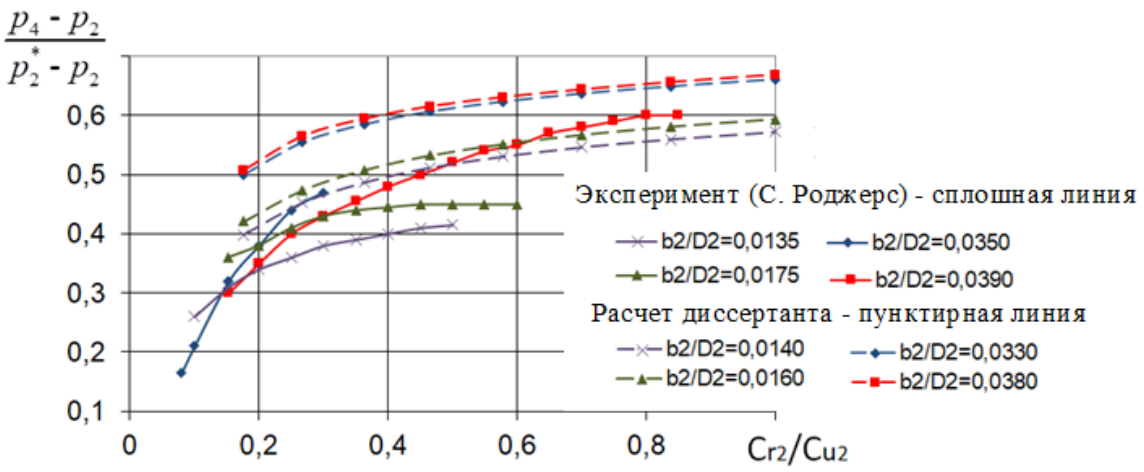

Рисунок 6 – Сравнение экспериментальных и расчетных коэффициентов восстановления давления в безлопаточном диффузоре

Характеристики, рассчитанные по программе ANSYS CFX, выше экспериментальных характеристик. Разница объясняется тем, что экспериментальные данные относятся к ступеням, где в БЛД происходят потери смешения, вызванные возникновением «следа» в рабочем колесе.

Для исследовательских целей и для построения математической модели рассчитаны характеристики БЛД с b_2 / D_2 =0,014 – 0,100 и с $D_4 / D_2 \leq$ 2,0, рисунок 7.

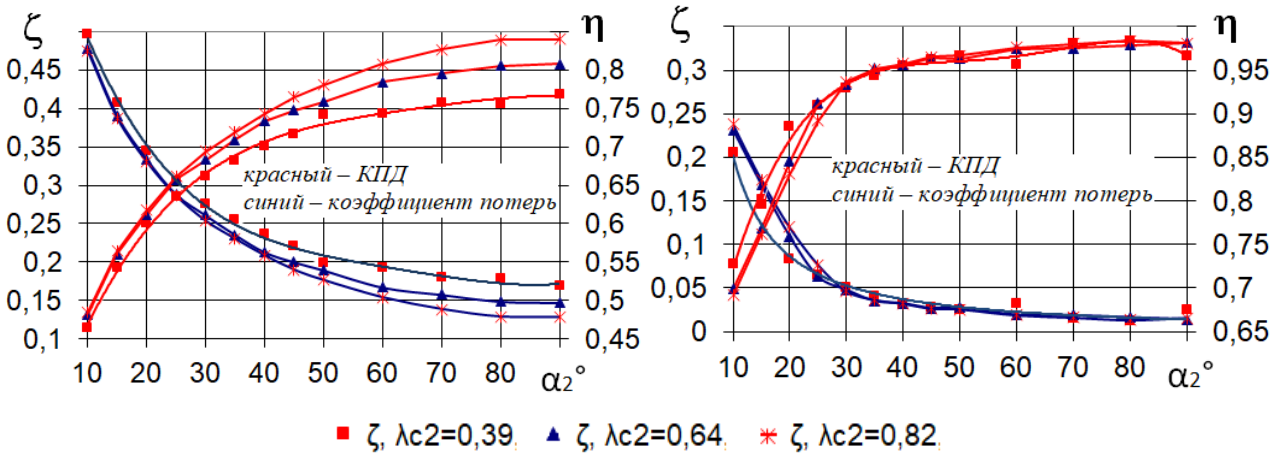

Рисунок 7 – Характеристики БЛД с относительной шириной b_2 / D_2 =0,014 (слева) и b_2 / D_2 =0,1 (справа)

<u>В главе 3</u> проведена оптимизация БЛД высокорасходной центробежной компрессорной ступени с параметрами $\Phi_{расч}$ = 0,105. Сопоставлены характеристики четырех вариантов БЛД, представленные на рисунке 8.

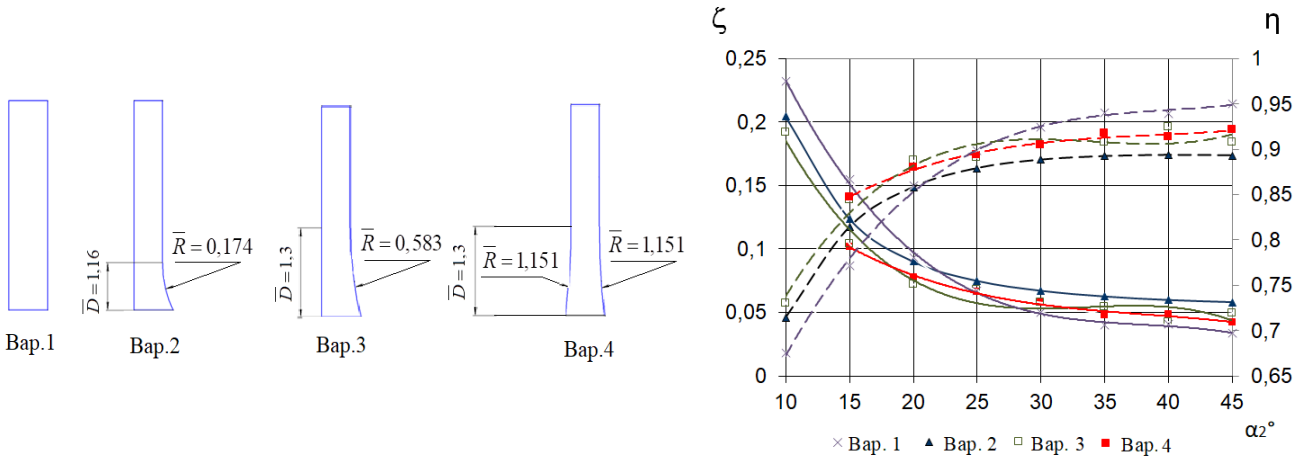

Рисунок 8 – Меридиональная форма и размеры сужения начального участка БЛД (слева), характеристики коэффициента потерь и КПД (справа)

Оптимальный вариант - $b_4 / b_2 =$ 0,731 с радиальной протяженностью начального участка $1,3D_2$ и симметричным сужением (вариант 4). При α_2 =15^0 у оптимизированного БЛД коэффициент потерь уменьшен на 33%.

Выполнена оптимизация размеров безлопаточного диффузора модельной ступени 01.1У ОРК-0,015-0,50-0,30 с $\Phi_{расч}$ =0,015, рисунок 9.

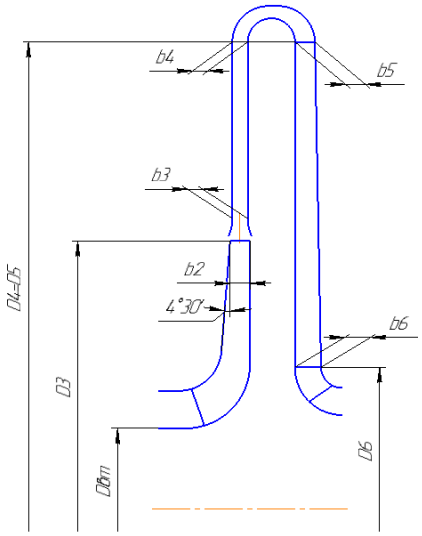

Рисунок 9 – Меридиональный контур модельной ступени 01.1У ОРК-0,015-0,50-0,30 с $\Phi_{расч}$ =0,015

Предложен вариант с суженным начальным участком и последующим расширением безлопаточного диффузора. Характеристики БЛД с разным соотношением размеров показаны на рисунке 10.

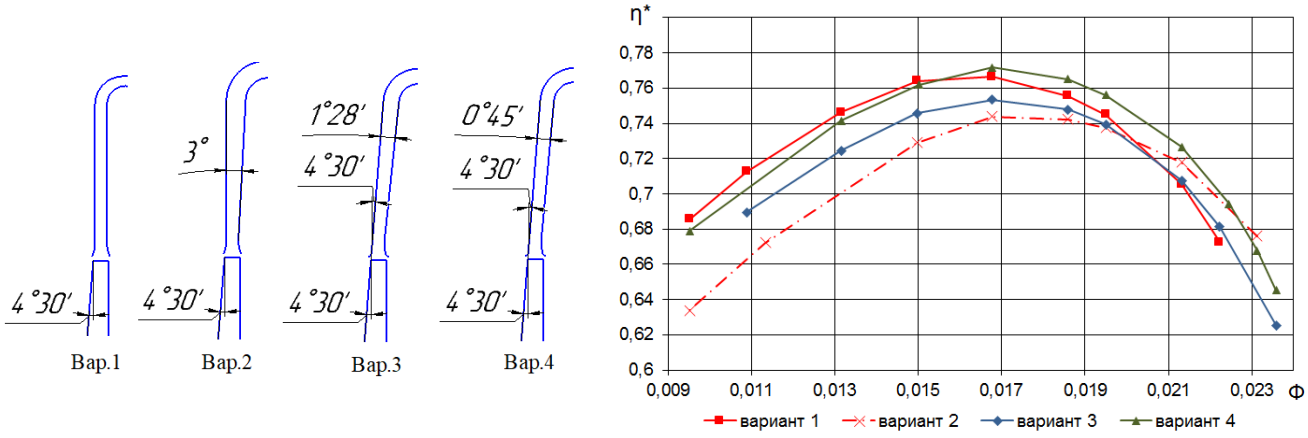

Рисунок 10 – Варианты БЛД в составе малорасходной центробежной компрессорной ступени (слева), КПД ступени в зависимости от Ф (справа)

На режимах, больших расчетного ($\Phi > \Phi_{расч}$), вариант с углом раскрытия стенок основного участка ϑ=0^{0}45’ эффективнее остальных вариантов примерно на 2%, максимальный КПД ступени выше на 0,6%.

<u>В главе 4</u> предложена математическая модель для расчета характеристик безлопаточных диффузоров центробежных компрессорных ступеней в виде аппроксимирующих алгебраических уравнений.

Для расчета параметров потока на выходе из безлопаточных диффузоров достаточно рассчитать коэффициент потерь диффузора ζ и угол потока на выходе α_4. Аппроксимация рассчитанных зависимостей коэффициента потерь и угла выхода потока выполнена с помощью точечного среднеквадратичного приближения.

Аппроксимирующая зависимость для коэффициента потерь $\zeta_д = f(\bar{b}_2, \bar{D}_4, \alpha_2, \lambda_{c2}, \mathrm{Re}, \bar{k}_ш)$ в общем виде представляется следующим образом: $\zeta_д = \dfrac{a \cdot \alpha^b \cdot K_{D4}}{K_{\mathrm{Re}, k_ш}}$. Каждый член формулы – это набор алгебраических уравнений. На первом этапе выполнена аппроксимация влияния b_2 / D_2, α_2, λ_{c2} при фиксированном значении относительной длины диффузора D_4 / D_2=1,6:

$$\zeta = A \cdot \alpha^b;$$

$$A = c \cdot (b_2 / D_2)^2 + d \cdot (b_2 / D_2) + e;$$

$$c = 2312,7 \cdot \lambda_{c2}^2 - 2234,9 \cdot \lambda_{c2} + 830,63;$$

$$d = -207,36 \cdot \lambda_{c2}^2 + 266,98 \cdot \lambda_{c2} - 88,333;$$

$$e = 6,4922 \cdot \lambda_{c2}^2 - 6,9342 \cdot \lambda_{c2} + 3,5363;$$

$$b = f \cdot (b_2 / D_2)^2 + g \cdot (b_2 / D_2) + h;$$

$$f = -124,32 \cdot \lambda_{c2}^2 + 186,87 \cdot \lambda_{c2} - 17,242;$$

$$g = 19,241 \cdot \lambda_{c2}^2 - 29,915 \cdot \lambda_{c2} - 3,3289;$$

$$h = -0,6906 \cdot \lambda_{c2}^2 + 0,6577 \cdot \lambda_{c2} - 0,527.$$

На втором этапе вводится поправка на влияние относительной длины БЛД K_{D4}:

$$K_{D4} = j \cdot (D_4 / D_2)^2 + k \cdot (D_4 / D_2) + l\,;$$

$$j = m \cdot (b_2 / D_2)^2 + n \cdot (b_2 / D_2) + p\,;$$

$$m = 3455,2 \cdot \lambda_{c2}^2 - 3513,1 \cdot \lambda_{c2} + 669,16\,;$$

$$n = -443,08 \cdot \lambda_{c2}^2 + 427,91 \cdot \lambda_{c2} - 74,406\,;$$

$$p = 8,756 \cdot \lambda_{c2}^2 - 8,6285 \cdot \lambda_{c2} + 0,5291;$$

$$k = r \cdot (b_2 / D_2)^2 + s \cdot (b_2 / D_2) + t\,;$$

$$r = -12860 \cdot \lambda_{c2}^2 + 13344 \cdot \lambda_{c2} - 2726,1\,;$$

$$s = 1633,8 \cdot \lambda_{c2}^2 - 1613,6 \cdot \lambda_{c2} + 306,13\,;$$

$$t = -31,076 \cdot \lambda_{c2}^2 + 31,02 \cdot \lambda_{c2} - 1,7055\,;$$

$$l = u \cdot (b_2 / D_2)^2 + v \cdot (b_2 / D_2) + w;$$

$$u = 11401 \cdot \lambda_{c2}^2 - 11984 \cdot \lambda_{c2} + 2574,4\,;$$

$$v = -1439,3 \cdot \lambda_{c2}^2 + 1440,6 \cdot \lambda_{c2} - 290,69\,;$$

$$w = 26,521 \cdot \lambda_{c2}^2 - 26,682 \cdot \lambda_{c2} + 2,2384.$$

Поправки на влияние критерия Рейнольдса и относительной шероховатости сделаны на основании известных уравнений гидроаэродинамики:

$$K_{\mathrm{Re}} = \frac{\lambda_{расч}}{\lambda_{мм}} = \frac{0,0032 + \dfrac{0,221}{\left(8,73 \cdot 10^6 \cdot \bar{b}_2\right)^{0,237}}}{0,0032 + \dfrac{0,221}{\mathrm{Re}_b^{0,237}}};$$

$$K_{ш} = \frac{\lambda_{расч}}{\lambda_{мм}} = \left(0,0032 + \frac{0,221}{\left(8,73 \cdot 10^6 \cdot \bar{b}_2\right)^{0,237}}\right)\left(2\lg\frac{2}{\bar{k}_{ш}} + 1,74\right)^2.$$

Аппроксимация расчетов угла выхода потока выполнена тем же методом, что и для коэффициента потерь:

$$\alpha_4 - \alpha_2 = a \cdot \alpha_2^2 + b \cdot \alpha_2 + c;$$

$$a = d \cdot \lambda_{c2} + e;$$

$$d = 0,0013 \ln(b_2 / D_2) + 0,01;$$

$$e = -0,0021;$$

$$b = f \cdot \lambda_{c2} + g;$$

$$f = -0,13 \ln(b_2 / D_2) - 0,9844;$$

$$g = 0,0563 \ln(b_2 / D_2) + 0,3345;$$

$$c = h \cdot \lambda_{c2} + i;$$

$$h = 2,208 \ln(b_2 / D_2) + 9,7999;$$

$$i = -5,137 \ln(b_2 / D_2) - 13,136.$$

Система из 32 алгебраических уравнений обеспечивает величина достоверности аппроксимации $R^2 = 1 - \frac{\Sigma(\zeta_{расч} - \zeta_{аппр})^2}{\Sigma(\zeta_{аппр} - \zeta_{расч_ср_знач})^2}$ >0,93, рисунок 11.

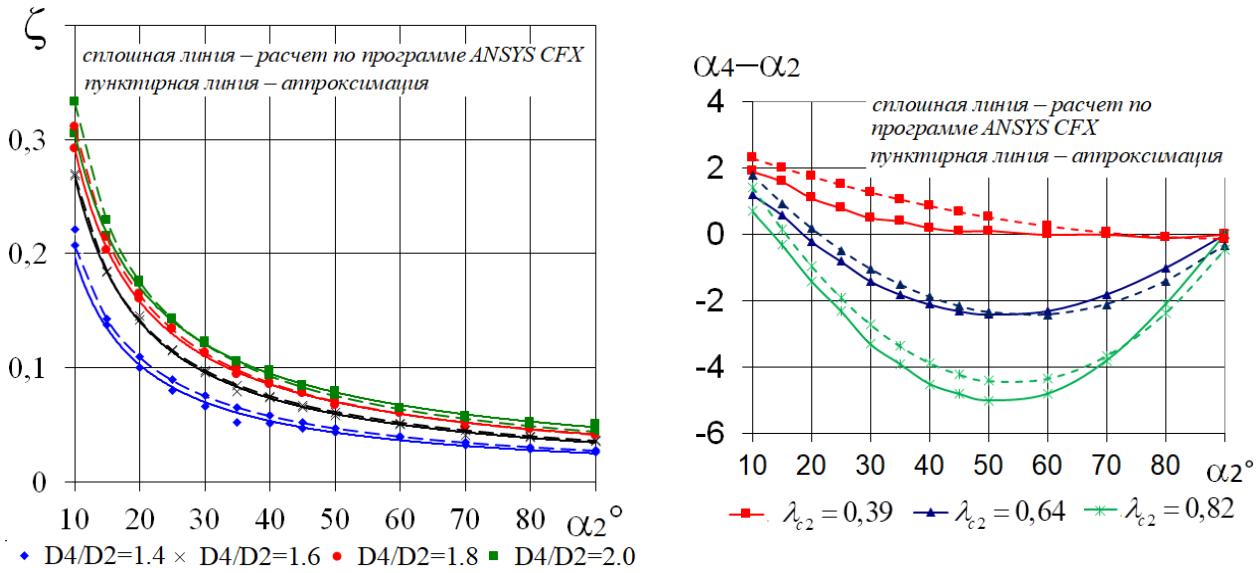

Рисунок 11 – Сравнение расчетных и аппроксимирующих значений коэффициентов потерь в зависимости от α_2 при b_2 / D_2 =0,043, λ_{c2}=0,64 (слева) и сравнение значений $\alpha_4 - \alpha_2$ в зависимости от α_2 при b_2 / D_2 =0,057 (справа)

Предложена система уравнений расчета параметров потока на выходе из диффузора на основе газодинамических функций. Расчет по предложенным

уравнениям исключает необходимость итерационного процесса, который применяется в существующих версиях Метода универсального моделирования.

<u>В заключении</u> сформулированы основные результаты работы:

1. Проведен анализ российских и зарубежных исследований безлопаточных диффузоров центробежных компрессорных ступеней. Показана актуальность исследования методами вычислительной газодинамики с целью получения информации о структуре и особенностях течения и для аппроксимации данных по эффективности безлопаточных диффузоров взамен сложной математической модели.

2. Впервые выполнен расчетный анализ серии безлопаточных диффузоров с относительной шириной b_2 / D_2 =0,014 – 0,100 при углах входа потока α_2 =10 - 90^0, при значениях скоростных коэффициентов λ_{c2} =0,39 - 0,82 и соответствующих им числах Рейнольдса Re_{b2} =87 500-1 030 000 по программе ANSYS CFX. На основании предварительных исследований выбрана модель турбулентности k-ε, расчетные сетки структурированные Н-типа, состоящие из одного блока, с числом элементов от 120 500 до 370 000 в зависимости от относительной ширины диффузора. Исследовано влияние угла сектора расчета на характеристики безлопаточных диффузоров. По результатам исследования сектор расчета принят равным 30^0. Результаты расчетов представлены в виде зависимостей КПД, коэффициента потерь и угла выхода потока от угла потока на входе. Расчеты КПД и коэффициента потерь выполнены по уравнениям политропного процесса, так как упрощенный расчет по средней плотности дает значительные ошибки при высоких числах Маха.

3. Проведенный анализ структуры течения в БЛД показал:

– рассчитанные эпюры скоростей практически совпадают с результатами экспериментального исследования изолированного безлопаточного диффузора, проведенного в США В. Янсеном;

– линии тока в меридиональной плоскости диффузоров с b_2 / D_2 <0,029 показали отсутствие отрывов потока даже при минимальном угле потока 10^0;

– анализ касательного напряжения τ показал, что отрыв потока наступает при нулевом касательном напряжении, как и следует из теории пограничного слоя. В диффузорах с $b_2 / D_2 \geq 0{,}029$ отрывы возникают при углах потока на входе от 10 - 25^0 в зависимости от ширины диффузора. Возникновение отрыва при угле потока 25^0 в

широких диффузорах потребовало уточнения существующей рекомендации. При относительной ширине более 0,08 нужно выполнить условие $\alpha_{2\,расч} \geq 30-35^0$;

– во всех диффузорах происходит смыкание пограничных слоев. В зависимости от относительной ширины и угла потока на входе это происходит на относительном радиусе от 1,08 до 1,55;

– эффективность БЛД с гидравлически гладкой поверхностью при одновременном увеличении чисел Маха и Рейнольдса увеличивается, что особенно заметно у более узких диффузоров, где больше потери трения;

– сопоставлены характеристики диффузоров с радиальной протяженностью D_4 / D_2 =1,4, 1,6, 1,8, 2,0. С ростом относительной длины БЛД коэффициент потерь закономерно увеличивается;

– CFD-расчеты показали отсутствие режима автомодельности по критерию Рейнольдса даже при наименьшей относительной шероховатости $\bar{\kappa}_ш = \kappa_ш / 2b_2$ =5,5E-5.

4. Сопоставление рассчитанных коэффициентов восстановления с экспериментальными данными из монографии Н. Кампсти показали удовлетворительное соответствие с учетом того, что при экспериментах имеет место негативное влияние неравномерности потока на выходе из рабочего колеса.

5. Проведена оптимизация безлопаточного диффузора высокорасходной центробежной компрессорной ступени с параметрами $\Phi_{расч}$= 0,105. Оптимальный вариант b_4 / b_2= 0,731 с радиальной протяженностью начального участка $1,3D_2$. При угле потока α_2 =15^0 у оптимизированного безлопаточного диффузора коэффициент потерь уменьшен на 33%.

6. Проведенный анализ структуры течения показал отсутствие отрыва потока в диффузорах с относительной шириной менее 0,029, что делает возможным повышение коэффициента восстановления за счет небольшого увеличения ширины диффузора по радиусу. Исследование показало, что для БЛД с b_2 / D_2 =0,014 наиболее высокий КПД достигается при конических ограничивающих поверхностях с углом раскрытия ϑ = 2^0. При b_2 / D_2 =0,026 оптимальное значение угла раскрытия оказалось равным ϑ =3^0.

7. Выполнена оптимизация безлопаточного диффузора в составе малорасходной центробежной компрессорной ступени с $\Phi_{расч}$= 0,015. Вариант с

суженным начальным участком b_3 / b_2 =0,77 и углом раскрытия стенок основного участка ϑ =$0^0$45’ повысил максимальный КПД ступени на 0,6%.

На конструкцию диффузора подана заявка № 2017147064 на выдачу патента РФ на полезную модель «Безлопаточный диффузор малорасходной центробежной компрессорной ступени» с датой приоритета от 29.12.2017 г.

8. Разработана математическая модель для расчета характеристик безлопаточных диффузоров центробежных компрессорных ступеней в виде аппроксимирующих алгебраических уравнений для использования в новой версии компьютерных программ метода оптимального газодинамического проектирования центробежных компрессоров. Разработанная модель, в отличие от предшествующей, позволяет рассчитать характеристики безлопаточного диффузора с меньшим количеством эмпирических коэффициентов, требующих тщательной идентификации.

Для расчета параметров потока на выходе из БЛД достаточно рассчитать коэффициент потерь диффузора и угол потока на выходе. Для применения в 8-ой версии Метода универсального моделирования предложена аппроксимация с помощью точечного среднеквадратичного приближения. Система из 32 алгебраических уравнений обеспечивает величина достоверности аппроксимации R^2>0,93.

9. Предложена система уравнений расчета параметров потока на выходе из диффузора на основе газодинамических функций. Расчет по предложенным уравнениям исключает необходимость итерационного процесса.

10. Разработанная математическая модель и способ расчета на основе газодинамических функций переданы разработчикам 8-ой версии Метода универсального моделирования (компьютерные программы – «Centrifugal stage performance map calculation» и «Centrifugal compressor performance map calculation»), что подтверждается актом внедрения. Главное достоинство новой модели – уменьшение количества эмпирических коэффициентов, подлежащих идентификации. Пробные расчеты показали работоспособность и корректность предложенной математической модели безлопаточного диффузора.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Галеркин, Ю.Б.** Совершенствование методов расчета безлопаточных диффузоров центробежных компрессорных ступеней на основе вычислительных экспериментов. Часть 1. [Текст] / Ю.Б. Галеркин, О.А. Соловьёва // Компрессорная техника и пневматика. – 2014. - № 3. – С. 35-41.

2. **Галеркин, Ю.Б.** Совершенствование методов расчета безлопаточных диффузоров центробежных компрессорных ступеней на основе вычислительных экспериментов. Часть 2. [Текст] / Ю.Б. Галеркин, О.А. Соловьёва // Компрессорная техника и пневматика. – 2014. - № 4. – С. 15-21.

3. **Соловьёва, О.А.** Расчетный анализ безлопаточного диффузора малорасходной центробежной компрессорной ступени. [Текст] / О.А. Соловьёва, Ю.Б. Галеркин // Компрессорная техника и пневматика. – 2017. - № 3. – С. 10-13.

4. **Соловьёва, О.А.** Выбор оптимальных соотношений размеров безлопаточного диффузора малорасходной центробежной компрессорной ступени. [Текст] / О.А. Соловьёва, Ю.Б. Галеркин // Компрессорная техника и пневматика. – 2017. - № 5. – С. 11-15.

Доклады на международных конференциях

1. **Галеркин, Ю.Б.** Оптимизация безлопаточного диффузора малорасходной центробежной компрессорной ступени. [Текст] / Ю.Б. Галеркин, О.А. Соловьёва // XVII Международная научно-техническая конференция. – Казань. – 2017. - Май. – С. 170-175

2. **Галеркин, Ю.Б.** Особенности работы безлопаточных диффузоров центробежных компрессорных ступеней с разной меридиональной формой. [Текст] / Ю.Б. Галеркин, А.А. Дроздов, О.А. Соловьёва // Труды XVI Международной научно-технической конференции по компрессоростроению.–СПб. –Том 1. – 2014. С. 171-178.

3. **Galerkin, Y.** Flow behavior and performances of centrifugal compressor stage vaneless diffusers. [Electronic] / Y. Galerkin, O. Solovieva // International Conference on Numerical Methods in Industrial Processes. World Academy of science, engineering and technology. Paris 2015. - Vol:9 No:01 2015. – №. 219.

4. **Galerkin, Y.** Numerical study of centrifugal compressor stage vaneless diffusers. [Electronic]/ Y. Galerkin, K. Soldatova, O. Solovieva // Conference “Compressors and their Systems”. – London. – 2015. - DOI: 10.1088/1757-899X/90/1/012048.