



ПОЛИТЕХ

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

На правах рукописи

Иванов Вячеслав Михайлович

**Повышение качества численного моделирования и
математической модели напора малорасходных ступеней
центробежных компрессоров**

Специальность: 05.02.23 – Стандартизация и управление
качеством продукции

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2021

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Научный руководитель: **Кожухов Юрий Владимирович**
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Ивахненко Александр Геннадьевич**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»

Ваняшов Александр Дмитриевич
кандидат технических наук, доцент кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология», ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (Самарский университет)

Защита состоится «16» октября 2021 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета У.05.02.23 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, корпус 4, аудитория 311).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (<https://library.spbstu.ru/ru/>).

Автореферат розослан «09» сентября 2021 года.

Ученый секретарь диссертационного совета У.05.02.23,
кандидат технических наук  Газизулина А.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В диссертации приведены результаты, обеспечивающие перевод проектных газодинамических расчетов малорасходных ступеней центробежных компрессоров (ЦК) с научно-исследовательского в инженерный класс задач за счет подходов стандартизации и проведенной унификации численного эксперимента и повышения качества математической модели напора.

Центробежные многоступенчатые компрессоры промышленного назначения широко применяются во многих отраслях промышленности и энергетики. Последние ступени многоступенчатых центробежных компрессоров, как правило, являются малорасходными и сверхмалорасходными с расчетным условным коэффициентом расхода $\Phi_r < 0,02$. В малорасходных ступенях, имеющих малые относительные ширины каналов проточной части и, как следствие, малые гидравлические размеры, возрастают относительные значения комплекса потерь. Экспериментальные исследования малорасходных ступеней сложны, трудоемки и дорогостоящи. Использование современных численных методов ограничено из-за необходимости обеспечения квалифицированными расчетчиками – пользователями соответствующих пакетов программ, приобретением коммерческой лицензии на программный продукт и вычислительного оборудования, арендой вычислительных мощностей и т.д. Вместе с тем для проектирования малорасходных компрессорных ступеней продолжается использование классических зависимостей, разработанных для среднерасходных ступеней, что не обеспечивает точность расчетов. При решении этой задачи для обеспечения необходимой степени точности применяются исследовательские подходы и методы.

Актуальность темы исследования состоит в решении проблемы оптимального предварительного проектирования рабочих колес малорасходных ступеней центробежного компрессора, обеспечивающего заданные требования технического задания по напору без применения исследовательских подходов и методов. Объектом исследования являются малорасходные ступени центробежных компрессоров промышленного назначения.

Предметом исследования является стандартизация и унификация проектных газодинамических расчетов по определению напора малорасходных рабочих колес и ступеней центробежных компрессоров.

Научная проблема состоит в повышении качества решения задач по газодинамическому проектированию малорасходных рабочих колес и ступеней центробежных компрессоров и переводу данных задач из класса научных в класс проектных.

Степень разработанности темы. Проведенный анализ литературы показал, что в настоящее время отсутствуют простые и надежные инженерные методики для расчета коэффициента теоретического напора и комплекса потерь трения и протечек для малорасходных ступеней. Указанные особенности течения в малорасходных ступенях, вызванные влиянием вязкости, не позволяют использовать методы расчета невязкого потока.

Методы расчета вязкого пограничного слоя достаточно сложны и ресурсоемки, поэтому мало распространены в инженерной практике расчетов. При этом ряд научных публикаций показывают эффективность использования вычислительных методов при проектировании и исследовании центробежных компрессоров.

Цели и задачи диссертационного исследования. Целью является стандартизация проектных газодинамических расчетов и разработка математической модели для определения коэффициентов теоретического и внутреннего напора малорасходных рабочих колес и ступеней центробежных компрессоров соответственно. Таким образом, обеспечивается перевод проектных газодинамических расчетов малорасходных ступеней центробежных компрессоров с научно-исследовательского в инженерный класс задач за счет подходов стандартизации и проведенной унификации численного эксперимента и разработки математической модели для определения коэффициентов теоретического и внутреннего напора малорасходных рабочих колес и ступеней центробежных компрессоров соответственно.

Для достижения цели исследования требуется решить следующие основные задачи: разработка численных моделей малорасходных ступеней центробежного компрессора и проведение моделирования рабочего процесса при помощи методов

вычислительной газодинамики; проведение стандартизации и унификации численного эксперимента; повышение качества математической модели в виде обобщающей зависимости для определения коэффициента теоретического напора и комплекса потерь трения и протечек на расчетном режиме и определения внутреннего напора ступени.

Научная новизна работы заключается в разработке унифицированного подхода к численному моделированию рабочего процесса и повышении качества математической модели для определения коэффициентов теоретического и внутреннего напора при решении задач газодинамического проектирования малорасходных рабочих колес и ступеней центробежного компрессора.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в повышении качества проектных расчетов центробежных компрессоров за счет:

1. Разработки математической модели, которая позволила перевести класс задач по газодинамическому расчету коэффициентов теоретического и внутреннего напоров малорасходных рабочих колес и ступеней соответственно с научного уровня на инженерный без уменьшения точности расчетов. Это позволило снизить стоимость проектирования и повысить доступность решения данного класса задач для производителей компрессоров.
2. Повышения быстродействия проектных расчетов на основе применения аналитических зависимостей, реализованных в разработанной программе для ЭВМ, и упрощенных унифицированных численных моделей для расчета вязкого потока в программном комплексе Ansys CFX, что позволило:
 - сократить время проведения вариантных проектных расчетов на порядок, в зависимости от необходимого объема расчетов методами вычислительной газодинамики;
 - исключить использование вычислительных ресурсов суперкомпьютера требуемые для проведения вариантных проектных расчетов методами вычислительной газодинамики;
 - снизить стоимость процедур расчета и соответствующих трудозатрат.

3. Обеспечения достоверности моделирования вязкого трехмерного потока в малорасходных ступенях центробежных компрессоров.

4. Унификации численного моделирования рабочего процесса методами вычислительной газодинамики малорасходных рабочих колес и ступеней центробежного компрессора.

Методология и методы исследования: в работе использованы основные положения теории турбомашин для проектирования рабочих колес центробежных компрессоров, в частности использовалась одномерная методика проектирования ЛПИ-СПбПУ. Для анализа рабочего процесса в проточных частях использовались методы вычислительной газодинамики. Расчеты проводились с помощью вычислительного кластера суперкомпьютерного центра «Политехнический».

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Модель стандартизации процесса численного моделирования малорасходных ступеней центробежных компрессоров.

2. Унификация проектных газодинамических расчетов методами вычислительной газодинамики для малорасходных рабочих колес и ступеней центробежных компрессоров.

3. Повышение качества численного моделирования вязкого трехмерного потока методами вычислительной газодинамики в малорасходных ступенях центробежных компрессоров, обеспечивающее необходимую для проектных расчетов точность.

4. Повышение качества математической модели определения коэффициента теоретического напора на расчётном режиме малорасходных рабочих колес ЦК при условии безударного обтекания на входе, повышающая качество проектных расчетов до требуемого уровня. Математическая модель разработана на основе прошедших валидацию и верификацию расчетов вязкого трехмерного потока методами вычислительной газодинамики.

5. Повышение качества математической модели определения комплекса потерь дискового трения и протечек в малорасходных ступенях ЦК на основе обобщения результатов численного моделирования рабочего процесса по стандартизованной детальной модели методами вычислительной газодинамики, повышающая качество проектных расчетов до требуемого уровня.

6. Повышение качества математической модели определения внутреннего напора малорасходных ступеней центробежных компрессоров на расчетном режиме на основе разработанных математических моделей определения коэффициента теоретического напора и комплекса потерь дискового трения и протечек, повышающая качество проектных расчетов до требуемого уровня.

Личный вклад автора состоит в:

- разработке модели стандартизации и проекта стандарта организации процесса численного моделирования малорасходных ступеней центробежных компрессоров;

- разработке унифицированных расчетных моделей и проведении моделирования с уточнением методики численного моделирования для малорасходных ступеней ЦК с валидацией результатов, получении банка численных данных для анализа и создания новых математических моделей;

- создание математической модели, обеспечивающей высокое качество проектирования, для определения коэффициента теоретического напора и коэффициента внутреннего напора для малорасходных рабочих колёс и ступеней центробежного компрессора соответственно.

Достоверность и апробация результатов исследования: достоверность результатов моделирования напорных характеристик на расчетном режиме малорасходных ступеней центробежных компрессоров предлагаемым в данной работе методом подтверждается сравнением рассчитанных и экспериментальных характеристик ряда малорасходных ступеней, охватывающими широкий диапазон геометрических и газодинамических параметров.

Результаты исследования апробированы на следующих мероприятиях: ежегодная научно-техническая конференция молодых специалистов (25-26 октября 2018 года, г. Пермь, ПАО «НПО «Искра»); 9-й международная научно-техническая конференция «Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства» (26-28 февраля 2019 года, г. Омск, ФГБОУ ВО «ОмГТУ»); “International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (19-20 ноября 2018 года и 19-20 ноября 2019 года, г. Санкт-Петербург, ФГАОУ ВО СПбПУ); Международный симпозиум «Компрессоры и компрессорное оборудование» (28-29 мая 2019 года, г. Санкт-

Петербург, ФГАОУ ВО СПбПУ); 10-я международная научно-техническая конференция «Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства» (26-29 февраля 2020 года, г. Омск, ФГБОУ ВО «ОмГТУ»); Конференция SES-2020: Sustainable Energy Systems: Innovative Perspectives. Saint-Petersburg, Russia. Университет аэрокосмического приборостроения (Санкт-Петербург), Московский строительный университет (Москва), Amity Business School (Индия), 29-30 October 2020.

Публикации и результаты интеллектуальной деятельности: имеется 11 публикаций в научных изданиях из международных баз цитирования Scopus и Web Of Science, 8 в журналах из Перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень ВАК), 5 Свидетельств о регистрации программы для ЭВМ. По теме диссертации автором опубликовано 9 работ, в том числе 7 в изданиях Перечня ВАК, 2 в изданиях, индексируемых МБЦ Scopus, одно Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Объём и структура диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка условных обозначений и сокращений, списка использованных источников из 97 наименований и восьми приложений. Работа изложена на 204 страницах, содержит 117 рисунок и 15 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведены общие сведения о направлении и характере научной работы. Произведена постановка цели и задач исследования.

В первой главе рассмотрено современное состояние проблемы обеспечения качества численного моделирования и математических моделей при проектировании сложных конструкций. Определены проблемы численного моделирования. Представлена структурная схема, определяющая качество расчетных задач (рисунок 1).

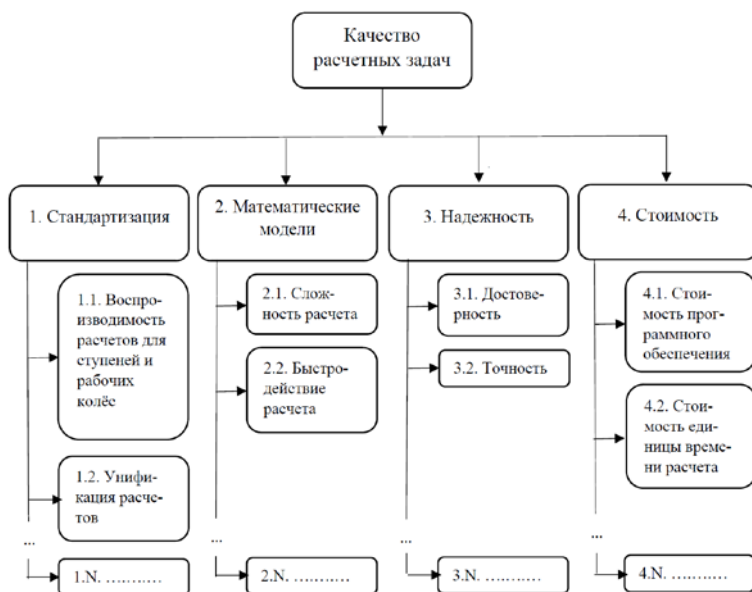


Рисунок 1 – Структура качества расчетных задач

Приведены подходы к стандартизации и унификации проектных расчетов. Современное состояние математического моделирования сложных конструкций рассмотрено на примере моделирования напора малорасходных ступеней центробежных компрессоров. Отличие исследовательской и проектной деятельности приведено в таблице 1.

Таблица 1 – Отличие исследовательской и проектной деятельности

пп	Исследовательская деятельность	Проектная деятельность
1	Создание нового знания	Создание продукта
2	Доказуемость	Реализуемость
3	Ключевое: объективизация результата	Ключевое: временные рамки
4	Не предполагает создание заранее планируемого конечного продукта	Разработка и создание конечного продукта
5	Создание нового интеллектуального продукта	Решение практической проблемы
6	Процесс поиска неизвестного, получение нового знания	Подготовка конкретного варианта изменения объектов

Во второй главе рассмотрен вопрос стандартизация процесса численного моделирования малорасходных ступеней центробежных компрессоров. Определены 4 задачи стандартизации и система из более 10 показателей качества моделирования. Разработан Дом качества процесса численного моделирования малорасходных ступеней центробежных компрессоров с применением 10 балльной шкалы оценки (1 – минимальный балл, 10 – максимальный балл) (таблица 2).

Таблица 2 – Дом качества процесса численного моделирования малорасходных ступеней центробежных компрессоров

Показатели (заданы потребителями процесса моделирования)		Характеристики/ресурсы процесса проектирования				
		Значимость показателя	опыт разработчика	уровень программного обеспечения	возможности компьютерного центра	уровень стандартизации процесса проектирования
		8	10	10	10	1
1	точность расчета	10	9	3	3	9
2	соответствие расчетного режима оптимальному	10	9	1	1	9
3	вид расчетной сетки	8	3	9	9	9
4	степень сеточной независимости	10	1	9	9	9
5	схема дискретизации	8	3	3	1	3
6	количество итераций	5	9	3	3	9
7	критерии сходимости	10	9	1	1	9
8	характеристики вычислительных ресурсов	8	-	9	9	-
9	время расчета	8	3	9	9	9
10	тип интерфейса соединения расчетных областей	9	9	3	1	9
11	модель турбулентности вязкого потока	10	9	3	3	9
12	степень неопределенности	8	9	1	1	9
13	стоимость построения численной модели	10	9	9	9	9
Расчет веса характеристики/ресурса процесса проектирования			730	550	516	906

Разработана модель стандартизации процесса численного моделирования малорасходных ступеней центробежных компрессоров (рисунок 2).

Приведены результаты вязкого трехмерного моделирования в ступенях. Для моделирования в комплексе вычислительной газодинамики Ansys CFX 18.0 разработаны стандартизованные трехмерные расчетные области детальной численной модели ступени (см. рисунок 3, а) и упрощенной численной модели рабочего колеса (см. рисунок 3, б). Детальная модель состоит из всех основных элементов проточной части модельной ступени, а именно: рабочего колеса (РК), безлопаточного диффузора (БЛД), поворотного колена (ПК), обратно-направляющего аппарата (ОНА)

и сконструированных осевых зазоров (ОЗ) и лабиринтных уплотнений (ЛУ).

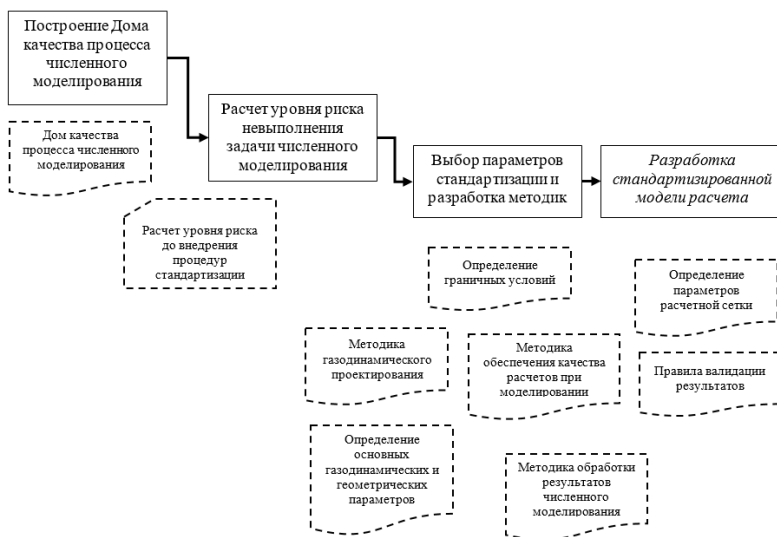


Рисунок 2 – Модель стандартизации процесса численного моделирования малорасходных ступеней центробежных компрессоров

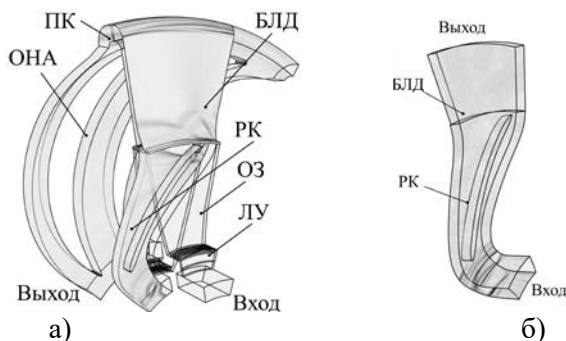


Рисунок 3 – Вид трехмерных расчетных областей стандартизованной детальной численной модели ступени (а) и стандартизованной упрощенной численной модели рабочего колеса (б)

В открытых источниках подробно приводятся методики моделирования для среднерасходных ступеней и отсутствуют подобные данные для моделирования работы малорасходных ступеней. Поэтому произведена разработка и отработка стандартизованной методики численного моделирования для малорасходных рабочих колес и ступеней центробежных компрессоров.

Произведена оценка применимости упрощенной численной модели в составе рабочего колеса для параметрического исследования. Определено, что влияние на газодинамические характеристики рабочего колеса лабиринтного уплотнения покрывного диска заключается только в смещении по характеристике и не влияет на количественные показатели в идентичных точках по расходу. На основе полученных данных получена зависимость для коррекции коэффициента теоретического напора с учетом сдвига по расходу в упрощенной численной модели:

$$\psi_{\tau}^{\text{пр}} = 1 - \frac{1 + \beta_{\text{пр}}}{\left(\rho_2^{\text{п.м.}} / \rho_2\right)} (1 - \psi_{\tau}), \quad (1)$$

где $\rho_2^{\text{п.м.}} / \rho_2 = 0,985$ – поправка к отношению плотностей.

Третья глава включает в себя результаты параметрического исследования и априорного анализа данных с целью выявления связей между газодинамическими и геометрическими параметрами ступени.

Для проведения статистического априорного анализа и вывода обобщающих зависимостей было спроектировано и промоделировано по упрощенной расчетной модели 1620 модельных малорасходных рабочих колес центробежных компрессоров на следующий диапазон геометрических и газодинамических параметров: расчетный условный коэффициент расхода $\Phi_p = 0,004 \div 0,020$; условное число Маха $M_u = 0,5 \div 0,8$; отношение высоты лопатки на входе и выходе $\bar{b}_1 / \bar{b}_2 = 0,5 \div 1,0$; втулочное отношение $\bar{D}_{\text{вт}} = 0,3 \div 0,5$; число лопаток $z = 12 \div 20$; угол выхода лопаток $\beta_{\text{л}2} = 30^\circ \div 50^\circ$.

Получено выражение для определения фактора диффузорности F_D :

$$F_D = (0,012 \cdot z + 0,084 \cdot M_u + 0,124 \cdot \beta_{л2(в\text{ рад.})} + 0,084 \cdot \bar{D}_{от} - 1,223) \cdot K'_{гд} + 0,77, \quad (2)$$

где $K'_{гд}$ - коэффициент геометрической диффузорности с учетом стеснения.

Получено выражение для определения потоковой диффузорности n_w :

$$n_w = (0,054 \times \beta_{л2(в\text{ рад.})} + 0,381 \times z + 0,310) \times F_D^2 + (0,318 \times \beta_{л2(в\text{ рад.})} - 0,359 \times z + 2,576) \times F_D + (-0,410 \times \beta_{л2(в\text{ рад.})} + 0,096 \times z + 0,287) \quad (3)$$

Имея значение относительной скорости на входе w_1 , определяется величина относительной скорости на выходе $w_2 = w_1 / n_w$, и становится возможным определение коэффициента теоретического напора по формуле:

$$\psi_T = 1 - \sqrt{w_2^2 - \Phi_2^2} \quad (4)$$

Средняя относительная неопределенность аппроксимации коэффициента теоретического напора по представленной методике составляет $\delta(\psi_T) = 0,65\%$.

Разработана зависимость для комплекса потерь на основе трехмерного моделирования рабочего процесса в детальных моделях малорасходных ступеней Q, R, S, T, U, V компании *Dresser&Clark*:

$$\beta_{тр} + \beta_{пр} = 0,0118 \left((F_2 / F_{oc}) \Phi_2 \psi_T \right)^{-0,9}, \quad (5)$$

где F_2 / F_{oc} - отношение площадей ометаемых поверхностей рабочего колеса и осевых зазоров в сечении 2-2.

Средняя неопределенность аппроксимации по формуле (5) составляет 1,3%. На рисунке 4 показано, что при увеличении угла выхода лопаток, а соответственно напорности рабочего колеса, наблюдается резкое снижения комплекса потерь трения и протечек. Этот эффект ограничивает использование зависимости в пределах условного коэффициента расхода $0,006 < \Phi_p < 0,020$ и коэффициента теоретического напора $0,60 < \psi_T < 0,72$, что совпадает с диапазоном исследованных ступеней Q, R, S, T, U, V .

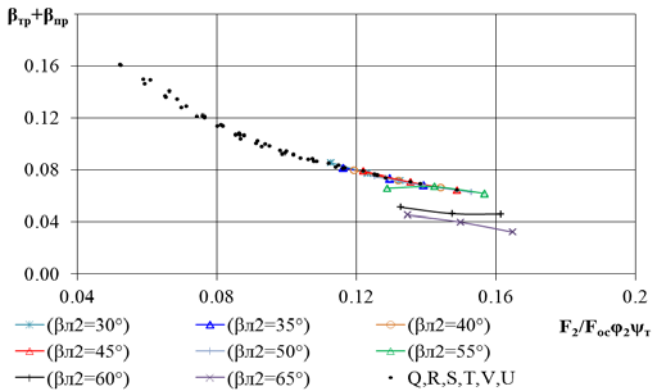


Рисунок 4 – Сравнение комплекса потерь трения и протечек для ступеней Q, R, S, T, U, V и ступени Q-482 с различным углом выхода лопаток

Применение математической модели в виде обобщающих зависимостей для коэффициента теоретического напора и комплекса потерь трения и протечек для малорасходных рабочих колес центробежных компрессоров показало высокую инженерную точность расчетов на независимых экспериментальных данных, что говорит о достоверности результатов исследования и повышении качества разработанной модели напора.

Четвертая глава посвящена стандартизации и унификации проектных расчетов малорасходных рабочих колес и ступеней центробежных компрессоров. Областью стандартизации проектных расчетов центробежных компрессоров являются математическое моделирование методами вычислительной газодинамики рабочего процесса с учетом вязкости потока моделирования и математическая модель напора относительно применения к проектированию малорасходных ступеней.

Приведено обоснование перехода класса задач по газодинамическому расчету с исследовательского на проектный уровень. Описана унификация газодинамических расчетов ступеней по 53 параметрам по следующим направлениям: применение метода базовой численной трехмерной модели проточной части ступени; использование единого подхода при задании граничных условий, выборе модели турбулентности и параметров расчетной сетки; использование выбранных критериев анализа сходимости

расчетной задачи; использование единого метода обработки и представления результатов численного моделирования.

Основной стандартизации является использование унифицированных численных и математических моделей. Разработанные унифицированные численные модели позволяют проектировщику компрессора, не перестраивая заново численную модель для каждой из ступеней, изменять только варьируемые геометрические параметры в единожды построенной модели в заданном диапазоне рабочих параметров, который отвечает практическому использованию машин. Разработанные параметризованная численная модель и математическая модель напора позволяют в сокращенные сроки и без применения научного подхода произвести проектирование ряда малорасходных ступеней и рабочих колес центробежного компрессора.

В заключении приведены основные результаты и решенные задачи.

1. Повышено качество численного моделирования вязкого трехмерного потока методами вычислительной газодинамики в малорасходных ступенях центробежных компрессоров, обеспечивающее необходимую для проектных расчетов точность.

2. Повышено качество математической модели определения коэффициента теоретического напора на расчётном режиме малорасходных рабочих колес ЦК при условии безударного обтекания на входе. Математическая модель разработана на основе прошедших валидацию и верификацию расчетов вязкого трехмерного потока методами вычислительной газодинамики.

3. Повышено качество математической модели определения комплекса потерь дискового трения и протечек в малорасходных ступенях ЦК на основе обобщения результатов численного моделирования рабочего процесса по стандартизованной детальной модели методами вычислительной газодинамики.

4. Повышено качество математической модели определения внутреннего напора малорасходных ступеней центробежных компрессоров на расчетном режиме на основе разработанных математических моделей определения коэффициента теоретического напора и комплекса потерь дискового трения и протечек.

5. Разработана модель стандартизации, а также предложен проект стандарта организации процесса численного моделирования

малорасходных ступеней центробежных компрессоров, что позволило выполнить унификацию проектных газодинамических расчетов методами вычислительной газодинамики для малорасходных рабочих колес и ступеней центробежных компрессоров.

6. Результаты диссертационного исследования позволили перевести проектные газодинамические расчеты малорасходных ступеней центробежных компрессоров с научно-исследовательского в инженерный класс задач, что позволило снизить себестоимость продукции за счет сокращения сроков проектирования, использования прототипов, а также закладывает предпосылки к созданию цифровых двойников центробежных компрессоров и дальнейшему развитию этого научного направления. Экономический эффект от внедрения результатов исследования оценен и обусловлен следующим:

а) На стадии производства компрессоров совокупное снижение стоимости проектирования до 30% за счет:

- снижения сроков проектных расчетов до 20%;
- снижения требований к квалификации проектантов;
- снижения требований к вычислительным ресурсам;

б) На стадии эксплуатации компрессоров:

- повышения КПД малорасходных ступеней и компрессоров;
- сокращения расходов на собственные нужды ТЭС;
- обеспечения расчетных режимов работы ГТУ ТЭС.

Совокупный экономический эффект может достигать от 1 до нескольких млн. руб./год применительно к затратам на проектирование и на собственные нужды ТЭС (привод ДКС) в зависимости от тарифов на электроэнергию, до десятков и сотен млн. руб. в год за счет обеспечения оптимальных режимов работы центробежных компрессоров в составе газоперекачивающих агрегатов и обеспечения оптимальных режимов работы газотурбинных установок турбогенераторов ТЭС при подаче ДКС топливного газа на расчетном режиме.

Указанные основные результаты были получены за счет решения следующих задач:

1. Разработана и отработана методика составления стандартизованных детальных и упрощенных численных моделей на основе проведенной унификации для моделирования вязкого трехмерного потока с помощью методов вычислительной

газодинамики в программе *Ansys CFX* 18.0 для малорасходных рабочих колес и ступеней центробежных компрессоров. Проведено тестирование четырех моделей турбулентности, показано, что для малорасходных ступеней рекомендуется использовать модель турбулентности $k-\omega$. Уточнено использование межсеточных интерфейсов между расчетными областями. Для получения приемлемого результата достаточно использовать только интерфейс «*Stage*» за рабочим колесом в ступени малорасходных центробежных компрессоров. По результатам исследования сеточной независимости численного решения количество элементов в расчетной области при сохранении значения безразмерной пристеночной координаты Y^+ равное 600 тыс. элементов достаточно для получения неизменного результата.

2. Установлено, что для параметрических исследований напора рабочего колеса на расчетном режиме достаточно использовать стандартизованную упрощенную численную модель, состоящую из рабочего колеса и небольшого продолжения безлопаточного диффузора. Наблюдается только сдвиг по характеристике, который может быть учтен выведенной поправкой.

3. Доказано, что достоверность вязкого трехмерного расчета обеспечивается сравнением результатов с данными натурных испытаний, средняя арифметическая относительная неопределенность на расчетном режиме для 18 малорасходных ступеней не превышает 4%. Наблюдается увеличение неопределенности при уменьшении условного коэффициента расхода ступени. Наибольшая неопределенность получена в самой узкой ступени типа V при $\Phi_p < 0,008$.

4. Проведено параметрическое исследование 1620 упрощенных стандартизованных численных моделей малорасходных рабочих колес центробежных компрессоров на основе расчета вязкого трехмерного потока в *Ansys* 18.0. Для анализа и составления обобщенной зависимости для теоретического и внутреннего напора отобранные рабочие колеса в диапазоне условного коэффициента расхода от $0,008 \leq \Phi_p \leq 0,020$. Установлена линейная связь фактора диффузорности F_D от коэффициента геометрической диффузорности с учетом стеснения $K'_{гд}$ при постоянных значениях угла выхода лопатки, диаметра втулки и условного числа Маха. Установлена квадратичная связь потоковой

диффузорности n_w от фактора диффузорности F_D при постоянных значениях угла выхода и числа лопаток.

5. Разработана математическая модель, обеспечивающая высокое качество проектных расчетов, в виде обобщающих зависимостей для расчета коэффициента теоретического напора ψ_T малорасходных рабочих колес на расчетном режиме для ступеней центробежных компрессоров дожимных компрессорных станций тепловых электростанций. Применение зависимости в диапазоне условного коэффициента расхода от $0,008 \leq \Phi_p \leq 0,020$, условного числа Маха от $0,5 \leq M_{u2} \leq 0,8$, числа лопаток от $12 \leq z \leq 20$, угла выхода лопаток от $30^\circ \leq \beta_{l2} \leq 50^\circ$, относительного диаметра втулки $0,3 \leq \bar{D}_{вт} \leq 0,5$, отношения высоты лопатки на входе и выходе $0,5 \leq b_2/b_1 \leq 1,0$. Особенностью предложенной зависимости является обобщение результатов моделирования вязкого трехмерного потока валидированных стандартизованных упрощенных численных моделей малорасходных рабочих колес, учитывающих вязкие эффекты, возникающие при взаимодействии ядра потока с низкоэнергетической зоной и вторичные течения с ограничивающих поверхностей.

6. Разработана математическая модель, обеспечивающая высокое качество проектных расчетов, для расчета комплекса потерь трения и протечек $\beta_{тр} + \beta_{пр}$ малорасходных рабочих колес в зоне оптимальной работы на основе рассмотрения вязкого трехмерного потока в валидированных стандартизованных детальных численных моделях 18 малорасходных ступеней. Применение зависимости в диапазоне условного коэффициента расхода от $0,006 \leq \Phi_p \leq 0,020$ и коэффициента теоретического напора $0,60 \leq \psi_T \leq 0,72$.

7. Достоверность расчета по обобщающим зависимостям обеспечивается проведением валидации по независимым ступеням серий Q, R, S, T, U, V и СВД-7, СВД-8. Средняя арифметическая относительная неопределенность расчета коэффициента теоретического напора составляет не более 2%.

8. Разработанная математическая модель напора в виде обобщающих зависимостей может применяться при вариантном проектировании рабочих колеса малорасходных ступеней центробежных компрессоров. Рекомендации по постановке задачи моделирования вязкого трёхмерного потока могут использоваться

для совершенствования рабочего процесса в малорасходных ступенях центробежных компрессоров при их проектировании.

9. По разработанным математическим моделям определения коэффициентов теоретического и внутреннего напоров написана программа для ЭВМ «Программа расчета напора для малорасходных ступеней центробежных компрессоров HeadCalc-v.1.01». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021614102.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Иванов В.М., Кожухов Ю.В. Повышение качества математической модели напора малорасходных ступеней центробежных компрессоров // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. Вып. 2. С. 520–528.

2. Иванов В.М., Кожухов Ю.В. Повышение качества проектирования малорасходных ступеней центробежных компрессоров путем создания базы данных виртуальных рабочих колес по результатам CFD-моделирования // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №1. С. 83–93. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-1-83-93>

3. Иванов В.М., Кожухов Ю.В., Данилишин А.М. Повышение качества проектирования малорасходных ступеней центробежных компрессоров за счет верификации и валидации расчетных CFD моделей // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т.22, №6, 2020. С. 48–56. <https://doi.org/10.37313/1990-5378-2020-22-6-48-56>

4. Иванов В.М., Кожухов Ю.В. Результаты численного моделирования вязкого потока в малорасходных ступенях центробежных компрессоров как основа создания математической модели напора. Холодильная техника. №3. 2020. Издательский дом «Холодильная техника». С. 24 – 29.

5. Vyacheslav Ivanov, Yuri Kozhukhov and Minh Hai Nguyen. Head Math Model For The Low-Flow Impellers Of The Centrifugal Compressors. E3S Web Conf., 140 (2019) 06008. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201914006008>

6. Иванов, В.М., Кожухов Ю.В. Математическая модель напора малорасходных рабочих колес дожимных центробежных компрессоров тепловых электростанций. Новое в российской электроэнергетике. 2019. № 12. С. 12-20.

7. Ivanov, V.M., Kozhukhov, Y.V., Danilishin, A.M. Calculation of the impellers head characteristics of the low-flow centrifugal compressor stages based on quasi-three-dimensional inviscid and viscous methods (2019) AIP Conference Proceedings, 2141, № 030064. <https://doi.org/10.1063/1.5122114>

8. Иванов В.М., Кожухов Ю.В. Данилишин А.М., Садовский Н.И. Моделирование и валидация рабочего процесса в модельной малорасходной ступени центробежного компрессора // Новое в российской электроэнергетике. 2019. № 6. С. 12-19.

9. Иванов В.М., Кожухов Ю.В. Данилишин А.М., Садовский Н.И. Расчет невязкого и вязкого потока для определения напорной характеристики рабочих колес малорасходных ступеней центробежного компрессора // Энергосбережение и водоподготовка. 2019. № 3 (119). С. 55-59.

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021614102. Программа расчета напора для малорасходных ступеней центробежных компрессоров HeadCalc-v.1.01: программа для ЭВМ / Иванов В.М. (RU), Кожухов Ю.В. (RU), Татченкова С.М. (RU); правообладатель ФГАОУ ВО «СПбПУ» (RU); заявка №2021612637, дата гос. регистр. 18.03.2021 г.; 140 Кб.