

На правах рукописи

Гамбургер Дмитрий Михайлович

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОГО ГАЗА  
В ЦЕНТРОБЕЖНОЙ КОМПРЕССОРНОЙ СТУПЕНИ:  
МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ

Специальность: 05.04.06 – вакуумная, компрессорная техника и пневмосистемы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2009

Работа выполнена на кафедре «Компрессорная, вакуумная и холодильная техника» Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

**Научный руководитель:**

доктор технических наук,

профессор

Галеркин Юрий Борисович

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук,

профессор

Рассохин Виктор Александрович

кандидат технических наук

Юн Владимир Климентьевич

**Ведущая организация:**

ЗАО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа», г. Казань.

Защита состоится **24 ноября 2009 г. в 16:00** на заседании диссертационного совета Д 212.229.09 ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу:

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, ауд. 118 главного здания.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» октября 2009 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета Д 212.229.09

доктор технических наук, профессор

Хрусталёв Б.С.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Центробежные компрессоры находят самое широкое применение во всех базовых отраслях. Появление программных пакетов численной гидрогазодинамики (CFD – Computational Fluid Dynamics), поставило вопрос о возможности использовании таких программ для проектирования турбомашин. Численный эксперимент имеет ряд преимуществ. Он дешевле и быстрее натурального, легко повторяем и т.д. Однако в практике проектных и конструкторских организаций численное моделирование гидродинамических процессов в турбомашинах встречается достаточно редко. Это связано со значительным влиянием методики постановки численного моделирования на результаты расчетов. Также остаётся открытым основной вопрос – достоверность результатов численного решения, их соответствие реальному течению.

**Цель и задачи работы.** Цель данной работы – используя теоретический и практический опыт Кафедры компрессорной, вакуумной и холодильной техники СПбГПУ (кафедра КВХТ), разработать методику использования стандартных программных комплексов вычислительной гидрогазодинамики применительно к промышленным центробежным компрессорам, а также провести верификацию результатов расчетов с надежными экспериментальными данными.

**Предметом исследования** являются модельные ступени среднерасходных центробежных компрессоров, их газодинамические характеристики, а также картины течения, полученные в ходе расчетов и экспериментально.

**Метод исследования** – численное моделирование с помощью гидрогазодинамического программного пакета ANSYS CFX, основанного, как и другие популярные программы CFD, на осредненной по Рейнольдсу системы уравнений Навье–Стокса. Результаты численного моделирования сравнивались с экспериментальными данными: по газодинамическим характеристикам и при анализе картин течения.

**Научная новизна** работы определяется тем, что выполнено систематическое исследование влияния методики постановки трехмерного численного моделирования на результаты расчетов, применительно к центробежным компрессорам. Сравниваются результаты моделирования течения в рабочем колесе центробежного компрессора с экспериментальными данными, полученными при замерах параметров потока внутри колеса в относительном движении.

**Практическая ценность работы.** В результате исследования была разработана методика постановки численного моделирования течения газа в ступени центробежного компрессора. Показано, что корректно поставленное численное моделирование дает достоверную картину течения, а газодинамические характеристики, построенные по результатам моделирования, хорошо соотносятся с экспериментом. С помощью программ CFD можно анализировать картины течения и на основании этого оптимизировать форму проточной части там, где это необходимо. Использование методов численной гидрогазодинамики позволит существенно ускорить и удешевить процесс проектирования новых и модернизацию старых ступеней центробежных компрессоров.

**Апробация работы.** Основные положения работы докладывались и обсуждались на VIII международной научно-технической конференции молодых специалистов по компрессорной технике (2009 года, г. Казань) и опубликованы в ее трудах. Результаты работы опубликованы в журналах «Компрессорная техника и пневматика» и «Научно-технические ведомости СПбГПУ» (2007, 2009 г.г.). Начиная с 2005 года результаты работы поэтапно выносились на обсуждение в качестве научного доклада в рамках межвузовской научно-технической конференции «Неделя науки СПбГПУ» (2005, 2007, 2008, 2009 г.г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано девять печатных работ, список которых приведен в конце автореферата.

**На защиту выносятся:**

1. Результаты верификации газодинамических характеристик центробежной модельной ступени 048, полученных в результате расчетов с экспериментальными данными.
2. Результаты сравнения линий тока на ограничивающих поверхностях и поверхностях лопаток рабочего колеса 085/065 с донными линиями, полученными экспериментально. Результаты сравнений диаграмм относительной скорости на поверхностях лопаток, полученных в результате расчетов, с экспериментальными данными.
3. Рекомендации по постановке численного моделирования течения газа в проточной части центробежных компрессоров: построение расчетной сетки, задание граничных условий, выбор модели турбулентности, учет шероховатости поверхностей.
4. Результаты моделирования течения газа в проточной части ступени 048.

5. Пример оптимизации проточной части ступени центробежного компрессора с помощью программы CFD.

**Структура работы.** Диссертация включает в себя список условных обозначений, семь разделов и список использованной литературы, состоящий из 64 источников. Материал изложен на 190 страницах машинописного текста, содержит 112 рисунков и 11 таблиц.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Введение.** Приведены общие сведения о направлении и характере научной работы.

**1. Состояние вопроса и постановка задачи.** Кратко описана история развития численной гидрогазодинамики. Приведены некоторые общие сведения численных методов гидрогазодинамики. На основе анализа современных возможностей стандартных гидрогазодинамических пакетов сформулированы цели и задачи исследования.

**2. Используемые экспериментальные данные.** Для решения поставленных задач, выбраны следующие объекты исследования: 1) модельная ступень 048, 2) рабочее колесо модельной ступени 085/065.

Модельная ступень 048 ( $\Phi_{РАСЧ}=0,048$ ) является одной из наиболее изученных и отработанных на кафедре КВХТ ступеней. На ее основе разработана серия проточных частей ГПА типа НЦ-16, до сих пор эксплуатируемая на газопроводах. На кафедре КВХТ имеется большой объем результатов модельных испытаний этой ступени в лаборатории кафедры. Модельная ступень 048 состоит из входного патрубка (ВП), рабочего колеса (РК), безлопаточного диффузора (БЛД), и обратно-направляющего аппарата (ОНА) со спрямляющим аппаратом (СА), расположенным через одну лопатку ОНА. РК имеет следующие геометрические параметры:  $D_2 = 0,4094$  м,  $D_{BT} / D_2 = 0,2899$ ,  $D_1 / D_2 = 0,5349$ ,  $b_1 / D_2 = 0,0884$ ,  $\beta_{Л1} = 23,0^\circ$ ,  $\beta_{Л2} = 30,0^\circ$ ,  $b_2 / D_2 = 0,0576$ ,  $\delta_{РК} / D_2 = 0,0139$ ,  $z_{РК} = 11$ . БЛД имеет следующие геометрические параметры:  $b_4 / D_2 = 0,0462$ ,  $b_4 / b_2 = 0,8$ ,  $D_4 / D_2 = 1,4021$ . ОНА имеет следующие геометрические параметры:  $D_5 / D_2 = 1,4277$ ,  $D_6 / D_2 = 0,7069$ ,  $b_5 / D_2 = 0,0493$ ,  $b_6 / D_2 = 0,0703$ ,  $b_5 / b_6 = 0,7014$ ,  $\beta_{Л5} = 32,0^\circ$ ,  $\beta_{Л6} = 97,0^\circ$ ,  $z_{ОНА} = 24$ ,  $z_{СА} = 12$ .

Экспериментальные испытания модельной ступени 048, результаты которых использовались в работе, проводились В. И. Зараевым на стенде ЭЦК-4. Испытания проводились при постоянной частоте вращения ротора  $n = 9479$  об/мин, при котором  $M_u = 0,6$ ,  $u_2 = 203,2$  м/с и  $Re_u = 6 \cdot 10^6$ .

Рабочее колесо 085/065 ( $\Phi_{РАСЧ}=0,085$ ) также разработано на кафедре КВХТ. В лаборатории кафедры ранее были получены экспериментальные данные параметров потока внутри колеса в относительном движении. Также имеются результаты визуализации донных линий тока на поверхностях этого колеса. РК ступени 085/065 имеет следующие геометрические параметры:  $D_2 = 0,610 \text{ м}$  ,  $D_{ВТ} / D_2 = 0,2438$ ,  $D_1 / D_2 = 0,5410$ ,  $b_1 / D_2 = 0,118$ ,  $\beta_{Л1} = 35,2^\circ$ ,  $\beta_{Л2} = 64,5^\circ$ ,  $b_2 / D_2 = 0,06$ ,  $\delta_{РК} / D_2 = 0,0139$ ,  $z_{РК} = 18$ .

Экспериментальные испытания модельной ступени 085/065, результаты которых использовались в работе, проводились А. В. Герасимовым на стенде ЭЦК-2М. Испытания проходили при  $n = 2500$  об/мин, при котором  $M_u = 0,2$ ,  $u_2 = 79,8$  м/с и  $Re_u = 3,5 \cdot 10^6$ . Также исследования РК 085/065 проводились на стенде ЦН-1, предназначенном для визуализации течения в РК при работе его в водном потоке. Оба стенда разработаны и установлены в лаборатории кафедры КВХТ.

**3. Методика численного исследования.** По чертежам кафедры были построены пространственно-геометрические модели исследуемых объектов. Ступень состоит из четырех блоков: ВП, РК, БЛД и ОНА (рис. 1). При моделировании был сделан ряд допущений: 1) ставится осесимметричная задача – рассматривается обтекание одной лопатки РК, 2) течение газа в зазорах между колесом и статорными частями компрессора не моделируется.

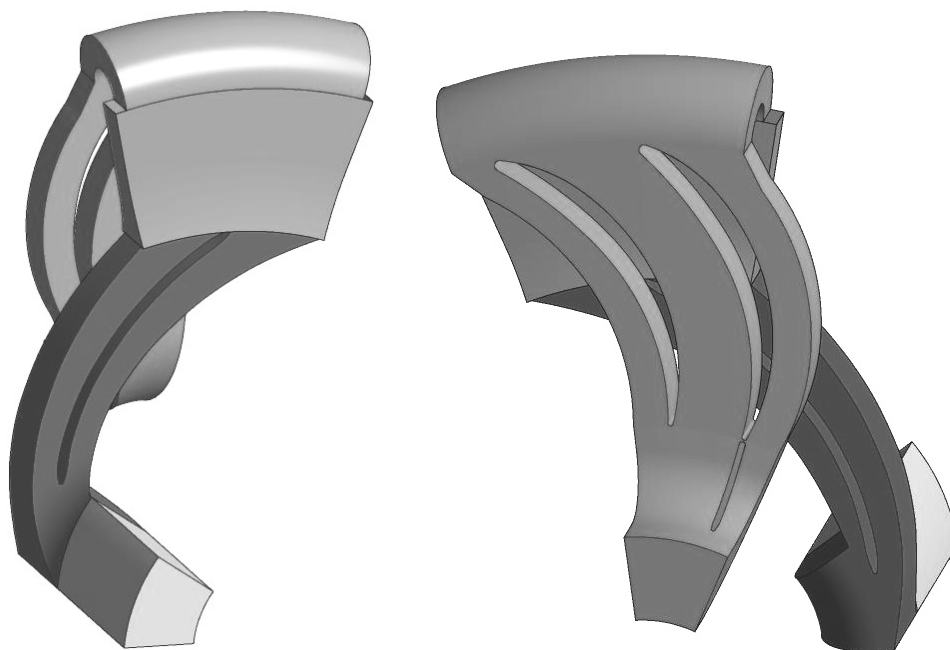


Рис. 1. Пространственная геометрическая модель ступени 048.

При осесимметричной задаче рассматривается обтекание одной лопатки РК, т.е. сектор с углом  $360^\circ/11 = 32^\circ 44'$  для ступени типа 048 и  $360^\circ/18 = 20^\circ$

для ступени типа 085/065. ОНА модельной ступени 048 содержит 24 лопатки. Таким образом, в сектор с одной лопаткой РК ( $32^{\circ}44'$ ) вмещается две лопатки ОНА ( $360^{\circ}/12 = 30^{\circ}$ ). Неполное равенство секторов РК+БЛД и ОНА компенсируется автоматически программой ANSYS CFX.

На примере модельной ступени 048 (без ОНА) проведено исследование влияния типа и количества элементов расчетной сетки на результаты расчета. Для этой цели были построены три расчетные сетки. При построении расчетных сеток были учтены общие рекомендации, используемые при решении других классов газодинамических задач: 1) При построении расчетной сетки следует выполнить условие плавности изменения размеров элементов расчетной сетки. 2) Расчетной сетке следует иметь сгущение к твердым стенкам. При этом не рекомендуется превышать отношение высот соседних элементов более 25%. 3) При использовании моделей турбулентности SST и k- $\epsilon$ , у стенки 1-й расчетный узел расчетной сетки должен попадать в область логарифмического слоя; значение  $y^+$  не должно превышать 300. 4) Рекомендуется использовать для расчетов сетки с ячейками, у которых углы, образованные сеточными линиями, отличаются от прямых не более чем на  $\pm 45^{\circ}$ . 5) Рекомендуется выбирать положение входной и выходной границ расчетной области на небольшом удалении от исследуемой области.

Первая сетка, именуемая в дальнейшем «нерегулярной», не структурированная и состоит из 632974 элементов преимущественно формы тетраэдров. Центральная часть каналов состоит из тетраэдров. О-блок у лопатки РК, а также пристеночные области состоят из призм со сгущением к стенке, при котором среднее значение  $y^+$  на лопатке РК равно 15...20 и не превышает 250 на остальных поверхностях.

Вторая и третья сетки, именуемые в дальнейшем «регулярными», блочно-структурированные, состоят преимущественно из элементов формы гексаэдров, имеют сгущения у лопатки РК и в пристеночных областях. Небольшая область на входе в РК, ввиду сложности геометрической формы, состоит из тетраэдров. Построенные вручную «регулярные» сетки отличаются между собой только числом элементов. Одна расчетная сетка состоит из 340812 элементов. Среднее значение  $y^+$  на лопатке РК равно 30...80 и не превышает 250 на остальных поверхностях. Другая расчетная сетка состоит из 978119 элементов. Среднее значение  $y^+$  на лопатке РК равно 30...60 и не превышает 200 на остальных поверхностях.

Расчетная сетка для блока ОНА ступени 048 также является блочно-структурированной и состоит из 1963320 элементов формы гексаэдров.

Расчетная сетка имеет сгущения у лопатки и в пристеночных областях, при этом среднее значение  $y^+$  на лопатке равно 30...50 и не превышает 120 на остальных поверхностях.

Расчетная сетка для ступени типа 085/065 также является блочно-структурированной и состоит из 1857192 элементов формы гексаэдров. Расчетная сетка имеет сгущения у лопатки и в пристеночных областях, при этом среднее значение  $y^+$  равно 15...25 и не превышает 150.

Численный эксперимент проводился при стационарной постановке задачи. Рабочее тело – идеальный газ (Air Ideal Gas). На входе в расчетную область, задавались значения полного давления и статической температуры, соответствующие условиям моделируемого эксперимента. На выходе из расчетной области, задавалось значение массового расхода, соответствующее режиму работы ступени.

В программе ANSYS CFX для анализа о сходимости решения используется среднеквадратичное значение по остатку (RMS – Root Mean Square). Критерием сходимости расчетов было принято значение RMS по уравнению энергии (H-Energy). Как показал опыт, решение этого уравнения сходится гораздо медленнее остальных уравнений (баланса массы, баланса количества движения и т.д.). При уровне RMS H-Energy ниже  $1,0E-3$  разница значений полной температуры по контрольным сечениям в неподвижных элементах проточной части ступени не превышает  $\Delta T^*=0,05$  К, поэтому этот уровень и был принят как критерий сходимости расчетов.

В связи с тем, что в расчетной модели протечки через уплотнения не моделировались, при построении характеристик использовался условный коэффициент расхода, определяемый по формуле  $\Phi_p = \Phi \cdot (1 + \beta_{np})$ , а политропный КПД по полным параметрам определялся по формуле

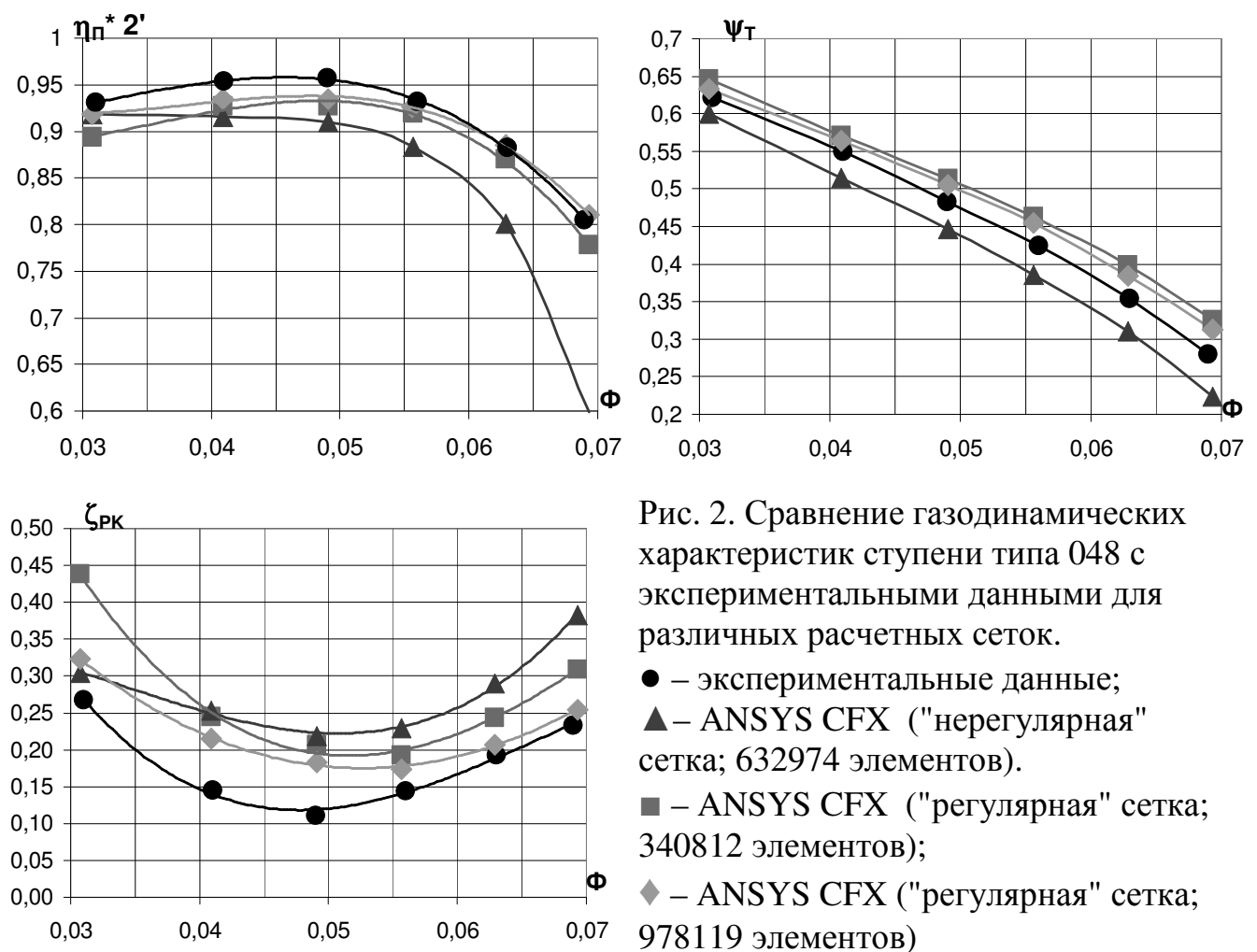
$\eta_{\Pi i}^* = \frac{h_{\Pi i}^*}{h_T(1 + \beta_{np} + \beta_{mp})}$ , где значения  $\beta_{mp}$  и  $\beta_{np}$  брались из протокола модельных

испытаний для соответствующего режима работы. Однако в кандидатской диссертации К.В. Солдатовой было показано, что полученная по результатам расчетов программы CFX  $\beta_{mp}$  в среднем на 30% ниже, чем рассчитанная по методике, используемой при обработке протоколов модельных испытаний. Таким образом, для корректного сопоставления с экспериментальными данными, в формулу подставлялись экспериментальные значения  $\beta_{mp}$ , уменьшенные на 30%. Коэффициент потерь в РК, в связи с указанными



допущениями, рассчитывался по формуле  $\zeta_{PK} = \frac{2 \cdot \psi_T \cdot (1 - \eta_{п2}^*)}{(w_1 / u_2)^2}$ , где подстрочный индекс «1» обозначает сечение 1-1, соответствующее входной кромке лопатки РК.

**4. Отработка методики численного исследования.** Для исследования влияния формы и количества элементов расчетной сетки на результаты расчета, были проведены расчеты 6-ти режимов по расходу с различными вариантами расчетных сеток. Использовалась модель турбулентности SST. Результаты сопоставления газодинамических характеристик с экспериментальными данными для различных расчетных сеток представлены на рис. 2.



Исследования показали: 1) Форма элементов расчетной сетки оказывает существенное влияние на результаты расчета. Состоящая из гексаэдров блочно-структурированная расчетная сетка дает результаты качественно и количественно лучше соответствующие экспериментальным данным, чем расчетная сетка неструктурированная и состоящая из тетраэдров. 2) Увеличение количества элементов расчетной сетки позволяет увеличить

точность расчетов, однако влечет за собой увеличение аппаратного времени вычислений. Принято проводить исследование на «сеточное влияние» – сравнивать результаты расчетов для расчетных сеток с разным количеством элементов. Если после очередного увеличения количества элементов, результаты расчетов мало отличаются от результатов с более грубой сеткой, то сетку можно больше не сгущать. Таким образом находится компромисс между точностью расчетов и аппаратным временем, затрачиваемым на них. Решение о целесообразности дальнейшего сгущения расчетной сетки нужно принимать исходя из поставленной задачи.

Для исследования влияния модели турбулентности на результаты расчета использовались стандартные двухпараметрические модели  $k$ - $\epsilon$  и  $k$ - $\omega$ , модель Ментера Shear Stress Transport (SST) и модель рейнольдсовых напряжений BSL. Расчеты проводились с «регулярной» расчетной сеткой (для блоков ВП+ПК+БЛД – 978119 элементов, для блоков ПК+ОНА – 1963320 элементов). С каждой из моделей турбулентности были проведены расчеты 6-ти режимов по расходу. Результаты сопоставления газодинамических характеристик с экспериментальными данными при различных моделях турбулентности представлены на рис. 3.

Исследования показали, что выбор модели турбулентности значительно влияет на результаты расчетов. Так, использование модели турбулентности BSL при моделировании течения в ступени центробежного компрессора приводит не только к значительной погрешности расчетов и ошибочной картине течения, но и к несходимости расчетов. Для задач моделирования течения в ступени центробежного компрессора наилучшим образом показали себя модели турбулентности  $k$ - $\epsilon$  и SST. Они обе дают близкие результаты и принятие решения о более предпочтительной в рамках диссертационной работы невозможно, так как при моделировании был сделан ряд допущений и упрощений.

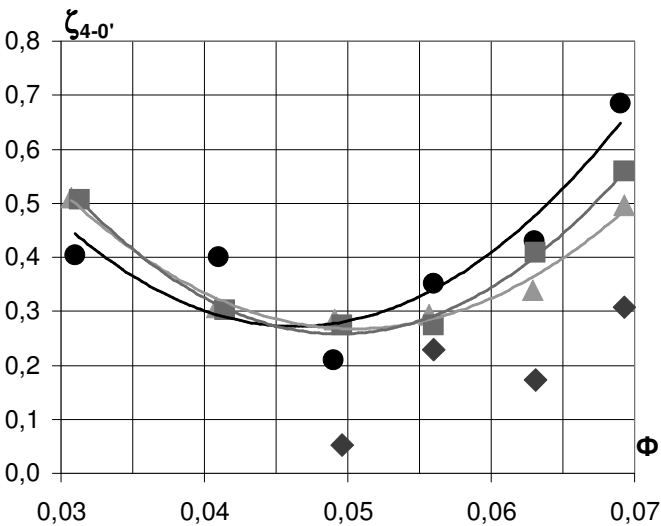
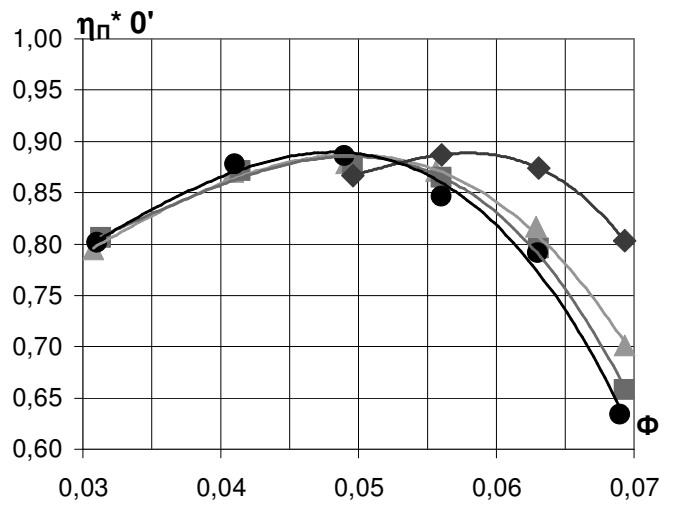
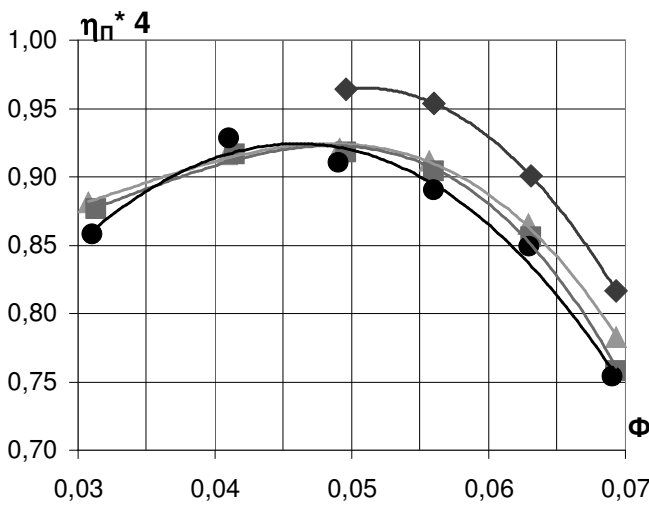
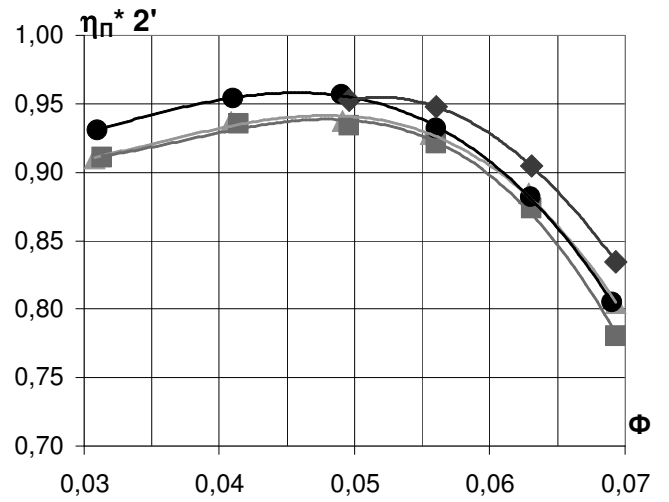
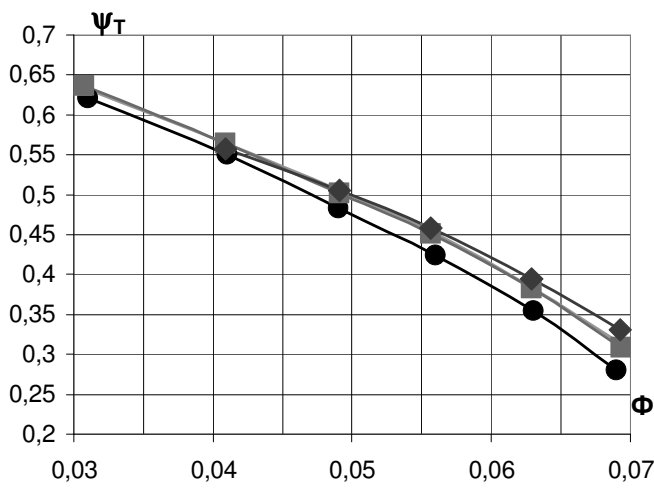


Рис. 3. Сравнение газодинамических характеристик модельной ступени типа 048 с экспериментальными значениями для различных моделей турбулентности.

- – экспериментальные данные;
- – ANSYS CFX (k-E);
- ▲ – ANSYS CFX (SST);
- ◆ – ANSYS CFX (BSL).

Для учета влияния шероховатости поверхностей на результаты расчетов, были проведены расчеты 6-ти режимов по расходу с установленной высотой «песочной» шероховатости 1,5 мкм, что эквивалентно технической шероховатости  $Ra=1,6...0,4$  (по данным Л. Ф. Моуди). Шероховатость поверхностей проточной части модельной ступени 048 была не хуже  $Ra=1,25$ .

Расчеты проводились с «регулярной» расчетной сеткой (для блоков ВП+РК+БЛД – 978119 элементов, для блоков ПК+ОНА – 1963320 элементов) и моделью турбулентности k-ε. Анализ газодинамических характеристик показал, что учет шероховатости в 1,5 мкм немного повышает уровень потерь в проточной части ступени на режимах по расходу, выше расчетного. На остальных режимах работы, отличие значений коэффициента потерь от расчетов с гидравлически гладкими поверхностями лежат в пределах погрешности расчетов. Таким образом, можно сделать вывод, что поверхности стенок проточной части модельной ступени, обработанные до  $Ra=1,25$ , можно считать гидравлически гладкими. Такое допущение не внесет существенного увеличения погрешности результатов расчетов.

**5. Результаты численного исследования.** В данном разделе приводятся результаты моделирования течения в проточной части ступеней 048 и 085/065. Анализируется пространственный характер течения. Проводится сравнение диаграмм относительных скоростей на поверхностях лопаток рабочего колеса 085/065 с экспериментальными данными (рис.4).

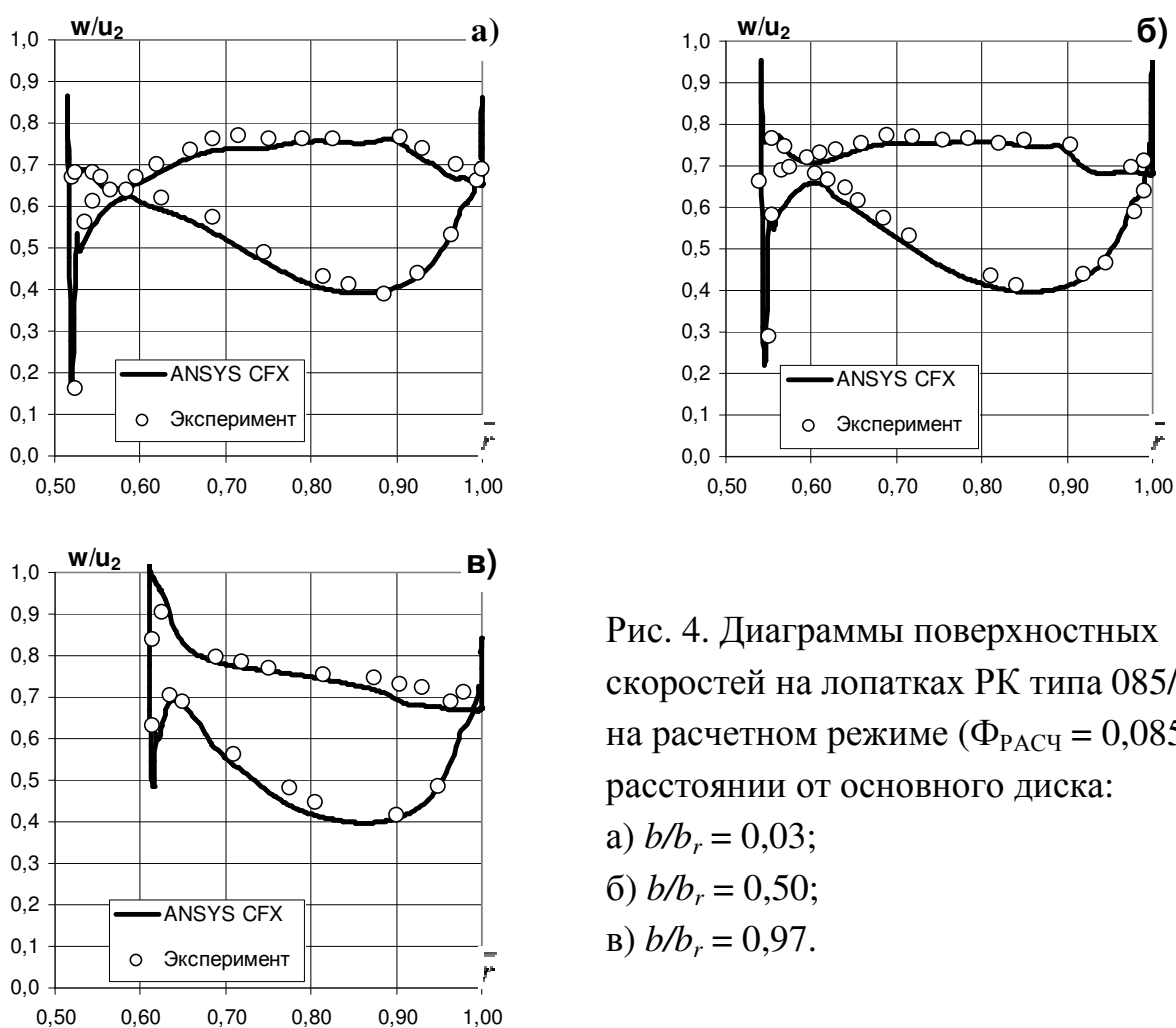


Рис. 4. Диаграммы поверхностных скоростей на лопатках РК типа 085/065 на расчетном режиме ( $\Phi_{РАСЧ} = 0,085$ ) на расстоянии от основного диска:  
 а)  $b/b_r = 0,03$ ;  
 б)  $b/b_r = 0,50$ ;  
 в)  $b/b_r = 0,97$ .

Картины течения на поверхностях лопаток и на ограничивающих поверхностях рабочего колеса 085/065 сравниваются с результатами визуализации донных линий тока, полученных экспериментально. Сопоставление продемонстрировало хорошее соответствие.

Также в разделе приводится пример оптимизации элемента проточной части ступени 048 – БЛД. На основе анализа течения обнаружена зона повышенных потерь, которые удалось уменьшить путем изменения геометрической формы БЛД. Таким образом, показано, что с помощью программ CFD можно анализировать картины течения и на основании этого оптимизировать форму проточной части там, где это необходимо.

**Заключение.** Работа посвящена методике моделирования вязкого трехмерного течения газа применительно к центробежным компрессорным ступеням. Изучена возможность оптимизации проточной части методом моделирования.

Основные положения и результаты работы:

В качестве объектов моделирования использовались широко применяющаяся в проектах компрессоров для газовой промышленности модельная ступень 048 и рабочее колесо модельной ступени 085/065. Эти объекты тщательно исследованы на кафедре КВХТ путем поэлементных испытаний в абсолютном и относительном движении.

Расчеты течения в ступени типа 048 выполнены на 6 режимах по расходу при  $M_u = 0,6$  и  $Re_u = 6 \cdot 10^6$ , что соответствует реальным условиям испытаний. Расчеты проводились с различными вариантами постановки задачи:

- Использовались три расчетные сетки при моделировании течения в рабочем колесе и безлопаточном диффузоре: 1) Не структурированная расчетная сетка, состоящая из 632974 элементов преимущественно формы тетраэдров, при которой среднее значение  $y^+$  на лопатке РК равно 15...20 и не превышает 250 на остальных поверхностях. 2) Блочно-структурированная расчетная сетка, состоящая из 340812 элементов преимущественно формы гексаэдров, при которой среднее значение  $y^+$  на лопатке РК равно 30...80 и не превышает 250 на остальных поверхностях. 3) Блочно-структурированная расчетная сетка, состоящая из 978119 элементов преимущественно формы гексаэдров, при которой среднее значение  $y^+$  на лопатке РК равно 30...60 и не превышает 200 на остальных поверхностях.
- При моделировании течения в проточной части поворотного колена и ОНА ступени 048, использовалась блочно-структурированная расчетная

сетка, состоящая из 1963320 элементов формы гексаэдров. Среднее значение  $y^+$  равно 30...50 и не превышает 120.

- Применялись различные модели турбулентности: 1) стандартная двухпараметрическая модель  $k-\epsilon$ , 2) стандартная двухпараметрическая модель  $k-\omega$ , 3) модель Ментера Shear Stress Transport (SST), 4) модель Рейнольдсовых напряжений BSL.
- Проведены расчеты с установкой шероховатости поверхностей проточной части высотой 1,5 мкм (песочная шероховатость), эквивалентная техническая шероховатость –  $Ra\ 1,25$ .

Верификация результатов расчетов с экспериментальными данными проводилась на основе анализа суммарных газодинамических характеристик. Наилучшее соответствие экспериментальным данным показали расчеты с использованием состоящей из гексаэдров блочно-структурированной расчетной сетки и моделей турбулентности  $k-\epsilon$  и SST.

Проведено исследование на «сеточное влияние» – сравнивались результаты расчетов для расчетных сеток с разным количеством элементов. Выбрано оптимальное (с точки зрения «точность – время расчетов») количество элементов расчетной сетки – 978119 элементов.

Результаты расчетов с установкой шероховатости показали, что поверхности стенок проточной части ступени, обработанные до  $Ra\ 1,25$ , можно при моделировании считать гидравлически гладкими.

Расчеты течения в рабочем колесе модельной ступени 085/065 выполнены на 6 режимах по расходу при  $M_u = 0,2$  и  $Re_u = 3,5 \cdot 10^6$ , что соответствует реальным условиям испытаний. При моделировании использовалась методика, разработанная при расчетах с модельной ступенью 048. Сопоставление диаграмм поверхностных скоростей на лопатках рабочего колеса, полученных в результате моделирования, с экспериментальными данными показало хорошее их соответствие. Сравнение экспериментальных и полученных при расчетах картин течения на ограничивающих поверхностях и поверхностях лопаток РК продемонстрировало хорошее соответствие. Зоны, занятые вторичными течениями хорошо совпали с экспериментальными данными визуализации.

В результате работы получен большой объем информации о структуре потока в проточной части модельной ступени 048 и в рабочем колесе модельной ступени 085/065 на различных режимах их работы. Анализ течения в элементах проточной части ступеней подтвердил его сложный пространственный характер. На выходе из рабочего колеса подтверждено образование характерного типа течения «след-струя», а также его

меридиональная неравномерность. Обнаружен и теоретически обоснован локальный пик скорости у выходной кромки на передней поверхности лопатки РК 085/065 – что невозможно было обнаружить экспериментальным путем. В целом, подтверждена высокая эффективность исследуемых модельных ступеней во всем диапазоне режимов их работы.

Сделан вывод, что корректно поставленное численное моделирование дает достоверную картину течения, а газодинамические характеристики, построенные по результатам моделирования, хорошо соотносятся с экспериментом.

Анализ течения в ступени типа 048 обнаружил зону повышенных потерь в меридиональной плоскости в зоне выхода потока из рабочего колеса в безлопаточный диффузор. Вариант проточной части с улучшенной формой перехода имеет лучшую форму характеристики коэффициента потерь.

С учетом полученных рекомендаций по методике моделирования, программы CFD могут успешно применяться для расчета газодинамических характеристик и улучшения проточной части центробежных компрессорных ступеней.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в журналах Перечня ВАК

1. **Гамбургер, Д.М.** Численное исследование трехмерного течения вязкого сжимаемого газа в рабочем колесе центробежного компрессора [Текст] / Д.М. Гамбургер, А.А. Епифанов, А.В. Гаев // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2009. №2(78): Наука и образование. – 265 с. – С. 76–82.
2. **Галеркин, Ю.Б.** Анализ течения в центробежных ступенях методами вычислительной гидрогазодинамики [Текст] / Ю.Б. Галеркин, Д.М. Гамбургер, А.А. Епифанов // Компрессорная техника и пневматика. – 2009. – №3. – С. 22–32.
3. **Галеркин, Ю.Б.** Результаты расчета вязкого потока в неподвижных элементах центробежных компрессорных ступеней с помощью программной системы ANSYS/CFX [Текст] / Ю.Б. Галеркин, А.И. Боровков, И.Б. Воинов, А.В. Гаев, Д.М. Гамбургер, А.А. Софронова, Н.С. Лозовая // Компрессорная техника и пневматика. – 2007. – №2. – С. 10–16.

### Статьи в научных изданиях

4. **Галеркин, Ю. Б.** Опыт анализа течения в центробежных компрессорных ступенях методами вычислительной гидрогазодинамики [Текст] / Ю.Б.

- Галеркин, Д.М. Гамбургер, А.А.Епифанов // Тезисы докладов. VIII международная научно-техническая конференция молодых специалистов «Исследование, конструирование и технология изготовления компрессорных машин». – Казань: Изд-во «Слово», 2009. – 116 с. – С. 6–9.
5. **Галеркин, Ю. Б.** Опыт анализа течения в центробежных компрессорных ступенях методами вычислительной гидрогазодинамики [Текст] / Ю.Б. Галеркин, Д.М.Гамбургер, А.А. Епифанов // Проектирование и исследование компрессорных машин: Сб. науч. трудов под ред. докт. техн. наук, проф., чл.-корр. АН РТ И.Г. Хисамеева, вып.6 / ЗАО «НИИТурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа», Казань, 2009. – 422 с. – С. 45–54.
  6. **Епифанов, А.А.** Расчет трехмерного вязкого сжимаемого газа в рабочем колесе центробежного компрессора с помощью пакета ANSYS CFX [Текст] / А.А. Епифанов, Д.М. Гамбургер, Ю.Б. Галеркин // XXXVII Неделя науки СПбГПУ: Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов. Ч. III. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 154 с. – С. 88–89.
  7. **Епифанов, А.А.** Анализ течения вязкого сжимаемого газа в ступени центробежного компрессора с помощью пакета ANSYS CFX [Текст] / А.А. Епифанов, Д.М. Гамбургер, Ю.Б. Галеркин // XXXVI Неделя науки СПбГПУ: Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов. Ч. II. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 180 с. – С. 121–123.
  8. **Гамбургер, Д.М.** Анализ течения вязкого сжимаемого газа в неподвижных элементах ступени центробежного компрессора с помощью пакета ANSYS CFX [Текст] / Д.М. Гамбургер, Ю.Б. Галеркин // XXXV Неделя науки СПбГПУ: Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов. Ч. II. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – 131 с. – С. 91–93.
  9. **Гамбургер, Д.М.** Применение пакета FLUENT для оптимизации элементов проточной части центробежного компрессора в двухмерной постановке [Текст] / Д.М. Гамбургер, А.А. Софронова, Ю.Б. Галеркин, А.Ю. Прокофьев // XXXIII Неделя науки СПбГПУ: Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов. Ч. II. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2005. – 206 с. – С. 135–137.