

ЛОПУЛАЛАН Хенри Домингус

ВИРТУАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ В
СТУПЕНИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА

Специальность 05.04.06 – Вакуумная, компрессорная техника и пневмосистемы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор, Измайлов Рудольф Александрович.

Официальные оппоненты:

Соломахова Татьяна Степановна, доктор технических наук, НИМК ЦАГИ, ведущий научный сотрудник. 140180 г. Жуковский, Московская область, ул. Жуковского, 1.

Караджи Вячеслав Георгиевич, кандидат технических наук, ООО ИННОВЕНТ, Генеральный директор, 111394, Москва, улица Мартеновская, 38.

Ведущая организация:

ЗАО ИЭМЭТ РЭП Холдинг, Санкт Петербург, пр. Обуховской обороны, д. 51 лит А, 192029.

Защита состоится «17» июня 2014г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.09 ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д.29, Главное здание, ауд. 118.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Автореферат разослан « » апреля 2014г.

Учёный секретарь

диссертационного совета Д 212.229.09

доктор технических наук, профессор

Хрусталёв Борис Сергеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Нестационарные процессы в центробежных компрессорах активно исследуются передовыми фирмами, вузами и научно-исследовательскими организациями, поскольку эти процессы являются основными причинами возникновения повышенных динамических напряжений и вибраций в элементах конструкции, ограничивают диапазон устойчивой работы компрессора и представляют большой научный интерес для изучения физической картины нелинейных явлений.

Исследования нестационарных процессов на натуральных и модельных установках - дорогостоящая процедура, требующая хорошей оснащённости стендов измерительной аппаратурой и высокой квалификации исследователей. Из-за технических ограничений, определяемых доступностью или сложностью размещения приборов (датчиков), особенно на вращающихся элементах ротора, получаемая информация имеет ограниченный характер. Некоторые величины затруднительно измерить из-за отсутствия соответствующих датчиков.

Применение технологий вычислительной гидродинамики позволяет решать задачи детального исследования нестационарных процессов в полном объёме практически в любом месте проточной части компрессора. Эти комплексы можно использовать для решения проблем аэродинамики нестационарных процессов в центробежном компрессоре. Применение вычислительных комплексов позволяет ставить задачу создания виртуальных стендов для исследования периодических нестационарных процессов в турбомашинах. Это особенно **актуально** для компрессоров магистральных газопроводов, а также для компрессоров общего назначения и компрессоров авиационных газотурбинных двигателей.

Степень разработанности темы. Исследования нестационарных процессов в турбомашинах, в том числе в центробежных компрессорах, - сложная задача. Сложность заключается как в необходимости применения малоинерционных измерителей физических величин, так и в самих процессах. Характерные масштабы времени процессов охватывают широкий диапазон от 10^{-6} до 10 секунд. Для обработки огромного количества информации требуется разработка и применение сложных многоканальных информационно-измерительных систем реального времени. Одновременное многоточечное измерение параметров нестационарного потока практически затруднительно. Экспериментальное

исследование некоторых видов нестационарных процессов затруднительно, поскольку высока вероятность поломок элементов конструкции.

Задачи нестационарной аэродинамики компрессоров ранее решались преимущественно для невязких течений. В работах Х. Эммонса, К. Пирсона, Х. Гранта, В.Н. Ершова, Г.С. Самойловича, В.Б. Курзина, В.Э. Сарена, Р. Дина, Я.Сеноо, Ф. Марбла и других отечественных и зарубежных исследователей решены отдельные частные задачи нестационарной аэродинамики турбомашин, в том числе задачи аэроупругости. Расчёт течения вязкого газа с применением теории пограничного слоя производился в работах В. Янсена. В работах Н. Кампсти и Р. Памприна рассмотрены некоторые аспекты современного состояния исследований нестационарных процессов в компрессорах.

На конференциях ASME, JSME проблемы нестационарной аэродинамики турбомашин рассматриваются на специальных секциях, отмечаются сложности экспериментального и теоретического исследования нестационарных процессов в турбомашинах. Созданные в последние десятилетия современные вычислительные комплексы (Fluent, STAR CD, Numeca и др.) позволяют решать некоторые проблемы нестационарной аэродинамики турбомашин. Однако в большинстве зарубежных работ представлены результаты расчётов, например, вращающегося срыва на основе решения стационарного уравнения Навье - Стокса. Для ускорения расчётов решение выполняется для одиночного канала решётки с последующим мультиплицированием результатов с учётом периодичности объекта (Abdelwahab, 2010; Biesinger, 2010; He, 2004; Trebinjac, 2011 и др.). Иногда при решении задачи с помощью программ, описывающих стационарное течение газа, к вращающемуся срыву относят эффекты численной неустойчивости, что приводит к результатам, существенно отличающимся от экспериментальных.

Использование современных достижений численной аэродинамики (CFD) накладывает свои ограничения. Дж. Дентон в докладе на конференции ASME (2010 г.) отмечает основные сложности при расчёте даже стационарного потока в турбомашинах с помощью CFD, в том числе проблемы задания граничных условий, применения моделей турбулентности и задачи ускорения вычислений. Существующие комплексы программ ориентированы на решение задач расчёта турбулентных течений, в то время как в центробежных компрессорах основную роль играют не только проблемы турбулентности, но и проблемы детерминированных

процессов типа "струя - след", а также вопросы определения границ появления нежелательных явлений типа вращающегося срыва. В задачах вычислительной гидродинамики применяются искусственные приёмы для переноса результатов расчёта из вращающейся системы координат (ротора) в абсолютную систему координат.

Современное состояние методов численной гидродинамики позволяет решать задачи нестационарной аэродинамики центробежных компрессоров с учётом эффектов движения вязкого газа в проточной части. Это позволяет ставить задачу создания виртуальных стендов, пригодных для исследования важных для практики и теории видов нестационарных процессов, в том числе детерминированных нестационарных процессов.

Цели и задачи исследования. Основными целями данной работы являются исследование возможностей вычислительного комплекса ANSYS CFX 12.0 с различными моделями турбулентности и соответствующих процедур для численного анализа нестационарного турбулентного течения в проточной части компрессора, а также сопоставление результатов расчёта с имеющимися экспериментальными данными, полученными как традиционными пневмометрическими измерителями, так и результатов исследования нестационарных процессов малоинерционными измерителями.

В процессе выполнения работы необходимо решить следующие задачи:

1. Создать на основе системы ANSYS CFX 12 виртуальный стенд для исследования нестационарных процессов в проточной части центробежного компрессора, позволяющий исследовать детерминированные нестационарные процессы, в частности, периодические пульсации типа «струя - след», предсрыв и вращающийся срыв.

2. С помощью вычислительного комплекса ANSYS CFX 12.0 с применением кластерных технологий провести численные расчёты трёхмерного нестационарного турбулентного потока в центробежном компрессоре на основе решения нестационарного уравнения Навье - Стокса (URANS). Расчёты выполнить по всей характеристике компрессора по всему углу охвата 2π .

3. Сопоставить результаты расчёта, полученные при испытании компрессора на виртуальном стенде, с результатами экспериментального исследования как медленно меняющихся величин, так и быстроменяющихся величин (пульсаций давления, измеренных с помощью малоинерционных датчиков давления, и пульсаций скорости, измеренных термоанемометром).

4. Исследовать влияние различных моделей турбулентности (SST, LES, RNG и SAS SST) на результаты расчётов.

5. Сформулировать выводы и рекомендации по проведению расчётов нестационарных процессов в центробежном компрессоре с помощью комплекса ANSYS CFX 12 (URANS).

Научная новизна определяется тем, что практически впервые в отечественной практике выполнено численное моделирование трёхмерного нестационарного турбулентного течения в проточной части центробежного компрессора с помощью современных гидродинамических программных пакетов (ANSYS CFX 12). Обнаружены закономерности некоторых детерминированных нестационарных процессов типа "струя - след", в частности, слабое затухание пульсаций скорости при распространении по безлопаточному диффузору. Сформулированы методические рекомендации по выбору опций, обеспечивающих достижение приемлемой точности результатов при использовании ANSYS CFX (URANS).

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в том, что показан вклад пульсаций давления и скорости в аэродинамику проточной части центробежного компрессора, что позволяет анализировать причины появления нежелательных динамических напряжений в элементах конструкций и повышенных вибраций опор и трубопроводов, используя, например, систему ANSYS Mechanical. Разработана методика проведения численного исследования нестационарного течения газа в ступени центробежного компрессора. Показано влияние моделей турбулентности на результаты решения нестационарного уравнения Навье - Стокса.

Вычислительная система типа ANSYS CFX 12.0 позволяет анализировать трёхмерную картину течения, получать полезную информацию практически в любом месте проточной части, в том числе во вращающихся рабочих колёсах, по всей характеристике компрессора как для стационарных параметров потока, так и для нестационарных аэродинамических величин. Таким образом, создан виртуальный стенд для исследования нестационарных процессов в компрессоре, при этом отсутствует загромождение проточной части измерителями параметров, что позволяет использовать такие стенды для исследования практически всех типов центробежных компрессоров. .

Методология и методы исследования. Предметом исследования в данной работе являются аэродинамические параметры и поля пульсаций аэродинамических величин в

рабочем колесе и неподвижных элементах проточной части центробежного компрессора, а также картины течения, полученные в ходе расчётов, и аэродинамические характеристики при трёхмерном течении турбулентного потока газа, включая нестационарные течения. Численное моделирование выполнено с помощью программного пакета ANSYS CFX 12.0, основанного на решении нестационарной осреднённой по числу Рейнольдса системы уравнений Навье - Стокса (URANS), с применением опции Transient method (неустановившийся интерфейс ротора-статора). При расчёте применена модель изменения шаблона (frame change model) [ANSYS, 2009] для нестационарного режима взаимодействия ротора-статора. Созданы области расчётов, построены гексагональные сетки соответствующих задаче типов (H, J, C, L и O), определены подходящие граничные условия, выбраны модели турбулентности, создана физическая модель для решения задачи расчёта трёхмерных нестационарных течений в центробежном компрессоре.

Положения, выносимые на защиту:

1. Концепция виртуального стенда центробежного компрессора и методика выполнения расчётов нестационарного потока с использованием CFX ANSYS 12 (URANS).
2. Полученные на виртуальном стенде результаты исследования нестационарных процессов по всей аэродинамической характеристике компрессора.
3. Сопоставление результатов расчёта и экспериментального исследования медленно меняющихся и нестационарных аэродинамических величин по всей характеристике компрессора - от максимального расхода до границы помпажа.

Степень достоверности и апробация результатов. Выполненные расчётные исследования нестационарных процессов на основе решения осреднённых по числу Рейнольдса нестационарных уравнений Навье – Стокса с помощью программного комплекса CFX ANSYS 12.0 (URANS) показали, что результаты численных расчётов удовлетворительно совпадают с экспериментальными данными как по осреднённым (стационарным), так и по нестационарным характеристикам потока по всей характеристике компрессора.

Вычисленные аэродинамические характеристики компрессора и поля полных давлений совпадают с экспериментально определёнными результатами пневмометрических исследований с неоднозначностью, не превышающей 5%. Вычисленные параметры детерминированных нестационарных процессов в основном количественно и качественно

совпадают с результатами экспериментального исследования с применением малоинерционных измерителей (датчиков давления и термоанемометров). Полученные результаты в целом соответствуют сложившимся физическим представлениям о характере нестационарных процессов в проточной части центробежного компрессора.

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на научной конференции студентов и аспирантов “XXXIX Неделя науки СПбГПУ” (СПб, 6 – 11 декабря 2010 г.), на XV международной научно-технической конференции по компрессорной технике (Казань, 19 - 20 июля 2011 г.), на международном симпозиуме ISUAAAT 13 (Токио, 3-9 сентября 2012 г.) и на международной конференции ASME Turbo Expo 2013 (Сан-Антонио, Техас, США, 3-9 июня 2013г.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 6 работ, в том числе 2 статьи в рекомендованном ВАК журнале «Компрессорная техника и пневматика» – 2011г., №№5 и 6, а также в докладах международного симпозиума ISUAAAT 13 (Токио, 2012) и международной конференции ASME Turbo Expo 2013 (Сан-Антонио, Техас, США, 2013 г.).

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы из 112 наименований. Материал изложен на 164 страницах и содержит 145 рисунков и 9 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы работы. Показана роль нестационарных процессов в компрессоре. Необходимость исследования нестационарных процессов в турбомашинах связана с задачами обеспечения надёжной работы компрессора, требующими решения проблем устойчивости компрессора, возникновения вращающегося срыва, а также определения параметров детерминированных нестационарных процессов, существующих на устойчивых режимах.

Подобного рода исследования требуют проведения дорогостоящих экспериментов, при этом затраты на выполнение эксперимента очень велики, особенно при необходимости проведения измерений на натуральных установках, поэтому в работе описан созданный виртуальный стенд для исследования нестационарных процессов на основе использования численных методов.

Глава 1 посвящена обзору отечественных и зарубежных исследовательских стендов. Показаны ограничения, накладываемые конструкцией стенда. Рассматривается классификация нестационарных процессов на основе функциональной схемы проточной части. Показаны основные результаты исследований нестационарных процессов на стендах. Рассмотрена методика измерения нестационарных параметров потока, приведены примеры расчётов с использованием методов вычислительной гидродинамики для исследования нестационарного потока в турбомашинах. Показана ограниченность экспериментальных исследований, сложность и трудоёмкость эксперимента. Виртуальный стенд позволяет определить эффекты взаимодействия течения в элементах проточной части. На данном этапе в виртуальном стенде рассматривается течение в упрощённой проточной части, образованной рабочим колесом и безлопаточным диффузором, течения в торцевых зазорах и протечки в лабиринтных уплотнениях не рассматриваются.

В главе 2 рассмотрены объекты и предмет исследования для создания виртуального стенда для изучения нестационарных течений в центробежном компрессоре. В качестве прототипа выбран экспериментальный модельный стенд ЭЦК-1М (рис. 1-а) лаборатории компрессоростроения ЛПИ (СПбГПУ) [Измайлов, 1987]. Для этого стенда имеется подробная документация, позволяющая построить геометрическую модель проточной части, а также все результаты испытаний с измерением пневмометрических и быстроменяющихся величин.

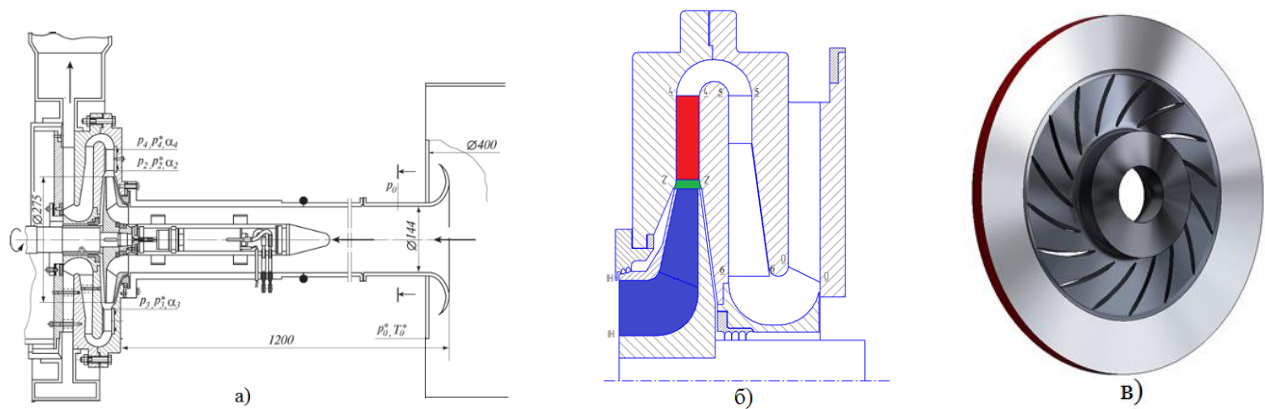


Рис. 1. Экспериментальный стенд ЭЦК-1М (а) [Кононов, 1985; Измайлов, 1987]; виртуальный стенд ЭЦК-1МН (б); трёхмерная модель (в).

В экспериментальной установке ЭЦК-1М исследованы нестационарные процессы в ступени, образованной рабочим колесом закрытого типа ($\beta_{л2} = 49^\circ$, $\beta_{л1} = 34^\circ$, $z = 16$, $b_2/D_2 = 0,0545$) и безлопаточным диффузором с параллельными стенками ($b_3/b_2 = 1,1$, $D_3/D_2 = 1,048$, $D_4/D_2 = 1,485$) [Кононов, 1985; Измайлов, 1987].

На рис. 1 приведены схемы: (а) экспериментальной установки ЭЦК-1М, (б) виртуального стенда ЭЦК-1МН и (в) трёхмерной модели исследуемой ступени. Расчётная область (рис. 1-б) ограничена рабочим колесом и безлопаточным диффузором и включает в себя вращающееся рабочее колесо (синий цвет), интерфейсную секцию (зеленый) и безлопаточный диффузор (красный).

В главе 3 рассмотрена методика вычислений. Приведены уравнения Навье – Стокса в нестационарной постановке (URANS), модели турбулентности и схемы дискретизации. Для построения геометрии объекта использовался ANSYS Blade Modeler в ANSYS Workbench. Приведены построенные вычислительные сетки на основе ANSYS Turbo Grid. Использована топология сеток H/J/C/L, а для профилей РК также O-Grid с коэффициентом ширины 0,5. Количество ячеек в области межлопаточного канала 1 968 360 узлов. Для всего угла охвата 2π общее количество узлов составляет 31 493 760. Проверка качества сетки выполнялась с помощью приложения Turbo Grid. Приняты граничные условия: на входе в расчётную область - полное давление (P^* , Па) и температура торможения (T^* , К), на выходе из расчётной области - массовый расход (\dot{m} , кг/с). Течение газа в зазорах между колесом и корпусом компрессора, а также протечки через лабиринтное уплотнения не моделируются. На стенках БЛД и на профилях РК принято нулевое значение скорости $u=0$. Поверхности стенок предполагаются адиабатическими и гидравлически гладкими.

При дискретизации неустановившейся схемы использовался обратный метод Эйлера второго порядка по времени, для процессов переноса и турбулентности использована схема дискретизации высокого разрешения, значение контроля сходимости коэффициента петли выбрано меньше 5. Расчёты производились с помощью суперкомпьютерных (кластерных) технологий по всему углу охвата 2π . Используются модели турбулентности: а) переноса напряжения сдвига (SST); б) крупных вихрей (LES); в) k- ϵ RNG; г) SAS SST. Установление принятого критерия сходимости (10^{-6}) происходило при расчётах выше 5-го оборота ротора (до 20-го оборота ротора). Необходимость расчётов по последовательным оборотам определялась особенностями интерфейса "неустановившийся ротор - статор" (Transient rotor - stator). Уровень интенсивности турбулентности принят равным 1%. При расчёте задавались длительность численного решения T и ΔT - шаг по времени. Конечное состояние времени моделирования определялось из условия $N \cdot \Delta T \geq T$, где N - номер шага по времени.

Приведены различные методы представления результатов: с использованием точки вычисления (рис. 2-б) и линий вычисления (turbo line) параметров потока (рис. 2-в).

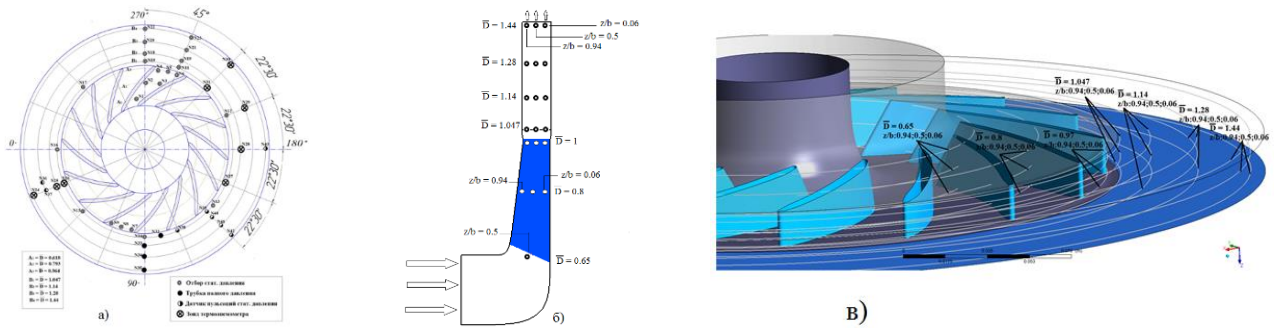


Рис. 2. Расстановка: (а) датчиков в РК и БЛД [Кононов, 1985; Измайлов, 1987], (б) точек и (в) линий вычисления в системе ANSYS CFX Pre.

В главе 4 приведены результаты вычислений для моделей турбулентности: SST, LES, RNG, SAS SST для всех режимов по характеристике ступени от максимального расхода до вращающегося срыва. Результаты сопоставления параметров потока приведены для моделей SST и LES. При $\varphi_0 = \varphi_{0\text{опт}}$ для моделей SST и LES статическое давление в БЛД представлено на рис. 3, пульсации $\bar{C}r$ при оптимальном расходе в БЛД представлены на рис. 4. Статическое давление в РК при вращающемся срыве показано на рис 5.

На входе в БЛД ($\bar{D} = 1,047$) видны отчётливые вращающиеся следы. По радиусу диффузора интенсивность пульсаций уменьшается по экспоненциальному закону, что соответствует экспериментальным данным [Кононов, 1985; Измайлов, 1987], на выходе диффузора ($\bar{D} = 1,44$) пульсации статического давления практически сглаживаются. Отсутствие фазового сдвига при распространении следов по диффузору показывает, что этот процесс эквивалентен распространению возмущений от пульсирующего источника.

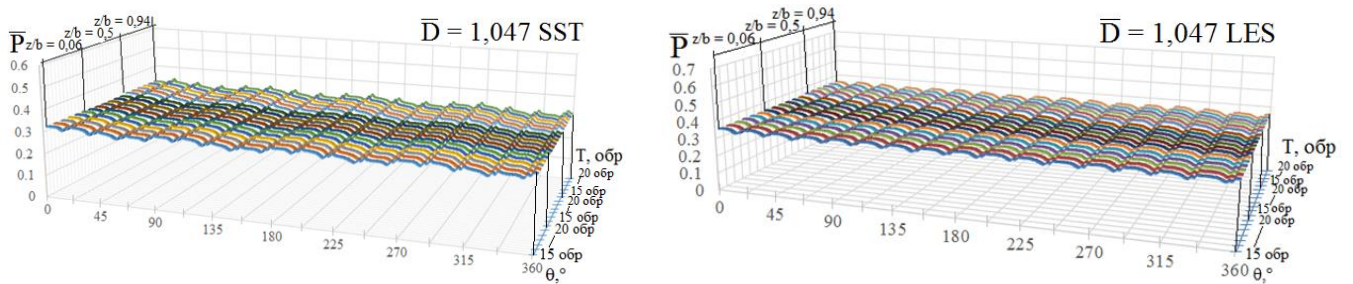


Рис. 3. Пульсации \bar{P} на входе БЛД ($\bar{D} = 1,047$) при $\varphi_0 = \varphi_{0\text{опт}}$, модели SST и LES.

Пульсации $\bar{C}r$ в БЛД на входе и выходе диффузора $\bar{D} = 1,047; 1,44$ при оптимальном расходе $\varphi_0 = \varphi_{0\text{опт}}$ (рис. 4), как и C_u , имеют периодический характер. В конце диффузора

пульсации $\bar{C}r$ малы, однако периодический характер флуктуаций сохраняется. Аналогичная картина получена при экспериментальном исследовании потока с помощью термоанемометра [Кононов, 1985; Измайлов, 1987]. Отчётливо видно, что теоретические предположения Дина/Сеноо и Джонстона/Дина [Dean, 1960] о быстром смешении течения «струя - след» не подтверждаются.

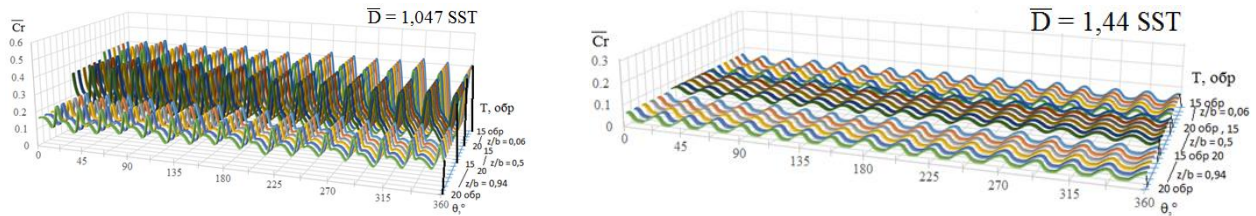


Рис. 4. Пульсации $\bar{C}r$ на входе и выходе БД ($\bar{D} = 1,047$; $\bar{D} = 1,44$) при $\varphi_0 = \varphi_{0\text{опт}}$, модели SST.

На рис. 5 показаны пульсации трёхзонного вращающегося срыва в виде бегущей волны, демонстрирующей сдвиг фаз из-за перемещения зон срыва относительно колеса. Интенсивность пульсаций достигает значений $0,5\text{ру}_2^2$. Фазовый сдвиг пульсаций давления, как показано в главе 5, позволяет определить угловую скорость перемещения зон срыва.

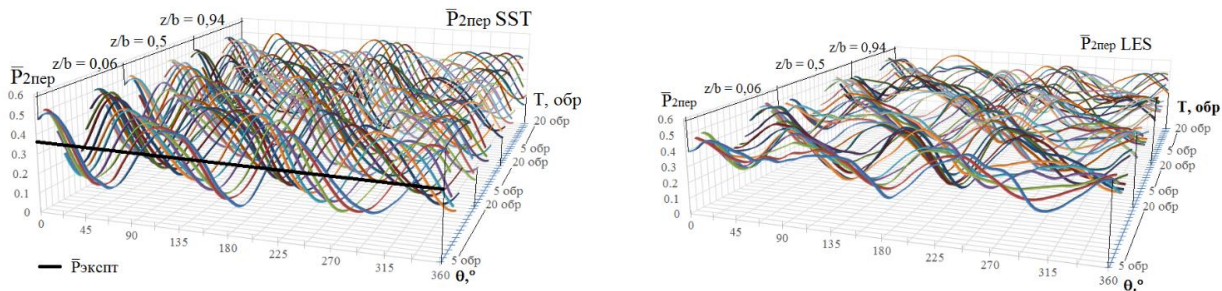


Рис. 5. Пульсации \bar{P} на периферии РК ($\bar{P}_{2\text{пер}}$) при $\varphi_0 = \varphi_{0\text{вр.ср}}$, модель SST и LES.

При переносе результатов расчёта с использованием интерфейса “Transient rotor-stator” из вращающегося рабочего колеса в неподвижные элементы для процессов с двумя некрратными частотами ($\omega_{\text{рот}}$ и $\omega_{\text{вр.ср}}$) получаются физически неправдоподобные значения периода пульсаций вращающегося срыва в абсолютном движении. На входе в диффузор наблюдаются интенсивные вращающиеся следы. На осциллограммах заметен сдвиг фаз, связанный с перемещением зон срыва по окружной координате.

Вращающиеся следы за рабочим колесом (рис. 6-а) хорошо заметны до диаметра $\bar{D} = 1,14$, далее при движении по диффузору следы ослабевают. Минимальное значение пульсаций соответствует области следа у задней стороны лопатки колеса. Фазовый сдвиг пульсаций показывает, что вращающиеся следы распространяются по направлению

основного потока. При вращающемся срыве отрыв перебрасывается на заднюю стенку диффузора (рис. 6-б).

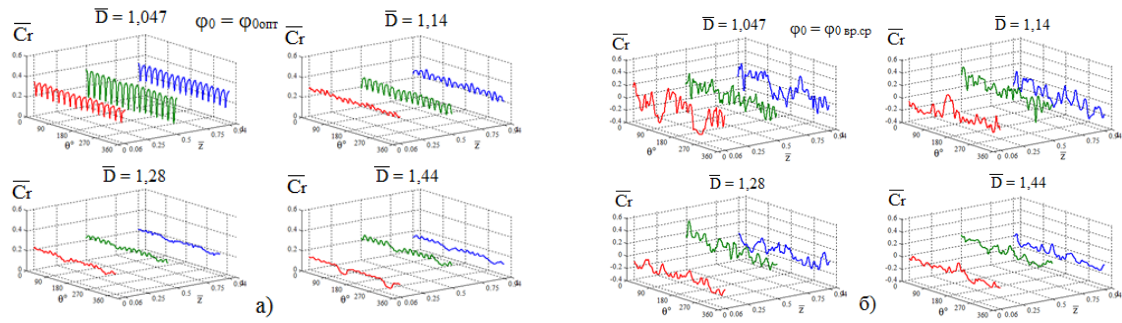


Рис. 6. Пульсации \bar{C}_r в БЛД, $z/b=0,06; 0,5; 0,94$, $\varphi_0 = \varphi_{0\text{ опт}}$ (а) и $\varphi_0 \text{ вр.сп}$ (б), модель LES.

На рис. 7 показано мгновенное распределение статического давления в РК и БЛД. Данная картина иллюстрирует сложный характер нестационарного процесса.

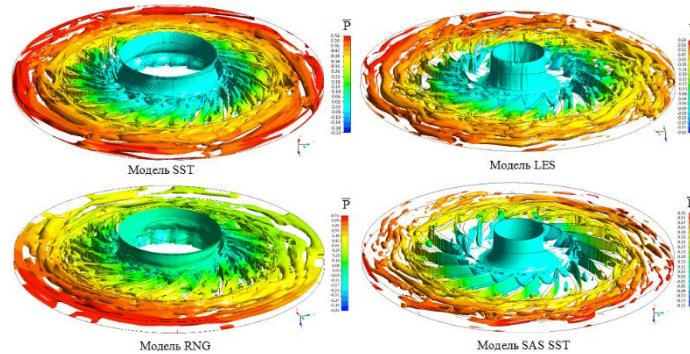


Рис. 7. Трёхмерное поле статических давлений при разных моделях турбулентности.

В главе 5 представлено сопоставление рассчитанных и экспериментальных характеристик рабочего колеса и ступени по статическим и полным параметрам (рис.8). Совпадение характеристик удовлетворительное, расхождение не превышает 5%. Форма характеристик воспроизводится достаточно хорошо.

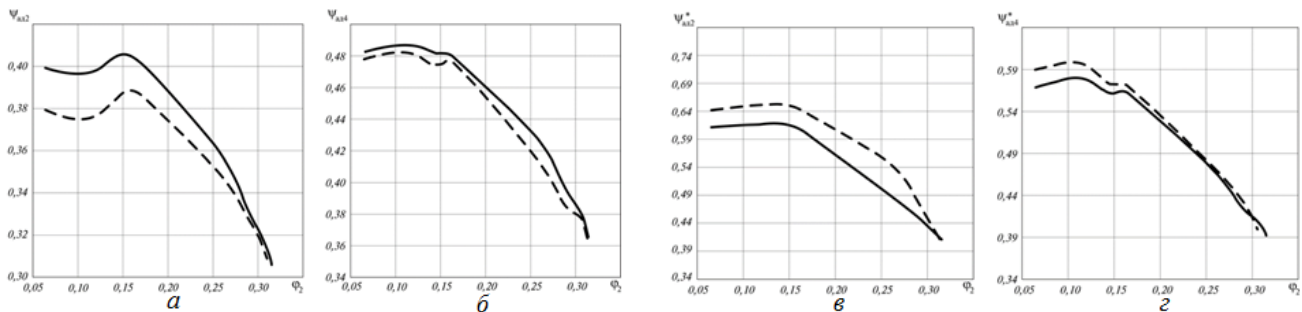


Рис. 8. Экспериментальные [Кононов, 1985; Измайлов, 1987] (—) и рассчитанные (- - -) характеристики по статическим параметрам: а) – рабочего колеса; б) – ступени; по полным параметрам: в) – рабочего колеса; г) – ступени.

На рис. 9 представлено сопоставление экспериментальных данных, полученных измерениями малогабаритными трубками полного давления [Кононов, 1985; Измайлов, 1987] (рис.9-а, в), и результатов численных расчётов (рис.9-б, г) полей полных давлений по ширине безлопаточного диффузора в сечениях 2'–2' (на входе в БЛД) и 4'–4' (в конце диффузора). Экспериментальные и вычисленные распределения весьма близки не только по форме, но и по значениям. На режимах $\varphi_2 = \varphi_{2вр.ср}$ наблюдается падение давлений вблизи стенки диффузора, что свидетельствует о появлении обратных токов.

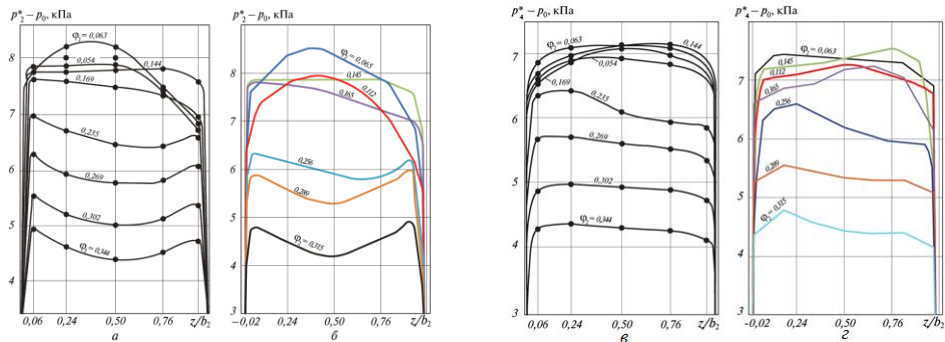


Рис. 9 Распределения полных давлений по ширине БЛД, сечение 2'–2': (а) эксперимент, (б) численный расчёт; сечение 4'–4': (в) эксперимент [Кононов, 1985; Измайлов, 1987], (г) численный расчёт.

На рис. 10 для режима вращающегося срыва ($\varphi_{2вр.ср} = 0,065$) представлены экспериментальные данные [Кононов, 1985; Измайлов, 1987] и результаты численных расчётов изменения во времени абсолютных скоростей в трёх сечениях по ширине диффузора ($z/b_3 = 0,06; 0,5; 0,94$) на основе моделей SST и LES. Видно, что на обеих стенках возникают зоны обратного течения, а в ядре потока эти зоны занимают незначительную долю окружности. Общий характер явления воспроизводится численным расчётом, заметны зоны обратных токов преимущественно у стенок диффузора.

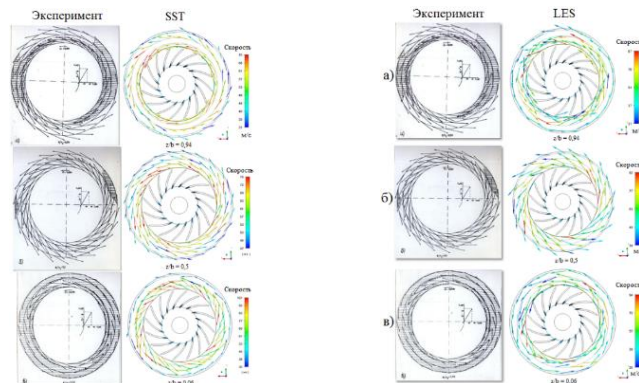


Рис. 10. Экспериментальные [Кононов, 1985; Измайлов, 1987] и рассчитанные скорости в БЛД при $\varphi_{2вр.ср} = 0,065$ в сечениях: а) $z/b = 0,06$; б) $z/b = 0,5$; в) $z/b = 0,94$.

На рис 10 показаны распределения мгновенных абсолютных скоростей в диффузоре в среднем по ширине сечения и у стенок диффузора. Общий характер пульсаций для различных моделей турбулентности совпадает. В ядре потока преимущественное направление скорости – положительное, а на стенках, как и в эксперименте, образуются зоны обратных токов, т.е. видно, что вращающийся срыв возникает из-за отрыва потока в пограничном слое у стенок диффузора. В табл. 1 представлено сопоставление параметров расчётов и экспериментальных данных [Кононов, 1985; Измайлов, 1987] вращающегося срыва для различных моделей турбулентности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено комплексное исследование нестационарных аэродинамических процессов в центробежном компрессоре в широком диапазоне режимов, выполненное с применением программ пакета ANSYS CFX 12, основанного на решении нестационарной осреднённой по числу Рейнольдса системы уравнений Навье - Стокса (URANS).

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Создан виртуальный стенд для исследования нестационарных процессов в проточной части центробежного компрессора на основе системы ANSYS CFX 12, позволяющий исследовать в широком диапазоне расходов (от максимального значения до помпажа) детерминированные нестационарные процессы, в частности, периодические пульсации типа «струя – след», предсрыв и вращающийся срыв.
2. С помощью вычислительного комплекса ANSYS CFX 12, использующего кластерные технологии, проведены численные расчёты трёхмерного нестационарного турбулентного потока в центробежном компрессоре по всей характеристике компрессора на основе решения нестационарного уравнения Навье – Стокса (URANS). Расчёты выполнены по всему углу охвата 2π.
3. Результаты расчётов, полученные при испытании компрессора на виртуальном стенде, сопоставлены с результатами экспериментального исследования как по медленно меняющимся величинам, так и по измерениям быстроменяющихся величин (пульсаций давления, измеренных с помощью малоинерционных датчиков давления, и пульсаций скорости, измеренных термоанемометром). Получено удовлетворительное совпадение

качественных и количественных параметров, а также границ возникновения вращающегося срыва.

4. Исследовано влияние различных моделей турбулентности (SST, LES, RNG и SAS SST) на результаты расчётов. Показана применимость моделей SST, LES и RNG.

5. Сформулированы выводы и рекомендации по проведению расчётов нестационарных процессов в центробежном компрессоре с использованием комплекса ANSYS CFX 12.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, входящих в перечень ВАК:

1. Лопулалан, Х.Д. Численное моделирование нестационарного течения в ступени центробежного компрессора / Р.А Измайлов, Х.Д. Лопулалан, Г.С. Норимарна// Компрессорная техника и пневматика – 2011, № 5. –С. 10-15.

2. Лопулалан, Х.Д. Виртуальный стенд для исследования нестационарных процессов в ступени центробежного компрессора / Р.А Измайлов, Х.Д. Лопулалан, Г.С. Норимарна// Компрессорная техника и пневматика – 2011, № 6. –С. 47-52.

Публикации в трудах международных конференций:

3. Лопулалан, Х.Д. Расчёт нестационарного течения в ЦК с помощью программного комплекса ANSYS Workbench CFX / Х.Д. Лопулалан, Г.С. Норимарна / XXXIX Неделя науки СПбГПУ Секция «Компрессоростроение» (СПб, 6 – 11 декабря 2010 г.), № 15.

4. Лопулалан Х.Д. Численное моделирование нестационарного процесса в ступени центробежного компрессора / Р.А Измайлов, Х.Д. Лопулалан, Г.С Норимарна/ XV Международная научно-техническая конференция по компрессорной технике 18-20 Июля 2011, г. Казань, Россия. том 2 - С. 260-268.

5. Lopulalan H.D. Unsteady flow in centrifugal compressor numerical modelling and experimental investigation / R.A. Izmailov, H.D. Lopulalan, G.S. Norimarna / ISUAAAT-13-S7-1 Tokyo, Japan, 2012. pp. 55-56.

6. Lopulalan, H.D. Unsteady flow modeling using transient rotor – stator interface / R.A. Izmailov, H.D. Lopulalan, G.S. Norimarna / Proceedings of ASME Turbo Expo 2013 GT2013-95788 June 3-7, 2013, San Antonio, Texas, USA. pp. 1-8.