

**БРЫКИН БОРИС ВИТАЛЬЕВИЧ**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЗДУШНЫХ УПЛОТНЕНИЙ  
ГТД МЕТОДАМИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ**

Специальность 05.07.05

«Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных  
аппаратов»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва- 2012

Работа выполнена в Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете) (МАИ).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Леонтьев Михаил Константинович

Официальные оппоненты:

Белоусов Анатолий Иванович – доктор технических наук, заслуженный деятель науки и техники РСФСР, профессор, Самарский государственный аэрокосмический университет (национальный исследовательский университет), кафедра конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов, профессор;

Чупин Павел Владимирович – кандидат технических наук, ОАО «НПО «Сатурн», начальник ОКБ-1.

Ведущая организация: ОАО «Московское машиностроительное предприятие имени В.В. Чернышева».

Защита состоится «8» апреля 2013 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.08, созданного на базе Московского авиационного института (национального исследовательского университета) по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.125.08  
доктор технических наук, профессор

Ю.В. Зуев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации** определяется необходимостью совершенствования турбомашин с целью повышения их эффективности за счет оптимизации характеристик воздушных щелевых лабиринтных уплотнений (ЛУ) и решения задач общей динамики ротора газотурбинного двигателя в целом. Кроме того, в настоящее время на большинстве предприятий авиадвигателестроения используются методики расчёта уплотнений, основывающиеся на экспериментальных коэффициентах, при этом развитие инструментов компьютерного моделирования позволяет проводить численные эксперименты с высоким уровнем точности и скорости.

Так, например, в общей практике проектирования всё шире применяется пакет ANSYS CFX для газодинамических и тепловых инженерных расчётов, но отсутствуют методики, учитывающие специфику расчетов ЛУ, и в стандартную комплектацию пакета не входят верификационные примеры расчёта уплотнений.

Дополнительной актуальной особенностью работы является использование экспериментально-методических данных, основанных на работах Серкова С.А. и Петрунина Б.Н. (МЭИ) с использованием установки «Динамическая модель уплотнения», которые к настоящему моменту ещё не были привлечены к проверке и верификации современных расчётно-теоретических методик, опирающихся на методах вычислительной газовой динамики. Совершенствование методик расчёта динамических свойств уплотнений является актуальной научной проблемой.

**Цель и задачи исследований.** Целью работы является разработка методики трёхмерного моделирования уплотнения произвольной конфигурации, получение его расходных и динамических характеристик с набором исходных данных, располагаемых при проектировании уплотнения. В конечном итоге, методика должна позволить осуществить расчётно-теоретическое исследование ЛУ авиационного двигателя (АД) для успешного проектирования его узлов и систем в целом.

В ходе работ были решены задачи:

1. Отработана методика получения гидравлических характеристик осесимметричных уплотнений на основе упрощённых двухмерных плоских моделей;
2. Проведено сравнение полученных расчётных данных по гидравлическим характеристикам уплотнений с имеющимися расчётными данными более простых методик и экспериментальными замерами;
3. Осуществлена экспериментальная проверка методики расчёта динамических характеристик уплотнений на основе имеющихся экспериментальных работ;
4. Полученная методика была использована для определения характеристик уплотнения на изделии.

**Методы исследования.** При решении поставленных задач использованы пакеты для численных расчётов в сфере механики сплошной среды и, конкретно - аэрогазодинамики, реализованные на базе коммерческого программного обеспечения ANSYS CFX, используемого на предприятии НТЦ им. А. Люльки в качестве основного средства расчёта для инженеров.

В ходе расчётов интенсивно использовались современные мощные компьютеры и мини-кластеры.

**Научная новизна.** Впервые в отечественной практике исследован вопрос трёхмерного моделирования работы уплотнения в условиях его эксцентриситета и прецессии с использованием методов вычислительной газовой динамики (ВГД).

Для расчета уплотнений был использован пакет численных расчётов, позволяющий на основе модели сплошной среды, описываемой уравнениями Навье-Стокса и моделями турбулентности, рассчитать распределение давления по поверхности ротора и далее вычислить значение возмущающей аэродинамической силы.

В осуществлённом расчёте не применялись коэффициенты или какие-либо данные, полученные из ранее проведённых экспериментов — комбинация задаваемых граничных условий максимально приближена к исходным данным, необходимым для проектирования уплотнения.

***На защиту выносятся следующие положения:***

- 1) Методика расчёта гидравлических характеристик уплотнений;
- 2) Методика определения динамических характеристик уплотнений по распределению давления.

***Практическая ценность работы:***

- 1) Разработанная методика используется НТЦ им. А. Люльки для проведения собственных расчётов расходных характеристик уплотнений и разработки перспективных уплотнительных устройств;
- 2) Отработанная методика расчёта позволит определять динамические характеристики лабиринтных уплотнений и учитывать вклад аэродинамических сил, возникающих в них, на динамические свойства системы;

***Реализация результатов работы:***

- 1) Расчётные методики были использованы при решении задач всероссийского конкурса «Двигатели XXI века», проводимого ОПК "ОБОРОНПРОМ в 2010 году.
- 2) Расчётные методики применялись при разработке уплотнения для ПАК ФА.

### ***Достоверность результатов работы подтверждается:***

- 1) использованием фундаментальных положений газовой динамики;
- 2) применением сертифицированных программных средств для численных расчётов задач механики сплошной среды;
- 3) согласованием расчётных данных с результатами натуральных экспериментов, по всем исследуемым свойствам уплотнений: гидравлическим и динамическим характеристикам;

***Апробация.*** Результаты работы докладывались на Научно-техническом совете “НТЦ им. А.Люльки ОАО “Сатурн”, а также следующих конференциях:

- 1) Международной научно-технической конференции “Авиация и космонавтика”, г. Москва, 2010 г;
- 2) МАКС 2010, конкурс "Двигатели XXI века "ОПК" ОБОРОНПРОМ;
- 3) Международной научно-технической конференции “Авиация и космонавтика”, г. Москва, 2011 г;
- 4) V Всероссийская научно-техническая конференция молодых специалистов, Уфа, УМПО 2011 г.
- 5) Международной научно-технической конференции “Авиация и космонавтика”, г. Москва, 2012 г;

***Публикации.*** По теме диссертации опубликовано 5 печатных работ, в том числе 2 статьи в журналах, рекомендованных ВАК для публикации основных научных результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата наук

#### ***Структура и объем работы.***

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, выводов к главам, общих выводов и заключения. Список литературы включает 70 наименований. Диссертация изложена на 125 страницах, содержит 62 рисунка и 10 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

***Во введении*** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, отражены научная новизна, практическая ценность и результаты реализации, приведены научные положения, которые выносятся на защиту.

***В первой главе*** выполнен подробный обзор теоретических и экспериментальных работ, посвященных исследованию расходных и динамических характеристик авиационных уплотнений.

Первая работа, связанная с исследованием уплотнений турбонасосных агрегатов и их устойчивостью была опубликована Ломакиным А.А. в 1955 году. В работе было показано, что радиальная гидростатическая сила, возникающая при смещении ротора, может быть направлена в сторону увеличения эксцентриситета. Изучением характеристик воздушных щелевых лабиринтных уплотнений занималось большое количество исследователей. В отношении уплотнений авиационных двигателей, открытие сил, связанных с

прецессией ротора в случае сжимаемой среды было сделано Элфордом в 1965 году. Он установил, что возмущающая сила в лабиринтном уплотнении газотурбинного двигателя возникает в случае превышения площади сечения повышенного давления по отношению к выходному сечению уплотнения в области пониженного давления и вызвана наличием вихря, направленного в сторону вращения ротора. В случае, когда входное сечение меньше выходного, возмущающих сил не возникает. Элфорд в основном опирался на изучение конкретных случаев выхода двигателя из строя, другими словами, его работы можно характеризовать как целиком экспериментальные.

Глубокие исследования экспериментально-теоретического характера лабиринтных уплотнений паровых турбин были выполнены в МЭИ в период с 1970-1990х гг. К этому периоду относятся статьи Костюка А.Г., посвящённые теоретическому расчёту аэродинамических сил в уплотнении, диссертационные работы Серкова С.А. и Петрунина Б.Н. Последняя работа была защищена в 1991 году и посвящалась экспериментальным замерам параметров вихря в камерах лабиринтного уплотнения, необходимых для расчётов согласно усовершенствованной теории Костюка А.Г., используемой на кафедре паровых и газовых турбин по сей день. При высокой оценке апробированной теории и разработанной экспериментальной базы, следует отметить, что для приведённых работ характерен общий недостаток теоретических исследований, проведённых до 1990-х гг. - методики расчёта так или иначе опираются на совокупность данных, полученных экспериментальным путём. Это может накладывать серьёзные ограничения на разработку нетрадиционных моделей уплотнений на этапе проектирования новой техники.

В период 1990-2000 гг, в связи с существенным развитием вычислительной техники, появилось множество программных средств и возможностей для реализации сложных компьютерных вычислений. Это отразилось на разнообразии разработанных кодов для расчёта характеристик лабиринтных уплотнений. Основным мотивом к такому широкому исследованию уплотнительной техники послужили выигрыш в экономичности двигателей и улучшение их характеристик. В дополнение к уже разработанным на рубеже 80х-90х гг. SPIRALG, ICYL, GCYL в рамках американского расчётного комплекса INDSEAL для промышленных расчётов уплотнений появились GCYLT, IFACE, GFACE, SPIRALI, DYSEAL, и KTK. Научная программа SCISEAL включала возможность расчёта сопряжённого теплообмена, мультидоменов с элементами роторной динамики. Особенностью SCISEAL являлось то, что она была апробирована в 33 тестах в Центре Льюиса, включая различные варианты расчёта присоединённых областей уплотнений турбонасосного агрегата главного двигателя "Шаттла" и четырёхступенчатой турбины Allison T-56/50 1D.

С начала 2000 годов по настоящее время, исследования уплотнений в США в большой степени переориентировались на новые типы устройств: пальчиковые, лепестковые, щёточные, гидростатические щёточные, сотовые, истираемые лабиринтные уплотнения. Исследования различных лабиринтных и щелевых уплотнений до сих пор проводятся в Университете Техаса (A&M

Texas University). В качестве расчётных программ в Университете Техаса, помимо собственных разработанных программных средств, широко используется расчётный комплекс ANSYS CFX.

На основе анализа развития теоретических представлений об эффектах, возникающих в лабиринтных уплотнениях, изучения экспериментальных исследований, была сформулирована и поставлена задача расчёта характеристик воздушного лабиринтного уплотнения, и экспериментальной проверки результатов расчёта.

**Вторая глава** посвящена разработке методики расчёта лабиринтного уплотнения, изложенной в априорной форме.

В главе приведены основные теоретические положения и уравнения механики сплошной среды на которых основаны все модели, создаваемые в препроцессоре ANSYS CFX, выработаны требования к математическим моделям на этапе их создания. Схематично, последовательность решения задачи разбивается на три больших этапа (см. рис. 1): сбор исходных данных и подготовка модели, решение задачи, обработка результатов.

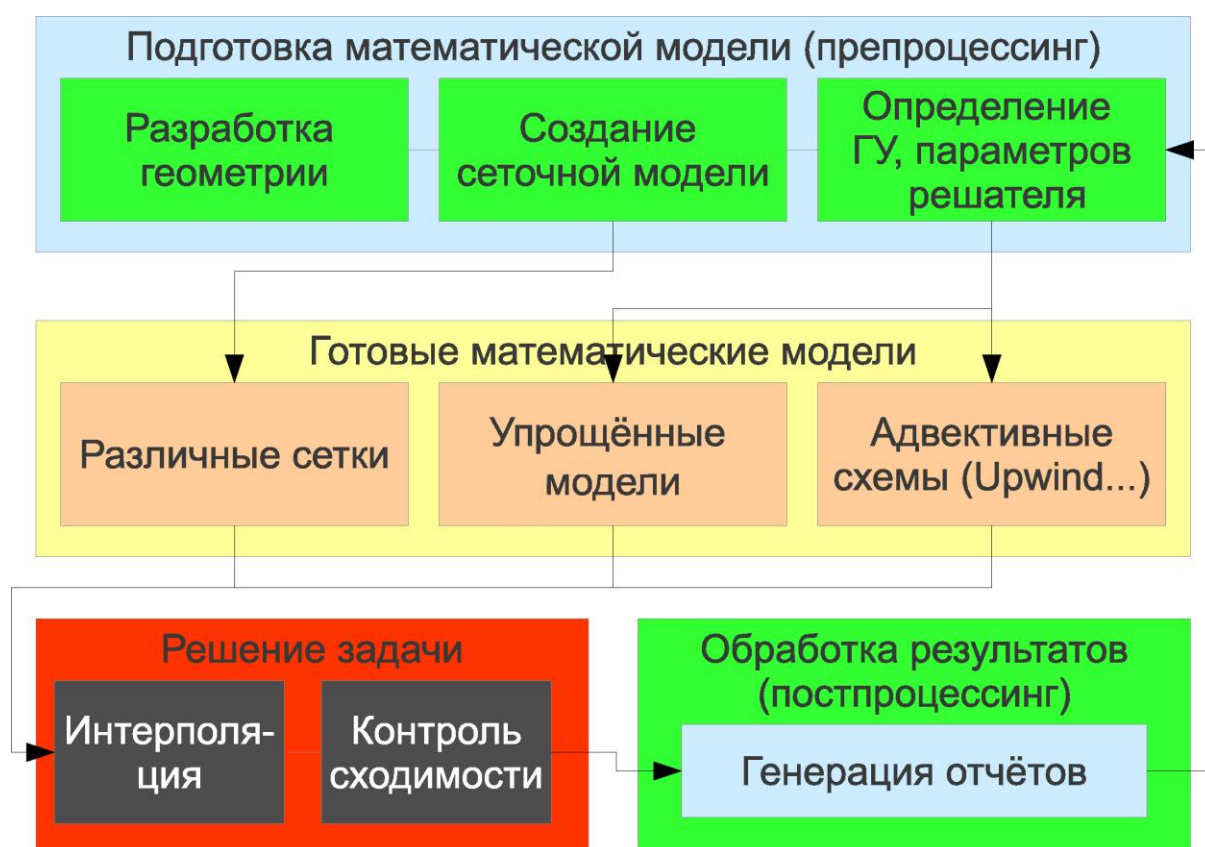


Рис. 1. Схема основных этапов построения математической модели

Решение задачи и отработка математической модели могут иметь обратную связь, выражающуюся в создании более подробных сеток, применении иных моделей турбулентности и моделей МСС вообще (например, изотермический поток, или дополнительное включение уравнения полной энергии).

Система уравнений Навье-Стокса в ANSYS CFX дискретизируется по пространству с привлечением метода конечных объёмов. Замыкание системы

уравнений при расчёте турбулентных течений обеспечивается с помощью моделей турбулентности. В настоящей работе предпочтение было отдано расчётам с использованием моделей *SST* и *k-ε*. Расчёт с помощью данных моделей турбулентности является менее требовательным к вычислительным ресурсам и может быть реализован в рамках современной инженерной методики расчёта турбулентных течений. При относительной простоте определения математической модели в ANSYS CFX, выделяются несколько важных этапов расчёта, которые имеют значение при той или иной степени подробности модели:

1. Получение сеточно-независимого результата;
2. Использование адвективной схемы соответствующего порядка (для задач термодиффузии допустимы схемы Upwind, но для газодинамических необходимо использовать High Resolution);
3. Выбор граничных условий в “облегчённых” моделях – в CFX реализованы типы граничных условий выхода Outlet и Opening. Было установлено, что использование ГУ Opening математически эквивалентно “нулевому градиенту” и в случае моделирования уплотнения без присоединённых областей, установка такого ГУ предпочтительна из-за наличия разрежённой области вблизи выхода домена.

**В третьей главе** приводятся результаты расчётно-теоретических работ, выполненных в качестве независимого исследования, аналогичного работе Б.Томпсон, проведённой в Виргинском Политехническом Институте в 2009 году. В ходе работ были апробированы основные этапы расчёта с методической точки зрения, а также был верифицирован комплекс ANSYS CFX на простой задаче течения газа в щелевом уплотнении (рисунок 2).

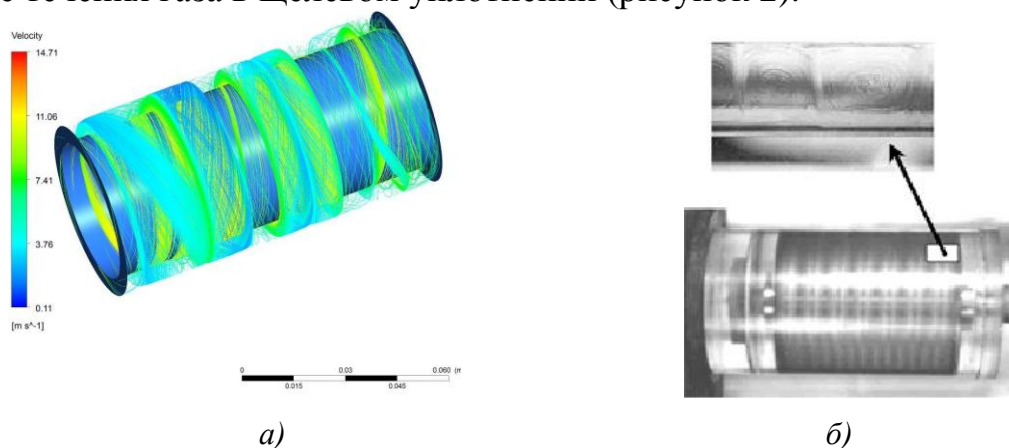


Рис. 2. Течение газа в щели: расчёт (а) и эксперимент (б)

В упомянутой работе Б. Томпсон исследовалось модифицированное лабиринтное уплотнение American Petroleum Institute (API), являющееся стандартным уплотнением используемым в нефтегазовой отрасли США (рисунок 3(а)). При моделировании данного уплотнения были использованы области, представляющие как сегмент осесимметричной геометрии, так и полный круг с эксцентриситетом.



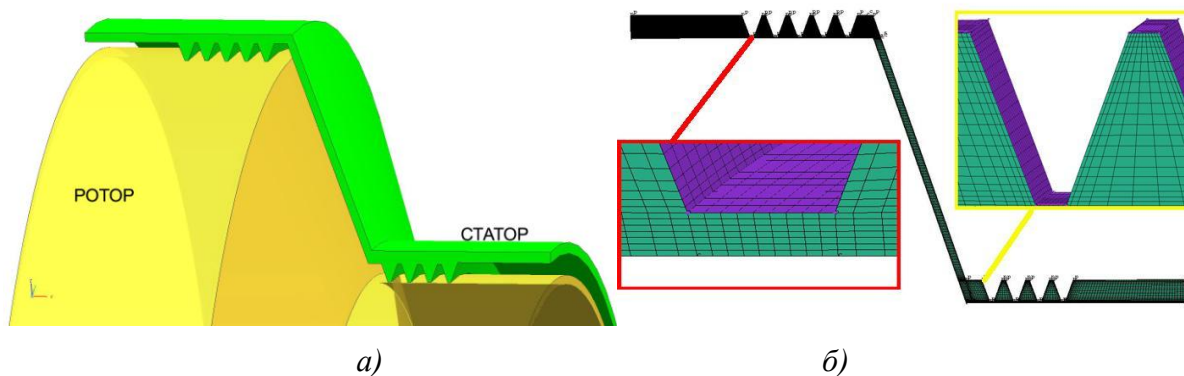


Рис. 3. Геометрическая модель уплотнения API (а) и расчётная сетка (б)

При моделировании уплотнения API (рис. 3 а,б), были получены существенные расхождения по сравнению с результатами Б. Томпсон (1,5-2 раза). Результаты нормальной (проекция Y) и касательной сил (проекция Z), приведены на рисунке 4. В качестве критических замечаний можно привести отсутствие в работе точных данных о сеточной дискретизации, и отсутствие физико-математических обоснований аппроксимации окружной неравномерности поля давления полиномиальной зависимостью (из-за неравномерной сетки).

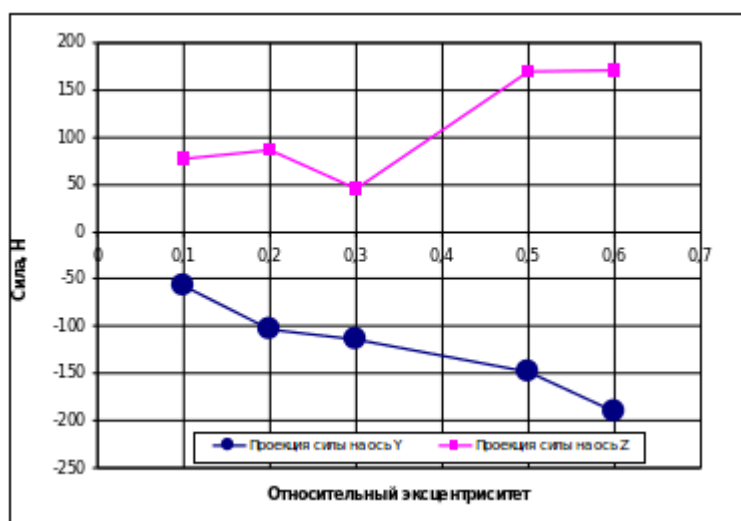


Рис. 4. График изменения аэродинамических сил от эксцентриситета

Критическое рассмотрение работы Б. Томпсон обозначило необходимость поиска различных расчётно-экспериментальных или чисто экспериментальных методик моделирования уплотнений.

**В четвертой главе** приводятся использованные в работе экспериментальные данные, полученные на уникальной установке "Динамическая модель уплотнения" (ДМУ) в Московском Энергетическом Институте (рисунок 5).

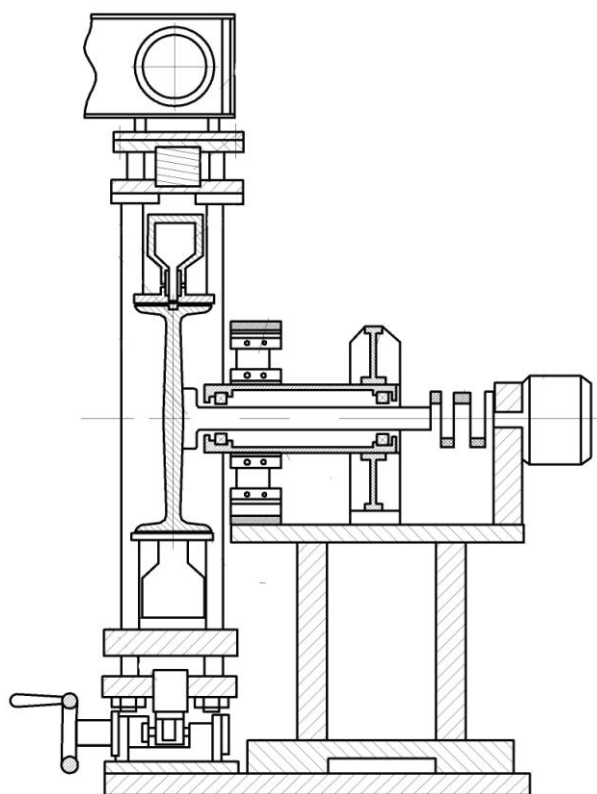


Рис. 5. Общий вид установки ДМУ

В главе производится выбор основного источника экспериментальных данных, приводится общий вид установки, схема расположения датчиков.

Большое место в данной части работы уделено непосредственно экспериментальным данным, полученным в работе Серкова С.А. и комментариям к определённым закономерностям, выявленным в ходе экспериментального исследования и имеющим значение для построения математической модели расчёта и обработки результатов расчётов. Также, в ходе исследования была решена задача реинжиниринга установки.

**В пятой главе** излагаются непосредственно особенности разработанной методики расчёта в приложении к выбранной двухпоточной модели трёхгребенчатого лабиринтного уплотнения на стенде ДМУ МЭИ.

Логически глава состоит из нескольких последовательных частей, отражающих последовательность осуществления подготовки и расчёта математической модели лабиринтного уплотнения: постановку задачи моделирования работы стенда в максимально приближенных к реальности условиях, но с учётом некоторых упрощений (сектор  $12^\circ$  — по количеству профилей направляющего аппарата — 30 шт.); моделирование работы уплотнения с эксцентриситетом (полный круг  $360^\circ$ ), с описанием необходимого упрощения задачи и рассмотрением следствий данных упрощений.

В первом приближении рассматривалась модель без учета эксцентриситета с заданием осевой симметрии исходной геометрической области расчёта. Такой подход позволил существенно сэкономить вычислительные ресурсы для моделирования соплового направляющего аппарата перед входом в уплотнение, и выходного участка, имитирующего истечение рабочего газа в атмосферу (см. рис. 6).

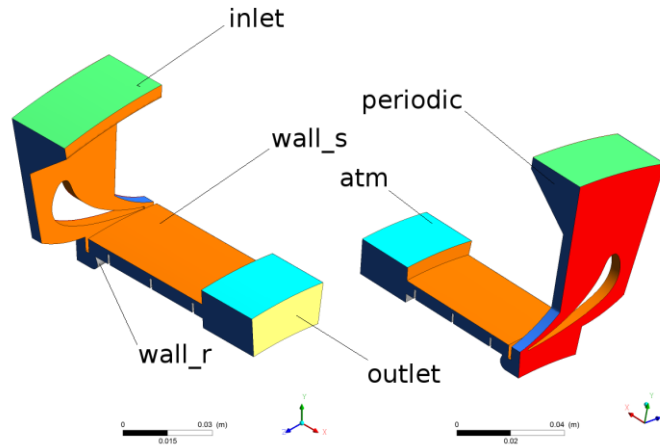


Рис. 6. Расчётная область с граничными условиями

На входе в расчётную область «полной» модели задавалось статическое давление, измеряемое в каждом эксперименте ( $P_0$ ), в зависимости от которого строились силовые характеристики уплотнения в каждом случае. На выходе — условие атмосферы, эквивалентное работе стенда. Присоединённая область в данном случае являлась необходимой, так как размеры уплотнения и особенности течения не позволяли физически обоснованно задать сечение на выходе третьей камеры в качестве выходного. Заданные в случае полной модели граничные условия приведены в таблице 1.

Таблица 1. Граничные условия модели с СА

Вход (inlet)	$P=20000$ Па	$T^*=300$ К
Атм-ра (atm)	Rel. Press = 0 (Па)	$T=300$ К
Выход (outlet)	Rel. Press = 0 (Па)	-
Ротор (wall-r)	$n = 3000$ об/мин	-

В ходе расчётов было проведено исследование чувствительности решения по отношению к сеточной дискретизации (см. таблицу 2 параметров сеток): размеру и распределению элементов, и, наиболее важному при моделировании турбулентных течений качественному параметру сетки - количеству призматических слоёв в пограничном слое.

Таблица 2. Параметры сточных моделей

Сетка	Кол-во эл-ов, млн.	$y+max$	Модель турбулентности
Сетка 1	0,93	67,7	k epsilon
Сетка 2	1,12	14,8	SST
Сетка 3	2,53	14,8	SST
Сетка 4	2,97	3,8	SST
Сетка 5	3,48	0,93	SST

Распределения статического давления по стенке статора приведены на рисунке 7.

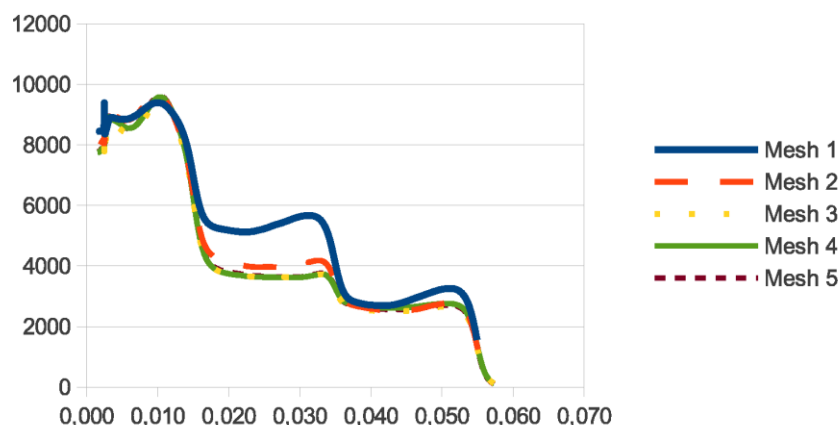


Рис. 7. Распределение давления на стенке статора в проточном сечении

В соответствии с проведёнными вычислениями, устойчивость решения по полю статического давления, достигается уже при параметрах  $y^+_{\max}=14,8$ . Несмотря на то, что данная сетка тестировалась с применением модели *SST*, в силу специфики данной модели, допустимо проводить расчёты на *k-ε* модели.

Соответствие расчётных данных при моделировании установки с сопловым аппаратом подтверждалось экспериментальными данными, полученными при нулевом эксцентриситете.

В таблице 3 представлены результаты расчётов и осреднённые по окружности значения давлений для ротора без учета эксцентриситета. В таблице 4 те же результаты представлены в виде расхождений в процентном отношении.

Таблица 3. Результаты расчётов модели с СА, и модели полного круга

	P1, Па	P2, Па	P3, Па	RMS
Эксперимент	9000	3750	2000	-
Upwind	11430	7291	3962	1e-5
Blend Factor 0.5	11010	6668	3224	1e-4
High Resolution(12 <sup>0</sup> , tetra)	8061	4367	2025	1e-3
High Resolution(FC,hexa)	7136	4183	2271	1e-6

Таблица 4. Расхождение расчётных данных по отношению к эксперименту

	P1	P2	P3
Upwind	+27%	+94%	+98%
Blend Factor 0.5	+22%	+78%	+61%
High Resolution (12 <sup>0</sup> , tetra)	-10%	-16%	+1%
High Resolution (FC, hexa)	-21%	+12%	+13%

Моделирование полного круга на гекса-сетке приводит к большим отклонениям, но это объясняется предпринятыми упрощениями расчёта и сложностями моделирования в условиях сильно ограниченных расчётных ресурсов.

Основные результаты, полученные при расчёте модели с направляющим аппаратом, были использованы в упрощённых моделях. Измерение параметров потока за сопловым аппаратом позволило определить направление течения газа непосредственно на входе в уплотнение. На рисунке 8 а) видно, что направление потока за сопловым аппаратом практически равномерно, однако сохраняется неравномерность статического давления (рис. 8 б), которой в упрощённых расчётах приходится пренебрегать из-за влияния эксцентриситета на распределение статического давления в данной области, обнаруженного экспериментально.

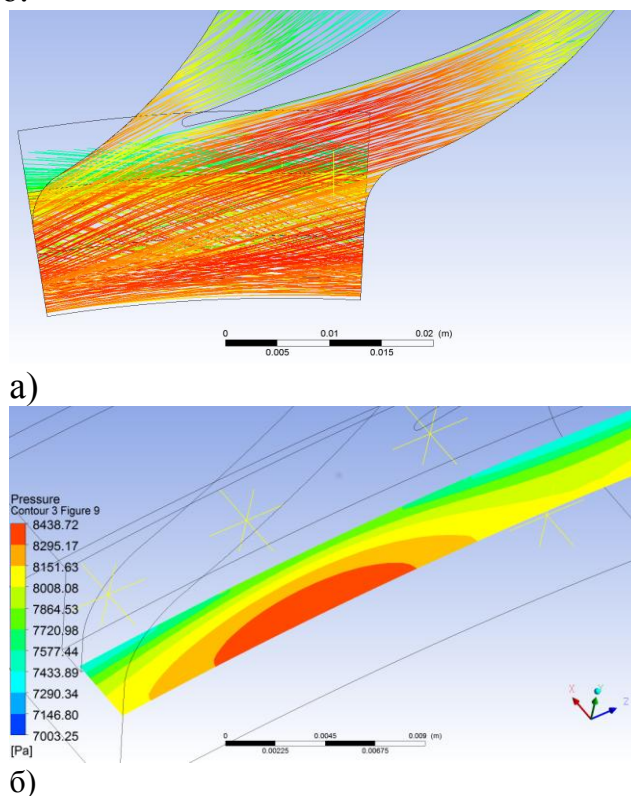


Рис. 8. Результаты расчёта: а) Линии тока на входе в уплотнение; б) неравномерность статического давления за СА

Также на рисунках 9 и 10 приведены распределения скоростей и статического давления соответственно в продольном сечении уплотнения. Полученные распределения качественно соответствуют распределениям, замеренным на стенде.

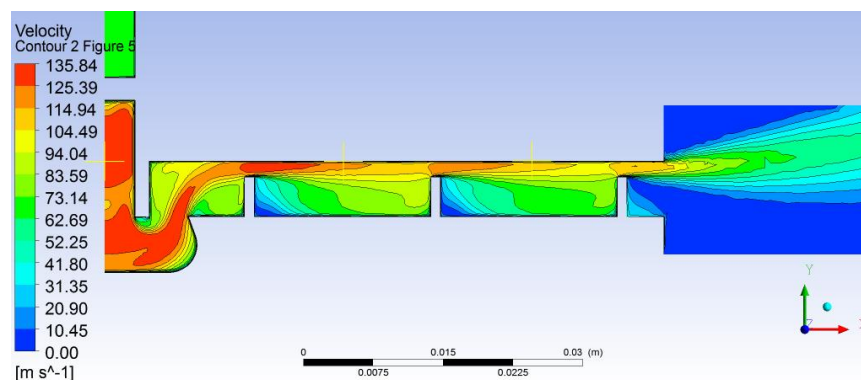


Рис. 9. Распределение скоростей в продольном сечении

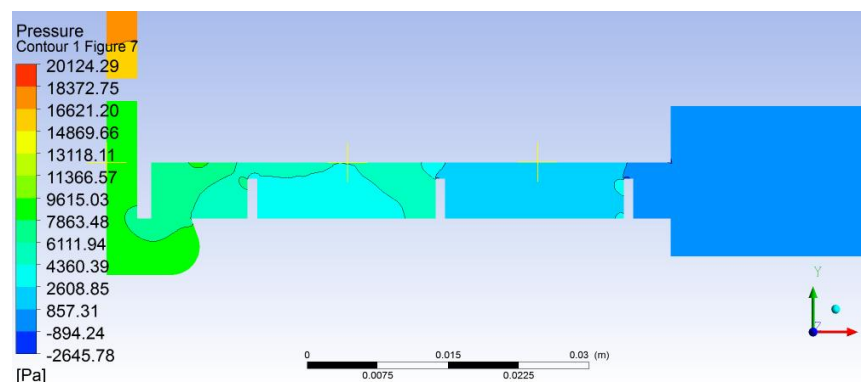


Рис. 10. Распределение статического давления в продольном сечении

По данным, полученным на модели с СА, были сформированы требуемые исходные данные для моделирования уплотнения с эксцентриситетом. По отношению к полной модели установки, упрощённая характеризуется отсутствием входной области с направляющим аппаратом, и отсутствием выходной присоединённой области для моделирования «атмосферы». Исключение присоединённой области на выходе обозначило необходимость использования ГУ (таблица 5) типа «Opening», т. к. вблизи выходной грани домена находилась область с внезапным расширением и значительным отрицательным статическим давлением (отрицательным относительно «нулевого уровня» - Relative Pressure).

Таблица 5. Граничные условия модели с эксцентриситетом

Вход (inlet)	$m=0,122$ кг/с, направление потока: axial 0; radial -0.38451; theta -0.99871	$T^*=300$ К
Атмосфера (atm)	Относительное давление = 0 (Pa)	$T=300$ К
Выход (opening)	Относительное давление = 0 (Pa)	-
Ротор (wall-r)	$n = 3000$ об/мин	-

Данные граничные условия были использованы на сетке, количеством элементов 2,5 млн., и размером пристеночной ячейки 0,01 мм, ориентировочно соответствовавшим параметру  $y^+_{\max}=6$ . Соответственно  $y^+_{\max}$  была выбрана модель турбулентности  $k$ - $\epsilon$ . Вид сетки показан на рисунке 11.

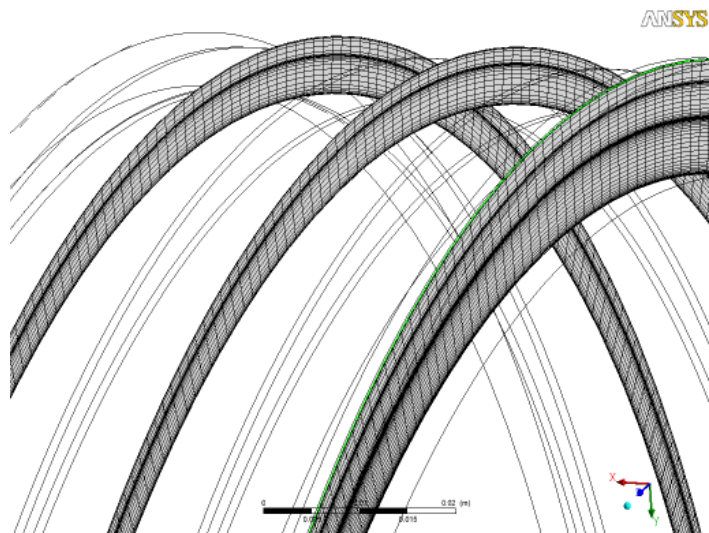


Рис. 11. Вид сетки в сечениях камер

В результате расчётов, проведённых для различных эксцентриситетов, были получены распределения давления по поверхности ротора.

Анализ расчётных данных в сравнении с экспериментальными, представленными на рисунке 12 в частности для смещения ротора  $W=0.49$  мм, показывает, что распределение соответствует экспериментально замеренным неравномерностям. Положение максимума давления может быть определено со смещением из-за направления вращения ротора. Кроме того возможна погрешность точки начала отсчета нулевого угла. В случаях с большим смещением ротора это может быть показано наилучшим образом.

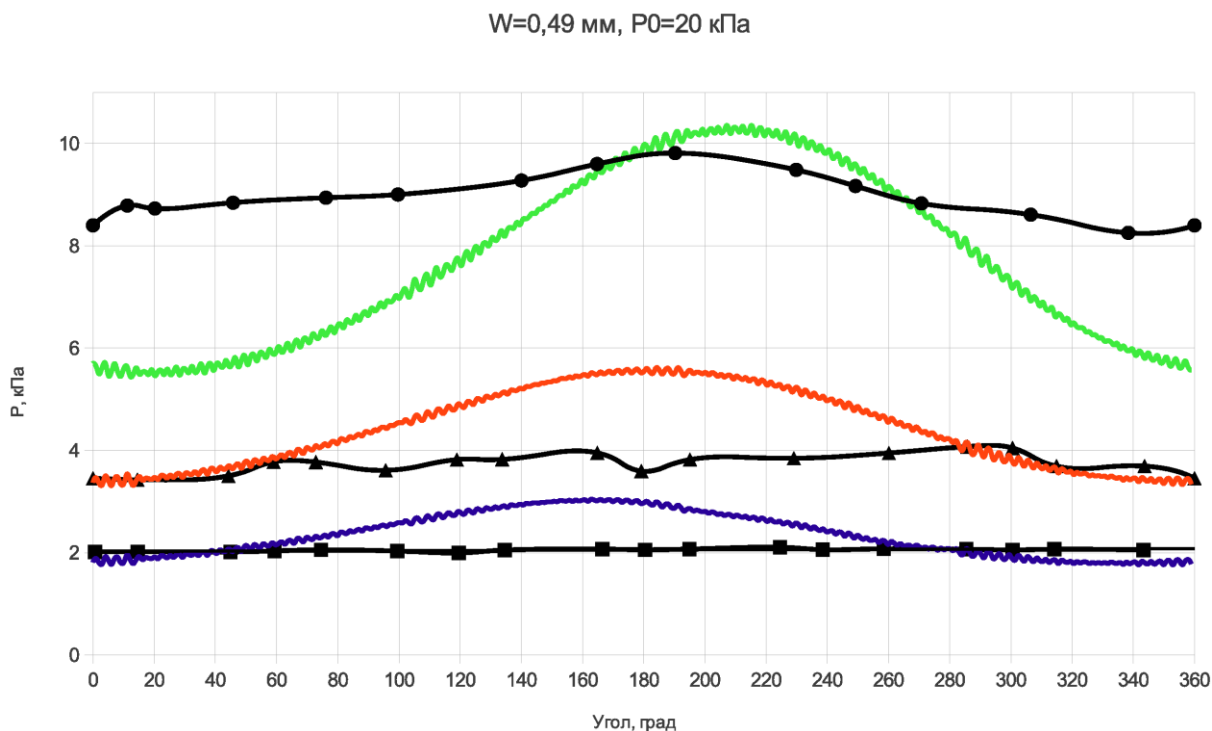


Рис. 12. Окружное распределение давления, полученное экспериментальным и расчётным путём: ● - камера 1 (вход); ▲ - камера 2 (середина); ■ - камера 3 (выход)



Аэродинамические силы, рассчитанные как интеграл статического давления по стенке ротора, хорошо согласуются с экспериментальными данными (как в случае с пересчётом сил по полю давления, так и в случае взвешивания ротора).

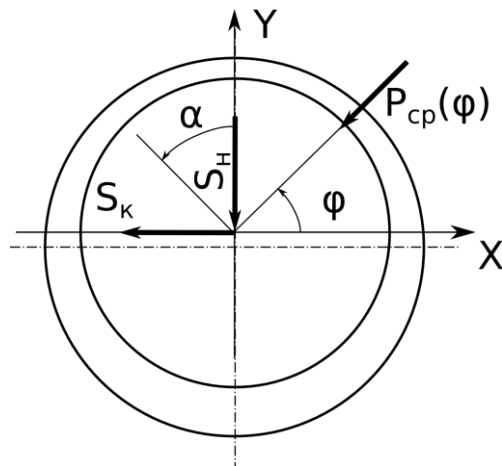


Рис. 13. Схема приложения сил

В соответствии со схемой на рисунке 13, сила, действующая в уплотнении, была разделена на консервативную и неконсервативную составляющую. Результат расчета приведён на рисунке 14.

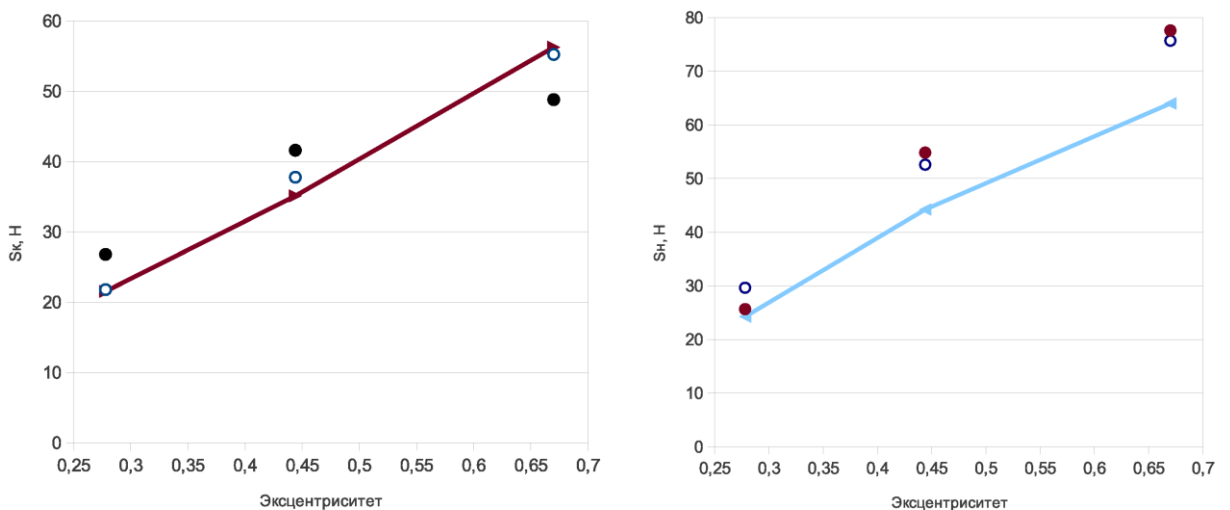


Рис. 14. Расчётные и экспериментальные значения сил: сплошные точки — эксперимент, по распределению давлений, пустые — взвешивание ротора, линии — расчет

Наличие отработанной математической модели позволило провести эксперимент по изменению направления вращения ротора на противоположное. При этом, при частоте 3000 об/мин, изменение неконсервативной составляющей силы ( $S_H$ ) составило -8,6%, а консервативной составляющей ( $S_k$ ) на +22%, что связано с изменением закрутки потока на входе в исследуемую область.



*Шестая глава* посвящена практическому применению разработанных методических руководств и рассматривает расчёт характеристик уплотнения авиационного двигателя. В качестве объекта исследования было выбрано уплотнение думисной полости КВД, рассчитаны расходные и динамические характеристики уплотнения, определены давления в полостях. Полученный расчётный расход сравнивался с расходом, рассчитанным с использованием эмпирических коэффициентов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований разработан метод моделирования и расчёта параметров уплотнений с помощью пакета вычислительной газовой динамики ANSYS CFX. Основные рекомендации, относящиеся к методикам построения сеток, определения параметров решателя, могут быть применены к задачам расчёта уплотнений различных типов, включая перспективные. В ходе работы была решена научно-техническая задача разработки математической модели лабиринтного уплотнения для получения его динамических характеристик. Был проведен расчет гидравлических и динамических характеристик уплотнения, определены поля параметров давления и температуры, определены значения действующих на уплотнение сил.

К основным выводам работы можно отнести следующие:

1. Разработана методика получения гидравлических характеристик уплотнений. Впервые в отечественной практике выполнено трёхмерное моделирование стендового лабиринтного воздушного уплотнения. В результате были получены распределения давления по поверхности вращающейся стенки. Полученные на основе расчётного поля статического давления проекции аэродинамической силы хорошо согласуются с экспериментальными данными.

2. Разработана методика моделирования работы уплотнения с эксцентриситетом и прецессией ротора в стационарном и нестационарном режиме, даны рекомендации по подготовке моделей, минимальным требованиям к сеточным моделям, выбору моделей турбулентности.

3. Осуществлена экспериментальная проверка методики расчета характеристик уплотнений на основе имеющихся экспериментальных данных и по результатам эксперимента, проведенного на динамическом стенде.

4. Исследовано современное состояние применения методов вычислительной газовой динамики к расчету воздушных уплотнений. Показано, что коммерческий пакет ANSYS CFX может быть успешно использован для расчёта гидравлических и динамических характеристик. Физические модели, заложенные в данный пакет, адекватно отражают реальные процессы, протекающие в уплотнении в процессе его работы.

5. Применение разработанной методики на практике, в частности при расчёте уплотнения думисной полости КВД изд. 99 на предприятии НТЦ им. А. Люльки, показало не только хорошее соответствие с методиками, основанными

на эмпирических коэффициентах, но и позволило получить расширенные данные о параметрах потока в уплотнении, которые ранее могли быть определены только при проведении специальных испытаний.

б. Использование данной методики в совокупности с программами по расчету динамики и прочности позволит определять границы устойчивой работы роторной системы и решать задачи устойчивости для объекта исследования.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Брыкин Б.В., Леонтьев М.К., Определение аэродинамических циркуляционных сил в воздушных лабиринтных уплотнениях // Электронный журнал «Труды МАИ». – 2011, № 43. – <http://www.mai.ru/science/trudy/> (30.03.11).
2. Брыкин Б.В., Евдокимов И.Е., Численное моделирование эксперимента по исследованию течения в лабиринтном уплотнении // Электронный журнал «Труды МАИ». – 2012, № 61. – <http://www.mai.ru/science/trudy/> (24.12.12).
3. Брыкин Б.В., Леонтьев М.К., Определение аэродинамических циркуляционных сил в воздушных лабиринтных уплотнениях, 9-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2010», 16-18 ноября 2010 г., Москва. Тезисы докладов. - Спб.: Мастерская печати, 2010. С. 178.
4. Брыкин Б.В., Евдокимов И.Е., Леонтьев М.К., Численное моделирование работы лабиринтного уплотнения в стационарной и нестационарной постановке, V Всероссийская научно-техническая конференция молодых специалистов. Материалы конференции: Уфимск. моторостр. произв. объединении. – Уфа, УМПО 2011. – С. 113.
5. Брыкин Б.В., Евдокимов И.Е., Численное моделирование эксперимента по исследованию течения в лабиринтном уплотнении, 11-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2012», 13-15 ноября 2012 г., Москва. Тезисы докладов. - М.: МАИ, 2012. С. 156.