

Численное моделирование эксперимента по исследованию течения в лабиринтном уплотнении

Б.В. Брыкин, И.Е. Евдокимов

Аннотация

В статье приведены результаты моделирования работы трехребенчатого лабиринтного уплотнения в программном комплексе ANSYS-CFX. Было проведено сравнение экспериментальных данных, полученных на стенде «Динамическая модель уплотнения» с результатами расчета. Экспериментальные данные позволили сравнить распределение давления воздуха по окружности в срединных сечениях камер уплотнения, а также вдоль уплотнения. Такая проверка методики расчёта, и расчётного комплекса ANSYS CFX, позволяет подойти более продуктивно к использованию данного пакета в инженерной практике, проектированию лабиринтных уплотнений в современных авиационных ГТД, а также совершенствованию динамических характеристик и КПД уже существующих и вновь проектируемых двигателей.

Ключевые слова: лабиринтное уплотнение; вычислительная гидродинамика

Введение

Используемые для расчета уплотнений традиционные методики основываются на экспериментальных данных, зачастую полученных на статических стендах. Расчеты проводятся с помощью формул, выведенных с допущениями, в которых содержатся приближенные коэффициенты, заменяющие реально конструкцию уплотнений на некоторую универсальную. Кроме того при расчете вводятся явные упрощения, такие как, например, условие равенства температуры по тракту лабиринта. В настоящее время в связи с постоянным ростом производительности вычислительной техники существует необходимость в проведении расчетов, базирующихся на методах вычислительной гидрогазодинамики, но при разработке методики расчета необходимо провести верификацию модели по результатам экспериментальных данных, проведенных на динамических стендах.

В осуществлённой работе было проведено моделирование методами вычислительной гидродинамики экспериментального исследования по течению воздуха в трёхгребённом ЛУ на стенде МЭИ «Динамическая модель уплотнения» (ДМУ).

Моделирование работы уплотнения, реализующее модель сжимаемой сплошной среды, описываемую уравнениями Навье — Стокса и моделями турбулентности, применительно к исследованию лабиринтного уплотнения в отечественной практике было проведено впервые. Комплексные экспериментальные исследования представляют огромное количество данных по аэродинамическим свойствам уплотнений. Из массива экспериментальных значений особенно важно было выбрать данные о распределении давлений. Такой выбор, несомненно, обладает меньшей требовательностью к результатам численного эксперимента, по сравнению с исследованием распределения скоростей в камерах уплотнения, но позволяет получить эффективную методику определения расходных и динамических параметров уплотнения более экономичными моделями турбулентности на меньших сетках.

Описание экспериментальной установки

На рисунке 1 приведен общий вид установки «Динамическая модель уплотнения» [4]. Реализованная схема подвода воздуха позволяет разгрузить ротор от действия осевой силы, и увеличить эффект, возникающий от окружной неравномерности гидростатического давления. Воздух, питающий стенд, подводится с помощью трубопровода 1 и далее через распределительную камеру направляется в сопловой аппарат 4. Для формирования проточной части использовались различные конфигурации уплотнений, закрепляемые на съёмном диске 5, установленном на роторе 6.

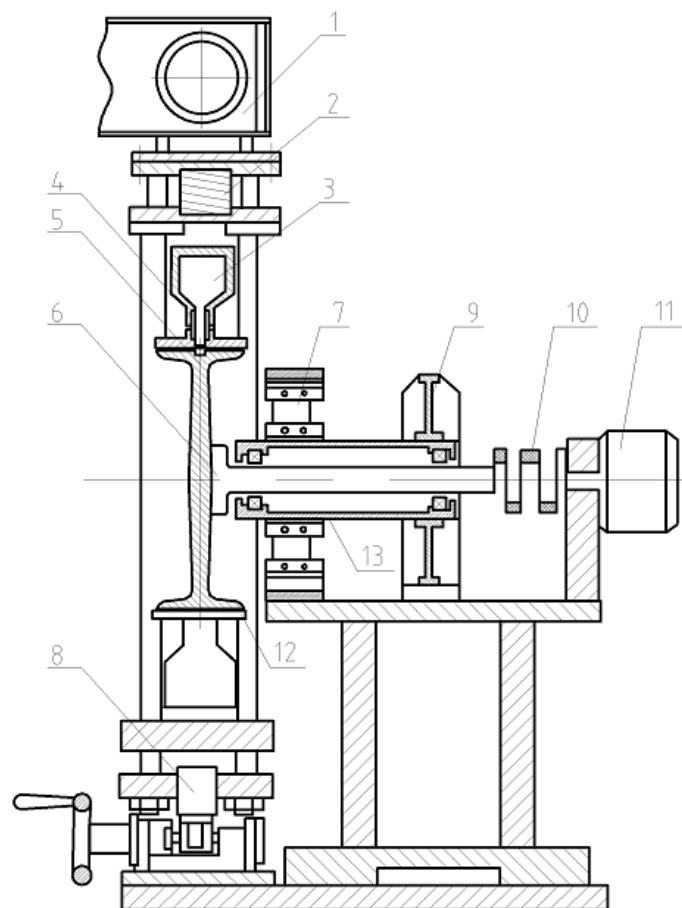


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки

В данной работе исследовалось трёхгребенчатое осесимметричное лабиринтное уплотнения, схема которого изображена на рисунке 2.

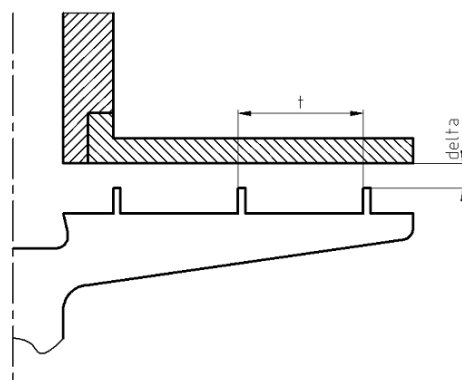


Рис. 2. Геометрическая модель уплотнения

Геометрическая модель канала течения представлена на Рис. 3.

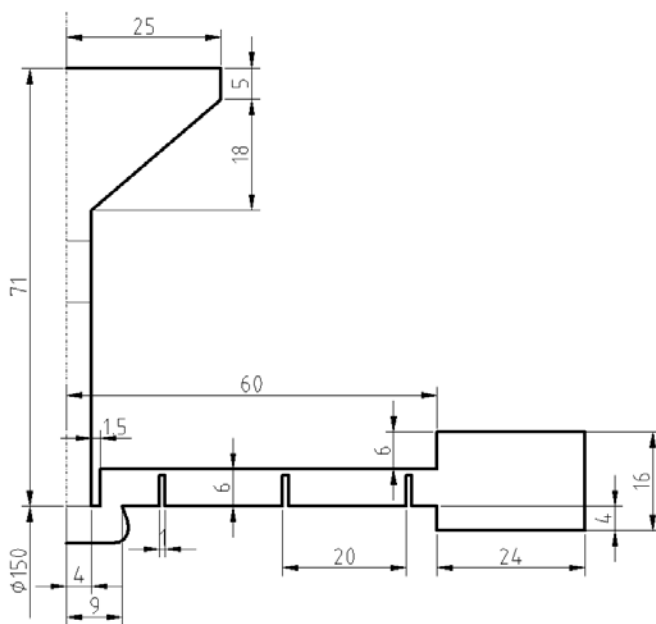


Рис. 3. Геометрическая модель исследуемой области

Расчетная модель течения

В расчетную модель исследуемой области включен сопловой аппарат. Сопловой аппарат, набранный из стандартных профилей С-9012А, позволяет закрутить поток перед входом в уплотнение, поэтому для определения углов входа потока в область этот канал также моделируется.

На основании геометрической модели была построена трехмерная модель расчетной области (рисунок 4), в дальнейшем используемая для генерации расчетных сеток.

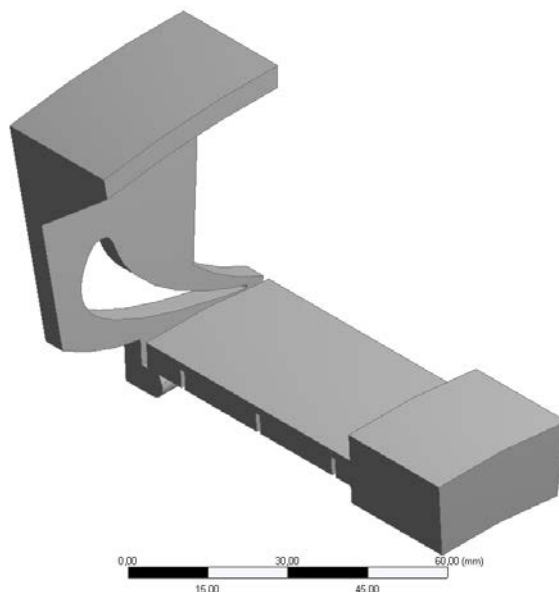


Рис. 4. Геометрия расчетной области

Исходная комбинация граничных условий (ГУ), используемых в расчёте, эмитировала реальные физические условия установки ДМУ: на входе в расчётный домен было задано статическое давление в кольцевом распределителе, измеряемое в каждом эксперименте, на выходе и на открытых гранях, имитирующих атмосферу задавалось атмосферное давление (рисунок 5).

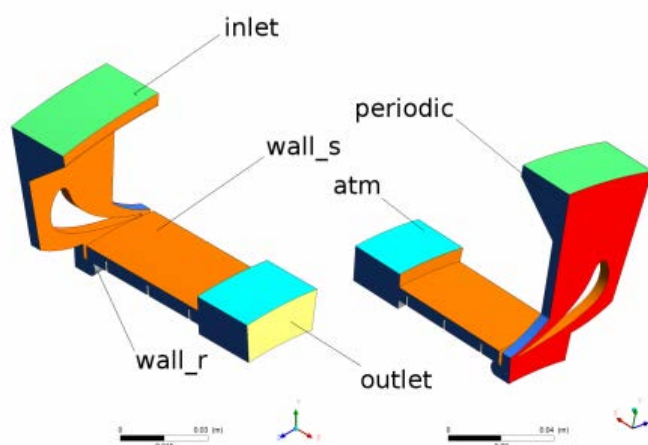


Рис. 5. Схема граничных условий задачи

Исходные данные параметров потока задавались в качестве граничных условий в соответствии с Таблицей 1.

Таблица 1. Граничные условия для расчета

Граничное условие	Значение параметров
Вход (inlet)	Абсолютное давление, $P = 121325$ Па Температура, $T^*=300$ К
Атмосфера (atm)	Абсолютное давление, $P= 101325$ Па Температура, $T = 300$ К
Выход (outlet)	Абсолютное давление, $P= 101325$ Па
Ротор (wall-r)	Частота вращения, $n = 3000$ об/мин

Для проведения группы расчётов было создано несколько сеток, характеризующихся разным количеством элементов. Сеточные модели отличаются параметром $utax+$, являющимся главным критерием при прогнозировании поведения той или иной модели турбулентности [1]. Итоговые параметры использованных расчётных сеток сведены в таблице 2. Данные сетки содержат тетраэдральные и призматические элементы. Использование изначально параметризованной модели позволяет существенно снизить трудоёмкость расчётов и осуществить решение задачи с использованием различных решателей, постепенно усложняя задачу: подключать модели турбулентности, локально

увеличивать разрешение сетки, наращивать количество призматических слоёв в пограничном слое.

Таблица 2. Сводные параметры сеток, использованных в расчёте

Сетка, Модель турбулентности	Ортогональность, (Orthog. Angle)	Коэффициент роста, (Exp. Factor)	Соотношение элементов, Aspect Ratio	Число элементов, млн.	y_{max}^+
1, $k - \epsilon$	23,3	112	641	0,93	67,7
2, SST	29,4	34	66	1,12	14,8
3, SST	27,5	23	35	2,53	14,8
4, SST	15,1	46	177	2,97	3,8
5, SST	7,4	47	884	3,48	0,93

В таблице 2 также приведены наихудшие параметры расчётных сеток с точки зрения решателя ANSYS CFX. Общее количество элементов с приведенными параметрами во всех случаях не превышало 1%.

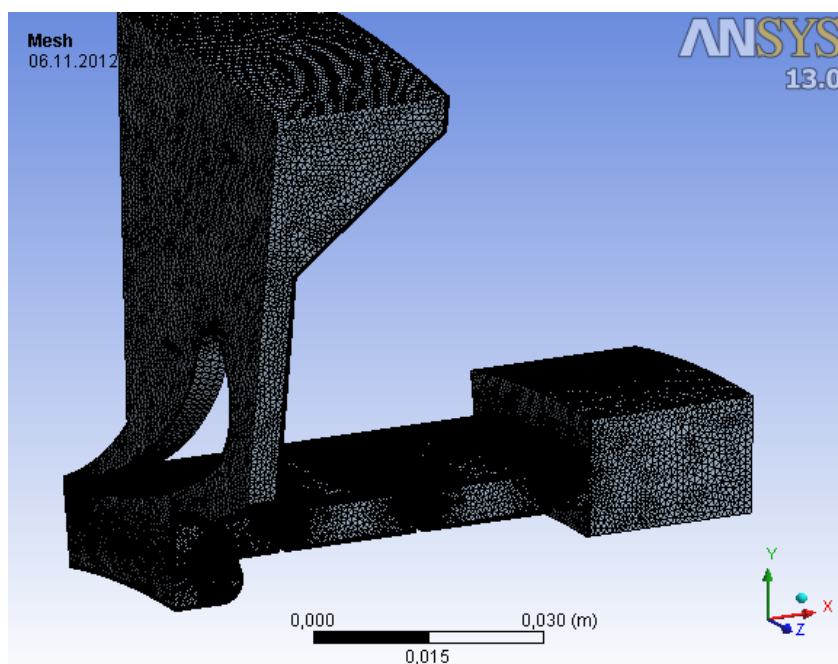


Рис. 6. Общий вид подробной расчетной сетки

На рисунке 6 приведён общий вид сеточные модели с сопловыми лопатками. На рисунке 7 показаны локальные характеристики сетки в зазорах и дискретизация пограничного слоя соответственно. Сетка №5 использовалась для моделирования уплотнения и визуально демонстрируют хорошее качество автоматически генерируемых сеток.

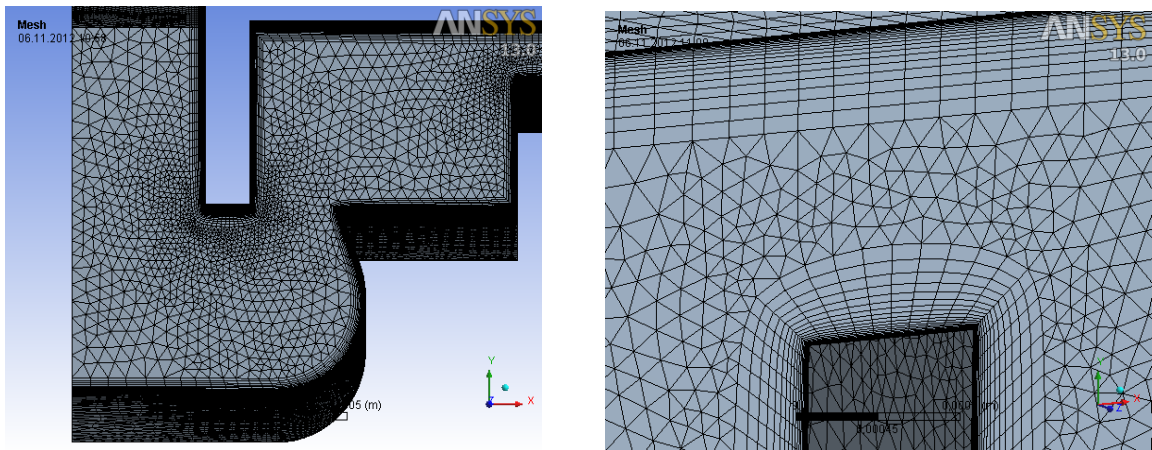


Рис. 7. Участки сеточной модели в радиальных зазорах

Результаты расчетов

На рисунке 8 приведены результаты расчётов, полученные на разных сеточных моделях (характеристики см. в таблице 2).

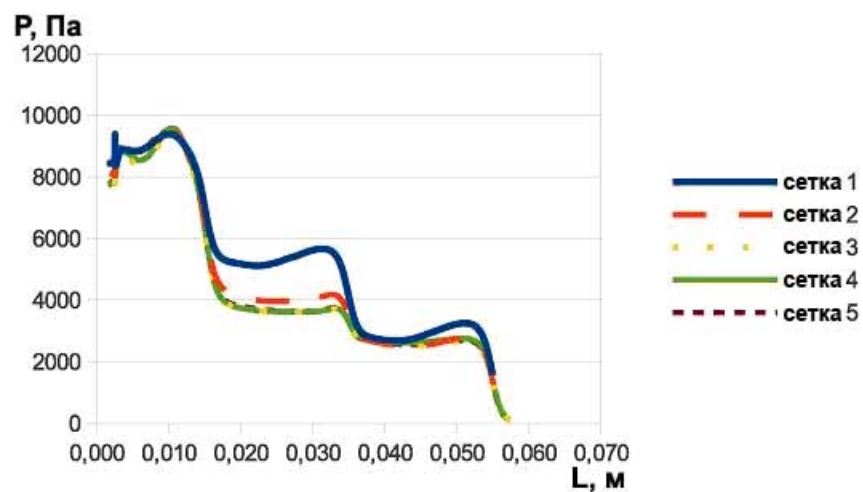


Рис. 8. График распределения давления вдоль стенки ротора по длине уплотнения в зависимости от дискретизации расчетной области

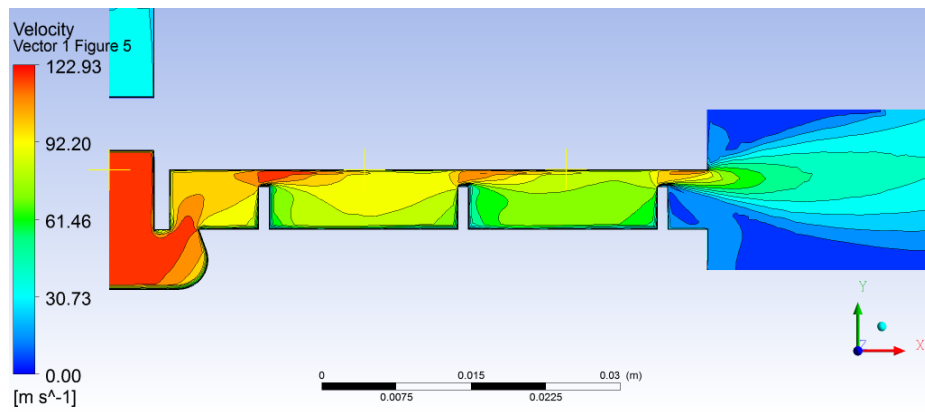
Анализ графиков показывает, что, несмотря на близкие значения давлений в некоторых точках грубой сеточной модели (сетка 1) демонстрируют существенные количественные расхождения с более подробными сеточными моделями. Погрешность в определении распределения статического давления в таком случае приведёт к неправильному расчёту действующих на ротор сил, и, в конечном итоге, скажется на

точности динамического расчёта. При моделировании течения газа в зазорах, необходимо использовать численные модели с $u_{\max}^+ \leq 1$ и моделью турбулентности SST (т.е. переходить к прямому интегрированию уравнений гидродинамики в пограничном слое), так как механизм использования пристеночных функций в данной группе задач внутренней газодинамики приводит к получению неверных данных относительно распределения статического давления.

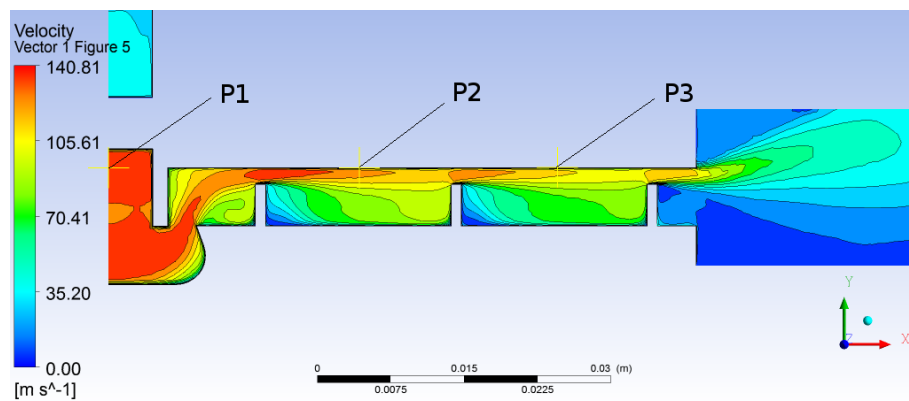
В соответствии с методикой расчёта уплотнения, ряд предварительных расчётов был осуществлён с применением специальных опций решателя ANSYS CFX, относящихся к адвективным схемам Upwind и High Resolution [1]. Помимо них, при использовании двухпараметрических моделей турбулентности, в Advection Schemes доступна также опция Specified Blend Factor [1], которая является при $\beta = 0$ или blend factor=0, известной в литературе противопоточной схемой [2] или схемой Upwind 1-го порядка, при $\beta = 1$ или blend factor=1 - схемой Upwind 2-го порядка.

Применение схемы Upwind обеспечивает более быстрое и "точное" с формальной точки зрения решение, характеризующееся более низкими невязками (RMS). В контексте расчёта течения газа в уплотнении целевые невязки RMS равные по порядку $1e10^{-5}$ при использовании схемы Upwind могут быть легко достижимы, что невозможно при использовании схемы High Resolution на той же сетке. Однако согласно [1] использование схемы Upwind может приводить к "размытию" резких градиентов, что было частично обнаружено при анализе полученных параметров. Также были выявлены значительные расхождения в результате расчёта скоростей и статического давления в продольном сечении уплотнения.

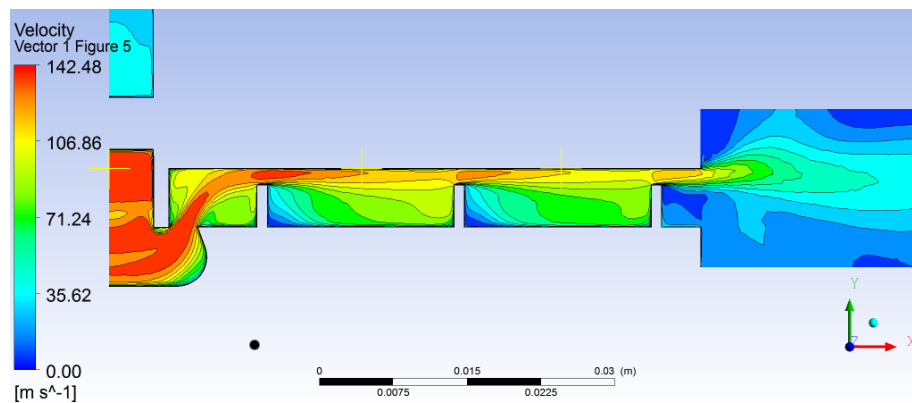
На рисунке 9 приведены результаты расчёта скорости в продольном сечении. Расчёты б) и в) различались только улучшением сетки в области перед входом в лабиринтное уплотнение и дали небольшое различие в *максимальных* скоростях потока, качественная картина не изменилась. Расчёты а) и в), проведённые с подключением различных адвективных схем дали качественно и количественно различающееся поле скоростей. Сравнение поля скорости в средней камере для случая а) и б) показывает, что в случае а) градиент скорости от гребёнки к середине камеры является менее выраженным по сравнению с случаем б).



a)



б)



в)

Рис. 9. Распределение скоростей в проточной части: а) сетка 4, High Resolution; б) сетка 5, High Resolution; в) сетка 5, Upwind, First-Order;

В таблицу 3 сведены результаты расчётов давления в точках, показанных на рисунке 9. В таблицу также добавлены абсолютные значения давлений в соответствующих точках, полученные в результате экспериментальных замеров [3].

Таблица 3. Результаты расчета

	Давление P1, Па	Давление P2, Па	Давление P3, Па	Уровень невязок RMS
Эксперимент	9,00e+03	3,75e+03	2,00e+03	-
Upwind	1,143e+04	7,29e+03	3,96e+03	1e-05
High Resolution	8,7e+03	3,796e+03	1,959e+03	1e-03

Окружные распределения давлений в центре камер для нулевого эксцентриситета приведены на рисунке 10.

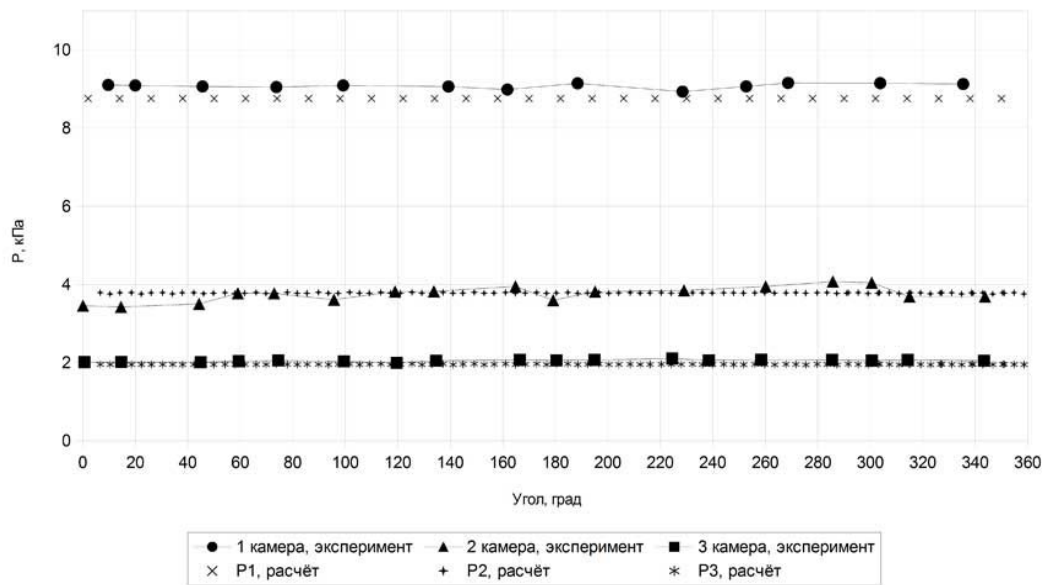


Рис.10. Окружные распределения давлений в центре камер для нулевого эксцентриситета

Экспериментальные и расчётные результаты были обработаны и сведены в таблицу 4. В ней для простоты сравнения показаны расхождения значений статического давления в соответствующих точках P1, P2, P3 в процентах от экспериментального значения.

Таблица 4. Расхождение с экспериментальными данными

Численная схема	Давление P1	Давление P2	Давление P3
Upwind	+27%	+94%	+98%
High Resolution	-3%	+1%	-2%

Единственной пригодной для вычислений адвективной схемой, является схема High Resolution. Результаты расчета с использованием этой схемы оказали хорошее совпадение с проведенными экспериментальными замерами. Схему Upwind, благодаря устойчивости и быстрой сходимости рекомендуется использовать лишь для получения интерполяционных данных.

Заключение

В результате расчетных исследований создана модель описывающая работу газа в трехребенчатом лабиринтном уплотнении в составе экспериментальной установки и отработана методика проведения расчетов по этой модели. По результатам расчетов были получены, в частности, распределение статического давления вдоль стенок ротора и статора. Эти значения могут быть использованы в качестве исходных данных для определения сил газового потока, действующих на систему. Также полученную модель можно использовать для определения расходных и динамических характеристик уплотнений в составе двигателя.

Проведена оптимизация сеточной модели с целью уменьшения необходимых для расчета вычислительных ресурсов, определен необходимый для обеспечения сеточной независимости размер расчетной модели и величина параметра $утах+$, даны рекомендации по выбору расчетной схемы для решения задач течения газа в лабиринтном уплотнении.

Благодарности

Авторы статьи выражают благодарность к.т.н, доценту кафедры ПГТ МЭИ Борису Николаевичу Петрунину за предоставленные экспериментальные данные и материалы, используемые в данной работе.

Работы проводились при поддержке Минобрнауки РФ, НОЦ "Двигатели и энергетические установки" МАИ.

Библиографический список

1. ANSYS CFX-Solver Theory Guide, release 13.0, November 2010. с. 355-357.
2. Патанкар С., Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. — М., Энергоатомиздат, 1984 - 124 с.: ил., с. 56-57.
3. Петрунин Б.Н. Исследование аэродинамических сил в уплотнениях турбомашин и экспериментальное обоснование расчетной методики. . Диссертация на соискание уч. степ. канд. техн. наук. М.: МЭИ, 1991.
4. Серков С.А. Определение аэродинамических сил в уплотнениях турбомашин, вызывающих низкочастотную вибрацию и выработка рекомендаций по повышению устойчивости движения ротора. Диссертация на соискание уч. степ. канд. техн. наук. М.: МЭИ, 1983.

Сведения об авторах

БРЫКИН Борис Витальевич, аспирант Московского авиационного института (национального исследовательского университета);
МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993; тел.: 8-926-279-85-04;
e-mail: borisbrykin@yandex.ru

ЕВДОКИМОВ Илья Евгеньевич, аспирант Московского авиационного института (национального исследовательского университета);
МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993; тел.: 8-926-40-60-824; e-mail:
evdokimov.ilya@gmail.com