

# РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСЕРАДИАЛЬНОГО РАБОЧЕГО КОЛЕСА ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSYS CFX С ПРИМЕНЕНИЕМ СУПЕРКОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Е.Г. Никитин, Ю.Б. Галеркин, Ю.В. Кожухов

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Энергомашиностроительный факультет, кафедра Компрессорной, вакуумной и холодильной техники

## Аннотация

Приведены результаты исследования пространственного течения в осерадиальном рабочем колесе центробежного компрессора методами вычислительной газодинамики с использованием пакета программ Ansys CFX. Вычисления проводились с использованием суперкомпьютерных технологий.

## Условные обозначения

D – диаметр, м;  
h – напор ступени или её элемента, Дж/кг;  
m – массовый расход (производительность), кг/с;  
p – давление, Па;  
u – окружная скорость, м/с;  
n – частота вращения, об/мин;  
T – температура, К;  
Ф – условный коэффициент расхода;  
П – условный коэффициент расхода;

## Сокращения, подстрочные и надстрочные индексы

0, 1, 2, 4 – индексы контрольных сечений;  
РК – рабочее колесо;  
ЦК – центробежный компрессор;  
п – политропный;  
\* – параметры торможения;

## Введение

С каждым годом в энергомашиностроении увеличивается роль математического моделирования. А с появлением и развитием таких многопроцессорных программных комплексов, как ANSYS CFX, которые позволяют успешно решать, в том числе сложные газодинамические задачи, увеличились требования к вычислительным мощностям. Поэтому подходы суперкомпьютерных технологий в вычислительной газодинамике в последнее время набирает все большую актуальность, так как это напрямую влияет на скорость получения результатов. А значит и на скорость внедрения инженерных решений и конкурентоспособность разработок. Примером влияния суперкомпьютерных технологий на развитие энергомашиностроения является данная работа. В ней рассмотрен пример использования таких технологий в вычислительной газодинамике. Расчеты всех объектов исследования проводились на кластерах СПбГПУ.

С развитием энергетики, промышленности, машиностроения и других областей народного хозяйства возрастает необходимость в эффективных высоконапорных малогабаритных центробежных компрессорах. В первую очередь, такие форсированные ступени компрессоров представляют интерес для двигателей транспортных средств. В настоящее время это агрегаты наддува крупных двигателей внутреннего сгорания и газотурбинные двигатели летательных аппаратов, в частности, небольших вертолетов.

В таких установках могут использоваться осерадиальные рабочие колеса (рис.1), так как они позволяют получить малогабаритный компрессор за счёт высоконапорного высокорасходного РК.

Высокий напор и расход обеспечивается за счёт увеличения окружной скорости РК, так как это основной способ форсирования центробежных компрессоров. Это связано с тем, что при прочих равных условиях производительность ступени m и степень повышения давления пропорциональна окружной скорости РК, а политропный напор – hp квадрату окружной скорости РК.

Таким образом, увеличение окружной скорости РК – эффективный способ при заданных массогабаритных показателях получить относительно большую производительность и отношение давлений П.



Рис. 1. Внешний вид осерадиального РК компрессора

Однако в процессе проектирования таких колёс возникают трудности. При окружной скорости у периферии РК (т.е. на диаметре  $D_2$ )  $u_2=400$  м/с и более рабочие колеса воздушных компрессоров не следует проектировать по «дозвуковым», традиционным методикам, которые хорошо изучены. Это связано с тем, что скорость потока внутри колеса становится приблизительно равна, или превосходит скорость звука, и появляются связанные с этим проблемы (одной из основных проблем является скачок уплотнения). Поэтому колёса следует классифицировать как трансзвуковые (если скорость потока приблизительно равна скорости звука) или сверхзвуковые (если превосходит скорость звука). Транс- и сверхзвуковые колеса недостаточно изучены, поэтому в каждом конкретном случае требуются точные расчеты и экспериментальные данные. Также надо учитывать, что структура потока газа в рабочем колесе, имеющим высокие окружные скорости, имеет сложный характер. Поэтому численная оптимизация течения (серия виртуальных экспериментов при помощи средств математического моделирования) позволяет получить наиболее эффективное РК при низких материальных и временных затратах по сравнению с натурными экспериментами, что положительным образом скажется на стоимости проектирования и позволяет получить приемлемые значения КПД, производительности, уменьшении габаритов и других основных параметров компрессора.

Существует ряд специальных программных комплексов для расчёта структуры вязкого потока, в том числе и для турбомашин, к которым относится центробежный компрессор. Программы моделируют течение вязкого газа, расчёт производится с использованием расчётных сеток для проточной части. Широкое применение получил программный комплекс Ansys CFX.

Целью данной работы является исследование осерадиального рабочего колеса центробежного компрессора с использованием ANSYS CFX.

Роль расчетных сеток при численном моделировании и актуальность исследования методики их построения.

Расчётная сетка представляет собой систему малых дискретных объемов, на которые разбивается исследуемая проточная часть (например, межлопаточный канал рабочего колеса). В этих малых дискретных объемах осуществляется процесс аппроксимации исходных дифференциальных или интегральных уравнений системой алгебраических уравнений, решаемых на ЭВМ (например, в каждом малом объеме ведется последовательное решение уравнения Навье-Стокса). Для стационарных течений дискретизация осуществляется в областях малого размера, для нестационарных течений – в областях малого размера и на малых промежутках времени.

Математическая модель, заложенная в программу, включает в себя уравнения, описывающие течение, и явления, сопровождающие течения. Здесь задается тип задачи (двух-, трехмерная), стационарность или нестационарность, вид жидкости (ньютоновская, вязкая и т.д.), сжимаемость, многофазность, химические реакции, тепло- и массообмен и др., а также начальные и граничные условия.

Поэтому оптимально построенная сетка и последующее задание граничных условий является ключом к правильному численному эксперименту.

Не существует универсального метода построения расчетных сеток, и для каждого вида задач требуется свой, наиболее подходящий метод построения.

В Ansys CFX возможно построение расчетных сеток тремя способами:

1. С использованием приложения MESH. Задание параметров сетки производится «вручную» - наиболее трудоёмкий и низкопроизводительный способ;
2. С использованием приложения ICEM. Задание параметров сетки производится автоматически, построение осуществляется для трёхмерной модели проточной части, предварительно созданной в программе трёхмерного моделирования (Pro ENGINEER и проч.). Значительно менее трудоёмкий и более высокопроизводительный способ, по сравнению с первым способом.
3. С использованием приложения TURBOGRID, созданного специально для построения расчетных сеток для турбомашин. Наиболее удобный и производительный способ, по сравнению с первыми двумя.

#### Методика проведения численных экспериментов

В настоящей работе объектом исследования является трансзвуковое осерадиальное РК полуоткрытого типа (рис.1). Расчётный режим работы компрессора: частота вращения ротора  $n=60000$  об/мин, статическая температура на входе  $T=288$  К, статическое давление на входе  $P=97000$  Па.

Расчётной областью является сегмент проточной части с одной лопаткой. Сегмент ограничен в направлении центрального угла - по средней линии межлопаточного канала, перед входом в РК - входным участком необходимой протяжённости, за выходом из РК - участком безлопаточного диффузора (рис. 2).

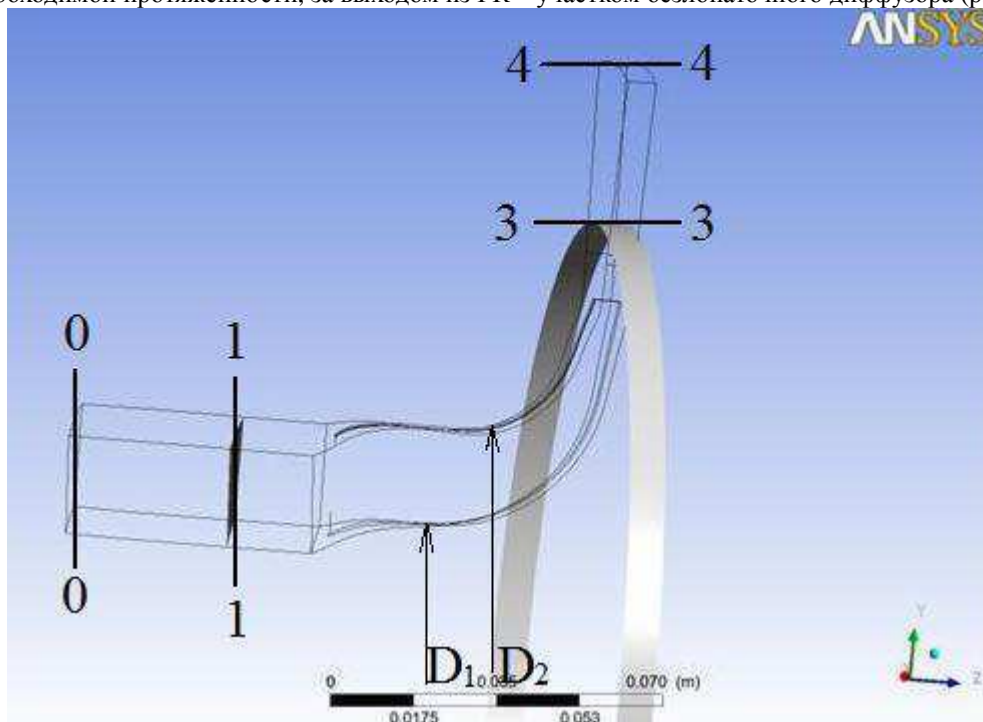


Рис.2 Расчётная область осерадиального РК компрессора с обозначениями контрольных сечений

Для построения сеток было выбрано приложение TURBOGRID, поскольку оно является специализированным для турбомашин. Существует несколько подходов создания сеток в TURBOGRID, что влияет на их качество. Также влияет на качество сеток количество элементов разбиения и их пропорции внутри сетки. Для правильного моделирования пристеночного течения в вязком пограничном слое необходимо делать сгущение сетки у стенок, а так же у входных и выходных кромок лопаток, что обеспечивает корректное моделирование потока при их обтекании. Для исследования влияния количества элементов сетки на качество расчётов были построены три вида сетки для расчётной области: на 380 тыс., 700 тыс. и 1300 тыс. элементов [3, 4]. Расчётные сетки структурированные. Элементами расчётной сетки являются гексаэдры. Они имеют наибольшее количество граней, что является предпочтительным. На рисунках 3-4 представлен внешний вид расчётной сетки на 380 тыс. элементов.

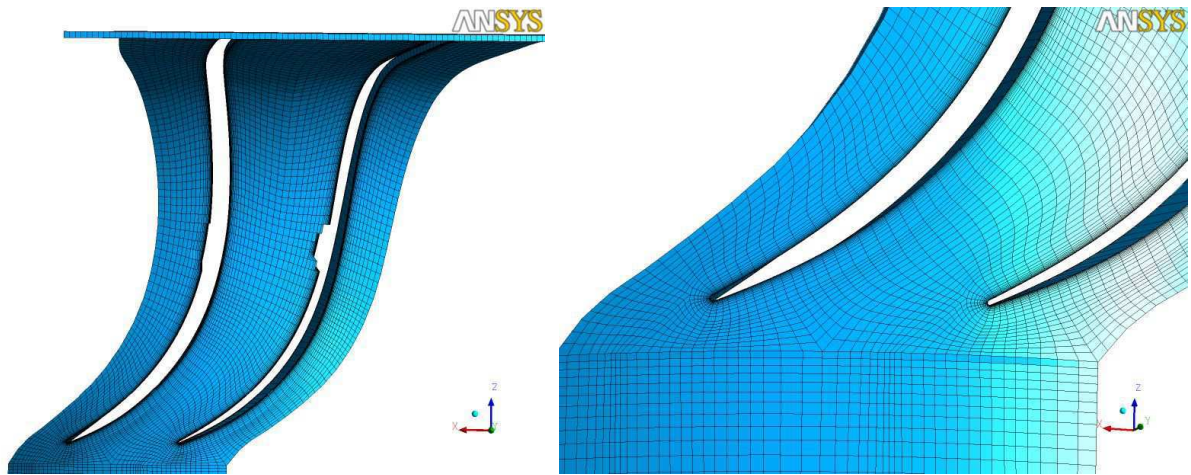


Рис. 3-4. Вид сверху на расчётную сетку, 380 тыс. элементов. Справа - увеличенная область входной кромки

Расчёт течения для данного объекта при трёх видах сеток по про-грамме ANSYS CFX производится при следующих условиях:

1. Рабочая среда - идеальный воздух.
2. Модель турбулентности - SST, поскольку по опыту расчётов вязких течений на кафедре «Компрессорная, вакуумная и холодильная техника» СПбГПУ расчёты с применением данной модели показали наилучшие результаты [1].
3. Граничные условия:  
 Вход (Inlet): полное давление, полная температура.  
 Выход (Outlet): массовый расход.  
 Стенка (wall) - без скольжения (скорость на стенке равна нулю).
4. Вращающимися элементами являются лопатка РК и втулочная поверхность РК с небольшим участком на выходе РК; остальные элементы неподвижны.

После проведения вычислений были получены результаты, представленные на рис. 5 и 6 [2]. На рис. 5 представлен график изменения отношения полного давления на выходе из безлопаточного диффузора при трёх видах расчётных сеток: 380, 700 и 1280 тыс. элементов.

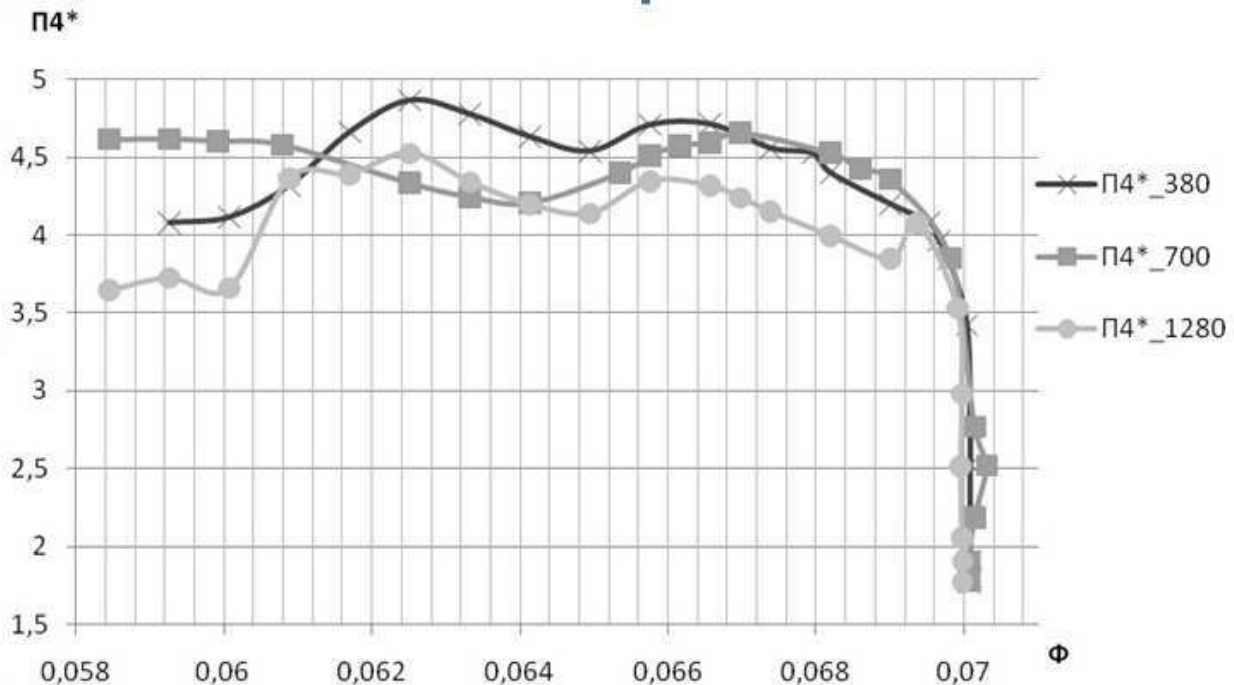


Рис. 5. График изменения отношения полного давления на выходе из безлопаточного диффузора при трёх видах расчётных сеток: 380, 700 и 1280 тыс. элементов

Степень повышения полного давления определяется по формуле:

$$\Pi_4^* = \frac{P_4^*}{P_1^*}$$

Условный коэффициент расхода определяется по формуле:

$$\Phi = \frac{\bar{m}}{\rho_1 \frac{\pi}{4} D_2^2 u_2}$$

Из графика видно, что сетка на 1280 тыс. элементов даёт некорректный результат, так как таких «провалов» по полному давлению быть на расчетном режиме не должно. Сетки на 380 тыс. и 700 тыс. элементов показали более физически обоснованный результат. Расхождение результатов расчёта после зоны помпажа (на графике точки левее  $\Phi = 0,066$ ) можно объяснить тем, что эта область является нерасчетным режимом, и является зоной развитых срывов. Для практического использования она не представляет интереса, так как работа компрессора в этой области не происходит.

На рис. 6 представлен график изменения разности полной температуры на выходе из рабочего колеса и безлопаточного диффузора при трёх видах расчётных сеток: 380, 700 и 1280 тыс. элементов.

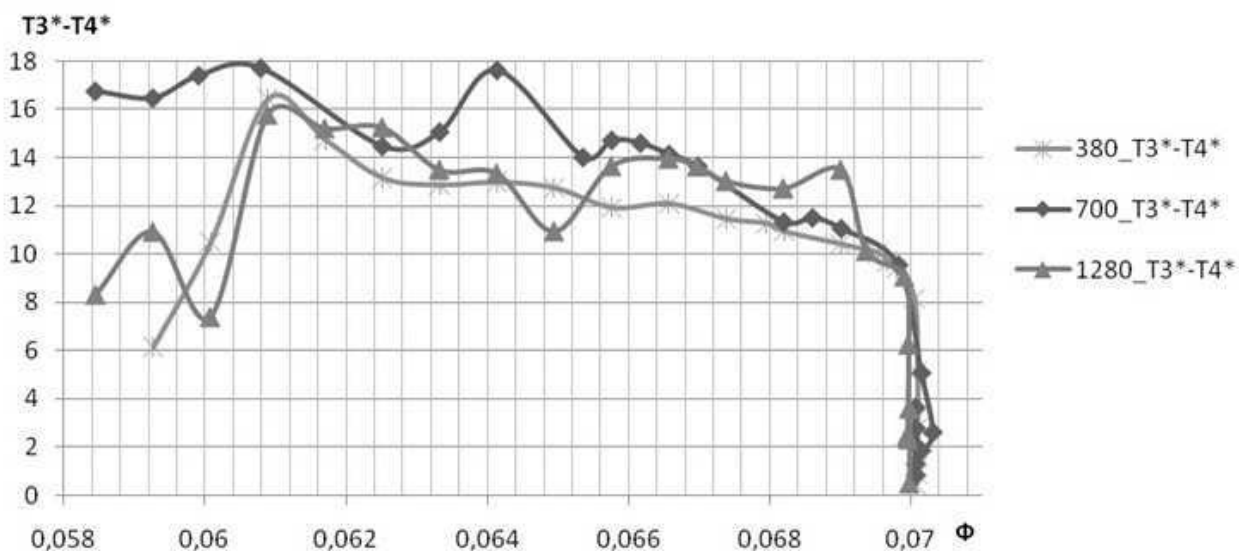


Рис. 6 График изменения разности полной температуры на выходе из рабочего колеса и безлопаточного диффузора при трёх видах расчётных сеток: 380, 700 и 1280 тыс. элементов.

Этот график представляет интерес тем, что при изотермическом процессе, а у нас именно такой, полная температура не должна меняться в неподвижных безлопаточных элементах проточной части. Поиск причины, почему данная разница имеет место быть будет происходить в дальнейшем.

На рис. 7, 8 представлено поле относительной скорости и направление движения газа в межлопаточных каналах на различной высоте лопаток, которая определяется в программе относительной высотой лопатки span. Параметр span=0,1 - 10% высоты лопатки от её корня. Параметр span=0,5 - 50% высоты лопатки от её корня. Параметр span=0,9 - 90% высоты лопатки от её корня.



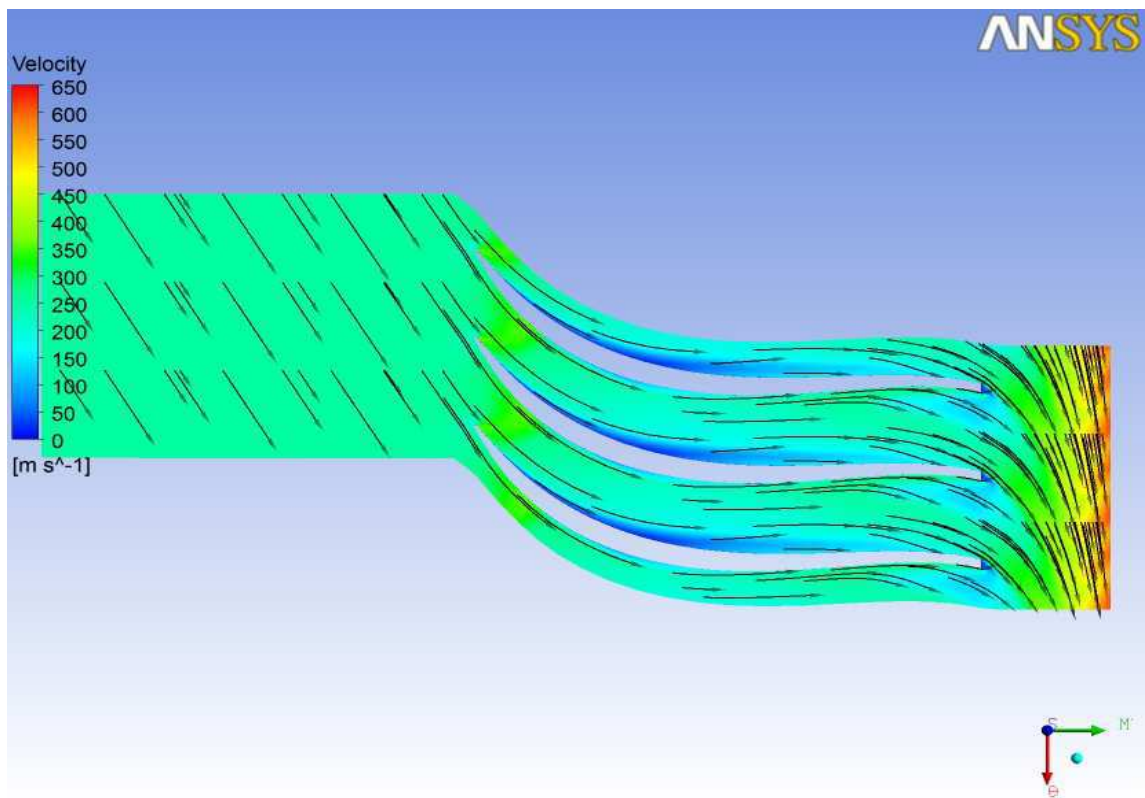


Рис.7. Поле относительной скорости у основания лопатки (span=0,1)

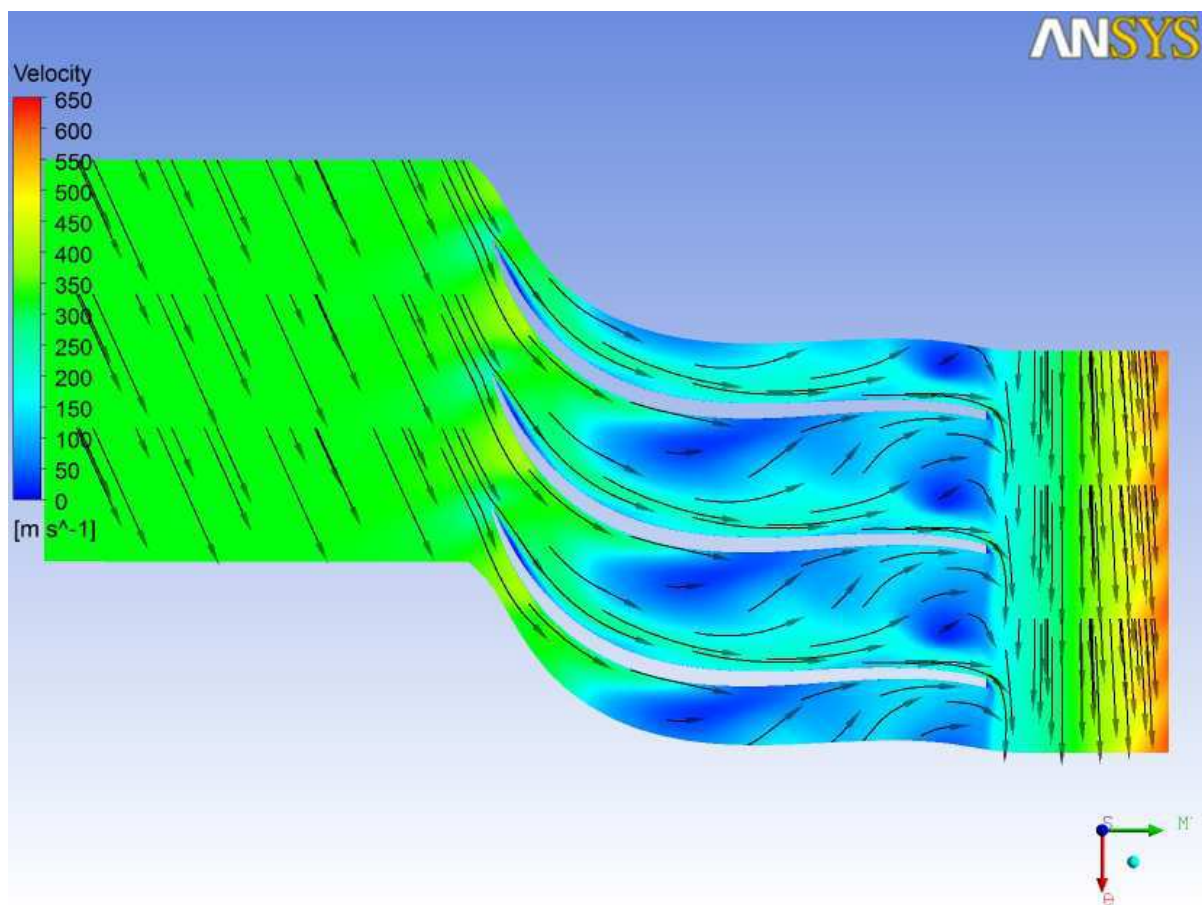


Рис.8. Поле относительной скорости на периферии лопатки (span=0,9)

На рис.9 изображена структура потока в осерadiальном РК, а именно линии тока и значения скоростей в относительном движении.

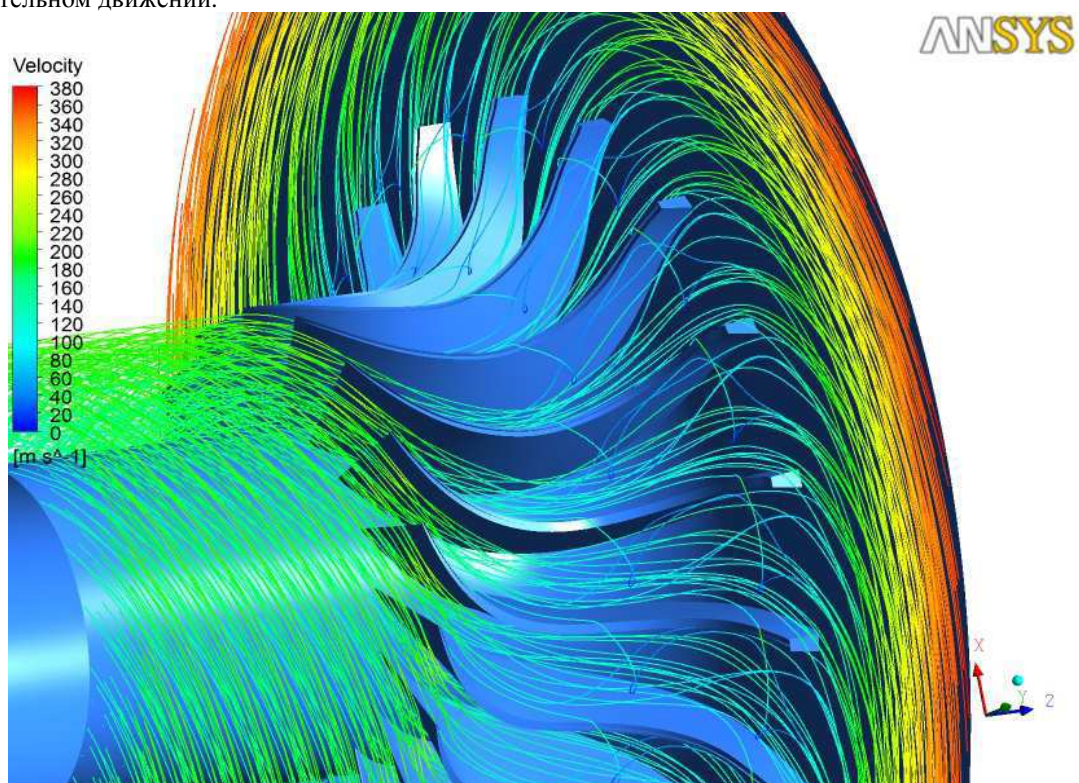


Рис.9. Структура потока в осерadiальном РК

На рис. 10 и 11 показаны поля числа Маха в относительном движении на входе и выходе из рабочего колеса соответственно.

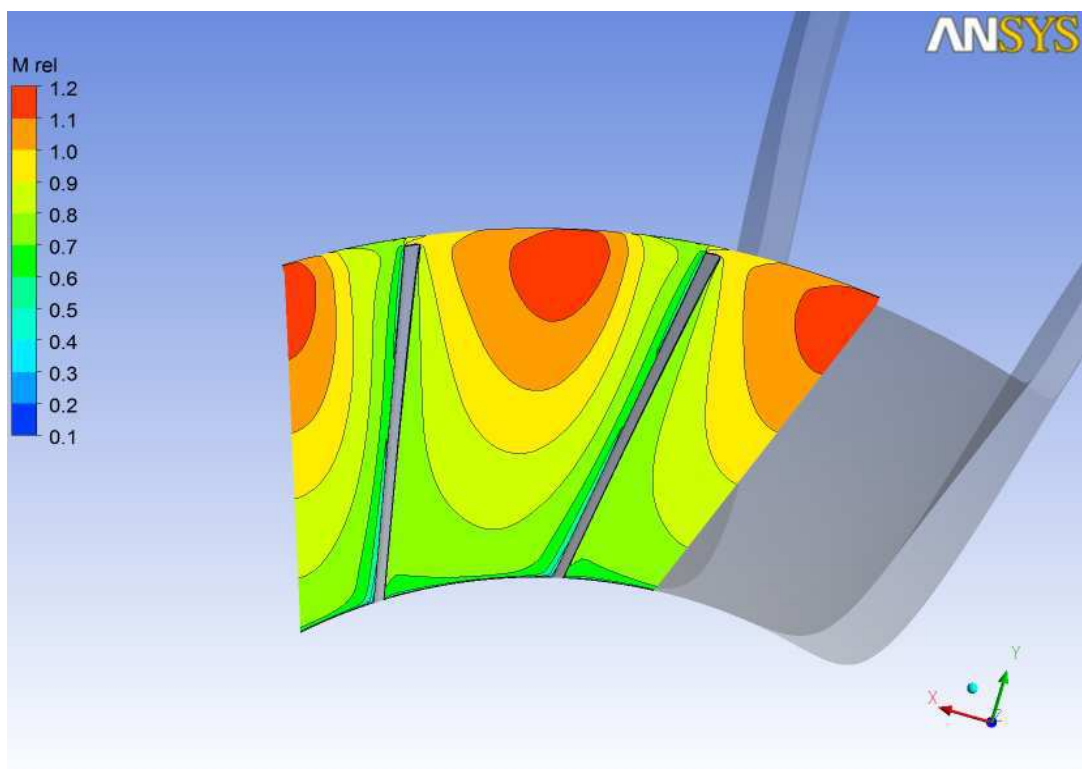


Рис.10. Поля чисел Маха в относительном движении на входе в рабочее колесо

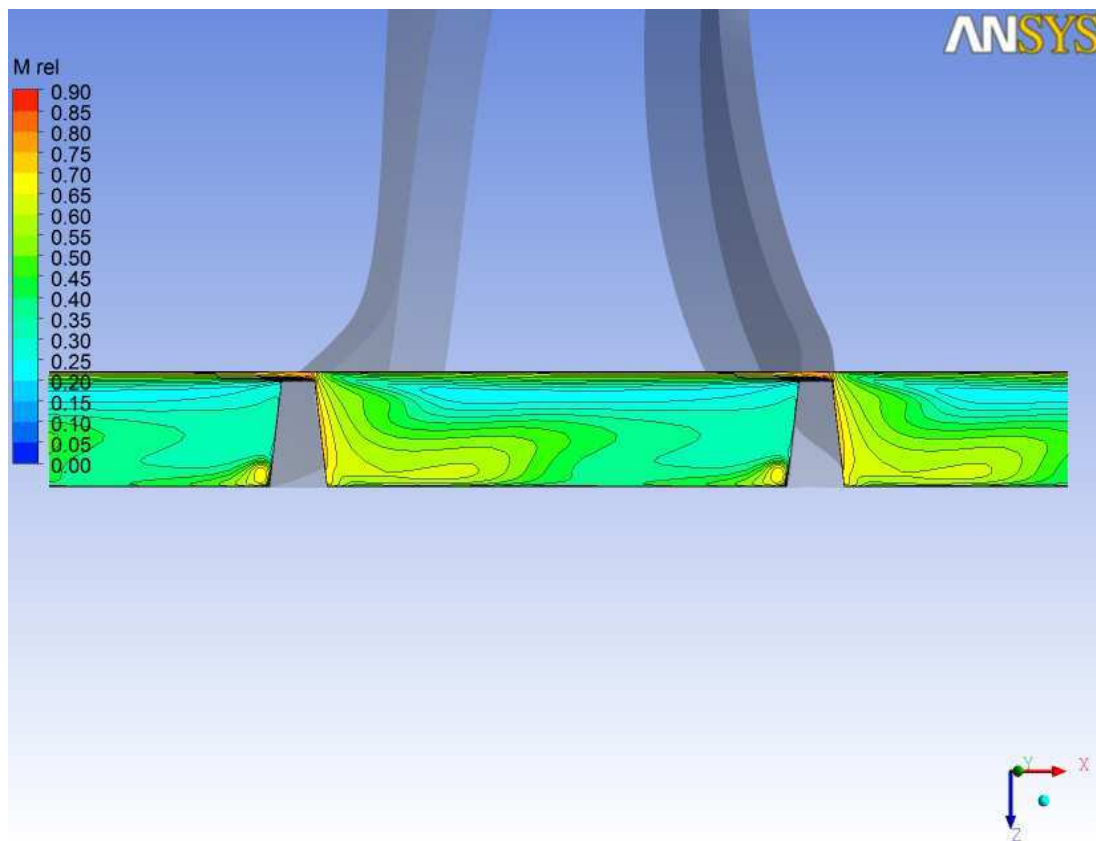


Рис.11. Поля чисел Маха в относительном движении на выходе из рабочего колеса

Анализ визуализации структуры потока помогает лучше разоб- раться с особенностями течения в РК и, соответственно, спрофилировать рабочее колесо с оптимальными геометрическими параметрами.

В таблице 1 представлено сравнение длительности вычислений для сеток с разным количеством элементов. Расчёты производились на кластере, для вычисления одного режима использовался один узел. В каждом узле используется четырехядерный процессор. Также использовалась функция HP MPI Local Parallel для распараллеливания вычислений.

Таблица 1. Сравнение длительности вычислений для сеток с разным количеством элементов

Кол-во яче- ек	Кол-во итераций	Средняя дли- тельность рас- чета одного режима, мин	Средний размер файла ре- зультатов
380,000	500	300	157 Мб
380,000	1250	540	165 Мб
700,000	1000	450	272 Мб
1,280,000	500	540	490 Мб

Основные планируемые результаты: Проведение оптимизации рабочего колеса методами вычислительной аэродинамики.

Область возможного использования результатов: возможность проведения численного эксперимента для проектируемых трансзвуковых центробежных колес с минимальными временными и денежными затратами, дальнейшая возможность их оптимизации рабочих колёс с целью повышения их эффективности, снижения энергозатрат и, соответственно, снижения стоимости дальнейшей эксплуатации. Также возможно использование методики для построения аналогичных объектов турбомашиностроения и использование выводов по данной работе в учебном процессе.



Работа выполнена при поддержке Советом по грантам Президента Российской Федерации (грант № МК-5839.2012.8).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Гамбургер Д.М. Численное моделирование течения вязкого газа в центробежной компрессорной ступени: методика и результаты [Текст]: дис. ... канд. техн. наук – СПбГПУ, 2009. – 190 с.
2. Никитин Е.Г., Галеркин Ю.Б., Кожухов Ю.В. Результаты моделирования пространственного течения осерадиального рабочего колеса с применением программного пакета Ansys CFX. XL Неделя науки СПбГПУ. Материалы международной научно-практической конференции. Ч. III. 2011 г. с. 92 – 94.
3. Никитин Е.Г., Галеркин Ю.Б., Кожухов Ю.В. Методика построения расчётной сетки осерадиального рабочего колеса центробежного компрессора для расчёта вязкого течения с использованием пакета программ ANSYS CFX. XXXIX Неделя науки СПбГПУ. Материалы международной научно-практической конференции. Ч. III. 2010 г. с. 91 – 93.
4. К.А. Кабальк, Е.Г. Никитин, Ю.Б. Галеркин, Ю.В. Кожухов, В. Крылович Исследование осерадиальных дозвуковых и транзвуковых рабочих колес центробежных компрессоров методами вычислительной газодинамики с применением пакета программ ANSYS CFX. Материалы лучших докладов XXXIX Недели науки СПбГПУ, 2011г., с 8-11.