



Разработка рекомендаций по формированию численных моделей рабочего процесса осевых компрессоров для расчёта с их помощью границ рабочей области пневмотормоза¹

- | | |
|------------------------|--|
| А. Б. Прокофьев | доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой теории двигателей летательных аппаратов имени В. П. Лукачева; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва, г. Самара; prok@ssau.ru |
| Ю. Д. Новикова | старший преподаватель кафедры теории двигателей летательных аппаратов имени В. П. Лукачева; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва, г. Самара; novikova@ssau.ru |
| В. Н. Матвеев | доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теории двигателей летательных аппаратов имени В. П. Лукачева; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва, г. Самара; matveev.vn@ssau.ru |

В работе решается частная задача общей задачи динамики протекания процесса сжатия в пневмотормозе, охватывающая цикл рабочих (близких к номинальному) режимов газотурбинных двигателей со свободной турбиной. Для определения границ рабочих областей пневмотормозов на базе многоступенчатых осевых компрессоров разработаны рекомендации по выбору конфигурации и значений параметров конечно-элементной сетки потока в этих устройствах. Предложенные рекомендации позволяют снизить количество сеточных элементов в моделях межлопаточных каналов компрессоров без уменьшения точности определения границ рабочих областей пневмотормозов. Как показала апробация разработанных рекомендаций их применение даёт возможность более чем в два раза сократить время газодинамического проектирования пневматических тормозов.

Ключевые слова: многоступенчатый осевой компрессор; численное моделирование; запас газодинамической устойчивости компрессора; модель турбулентности; граница «запирания»; пневматическое тормозное устройство

Цитирование: Прокофьев, А. Б. Разработка рекомендаций по формированию численных моделей рабочего процесса осевых компрессоров для расчёта с их помощью границ рабочей области пневмотормоза / А. Б. Прокофьев, Ю. Д. Новикова, В. Н. Матвеев // Динамика и виброакустика. – 2024. – Т. 10, №4. – С. 109-121. DOI: 10.18287/2409-4579-2024-10-4-109-121

¹Статья опубликована по материалам диссертационной работы на соискание степени кандидата технических наук Ю. Д. Новиковой «Метод проектного расчета пневматического тормозного устройства для испытаний газотурбинных двигателей со свободной турбиной» (Самара, 2024 г.)

Введение

В процессе производства газотурбинных двигателей (ГТД) со свободной турбиной (СТ), а также после периодических и внеплановых ремонтов для подтверждения их работоспособности, качества и надёжности проводятся приёмо-сдаточные испытания этих ГТД на базе специальных испытательных комплексов. Ключевым элементом этих комплексов, а также наиболее дорогостоящим и наиболее продолжительным по времени создания, является грузочное (тормозное) устройство. Значительная доля используемых при испытаниях наземных ГТД тормозных устройств – это пневматические тормозные устройства.

Под пневматическим тормозным устройством понимается многоступенчатый осевой компрессор (МОК) с лемнискатным насадком на входе и выхлопным устройством на выходе. Одним из преимуществ применения пневмотормозов является возможность использования для его создания материальной части серийно производимых авиационных ГТД, отработавших свой лётный ресурс. Выполнить предварительный анализ согласования, выбранного МОК и испытуемого двигателя, возможно, сопоставив рабочую область пневмотормоза, построенную на основе его экспериментальных характеристик, с дроссельной характеристикой испытуемого двигателя. Однако зачастую осевые компрессоры обладают узким диапазоном рабочих режимов, их рабочая область может не перекрывать полностью или частично требуемый участок дроссельной характеристики. В этом случае необходимо выполнить модификацию компрессора с целью смещения и/или расширения границ его рабочей области. Использование традиционных рекомендаций по созданию численных моделей потока в МОК позволяет выполнить требуемые исследования с достаточной точностью, однако уменьшение времени, затрачиваемого на моделирование МОК, позволит снизить сроки и стоимость создания пневматических тормозных устройств. В связи с этим целесообразно разработать рекомендации по построению численных моделей потока в МОК, предназначенного для создания на его основе пневмотормоза. Таким образом, решается частная задача общей задачи динамики протекания процесса сжатия в пневмотормозе, охватывающая цикл рабочих режимов ГТД СТ, близких к номинальному режиму работы. С помощью численных моделей на базе предлагаемых рекомендаций возможно более чем в два раза сократить время газодинамического проектирования пневматических тормозов.

1 Описание базового многоступенчатого осевого компрессора и его экспериментальных характеристик

Изучение влияния параметров численной модели на получаемые результаты численного моделирования рабочего процесса МОК осуществлялось с использованием компрессора низкого давления двигателя производства ПАО «ОДК-Кузнецов» (далее базового МОК) [1]. Основные параметры базового МОК приведены в таблице 1. Для верификации численных моделей рабочего процесса базового МОК были использованы результаты экспериментального определения его характеристик. На рисунке 1 приведена схема базового МОК, а на рисунках 2 и 3 представлены его экспериментальные напорные и мощностные характеристики (параметры базового МОК приведены к стандартным атмосферным условиям – САУ).

Все зависимости даны в относительном виде. За базовую принята расчётная точка на характеристике МОК с максимальным КПД для относительной приведённой частоты вращения $\bar{n}_{пр} = n_{пр}/n_{прр} = 1$, где $n_{прр}$ – приведённая частота вращения компрессора на расчётном, базовом режиме при температуре $T_n^* = 15$ °С. Относительный приведённый расход воздуха на этом режиме равен $\bar{G}_{впр} = \frac{G_{впр}}{G_{впрр}} = 1$, где $G_{впрр}$ – приведённый расход воздуха в точке с максимальным КПД.

Таблица 1 – Основные параметры базового МОК

Параметр	Обозначение	Значение
Количество ступеней, шт.	z	3
Относительный диаметр втулки рабочего колеса, (первая / вторая / последняя ступень)	$\overline{d_{вт i}} = D_{вт i} / D_{к i}$	0,46 / 0,66 / 0,71
Относительная высота рабочей лопатки, (первая / вторая / последняя ступень)	$\overline{h_{л i}} = h_{л i} / S_i$	2,37 / 2,07 / 1,82
Окружная скорость на периферии РК, м/с, Приведённая к стандартным атмосферным условиям (первая / вторая / последняя ступень)	$U_{пер пр}$	344,9 / 312,4 / 271,8

В соответствии с рекомендациями МИ2083-90 были определены предельные относительные погрешности косвенных измерений (таблица 2) [2]. Наибольшие предельные относительные погрешности определения расхода воздуха δG_B , мощности компрессора δN_K и крутящего момента $\delta M_{кр}$ составили для частоты вращения в относительном виде $\bar{n}_{пр} = 0,92$ соответственно 2,31 %, 4,84 % и 4,87 %, а для частоты вращения в относительном виде $\bar{n}=1,00$ соответственно – 1,55 %, 3,70 % и 3,73 %.

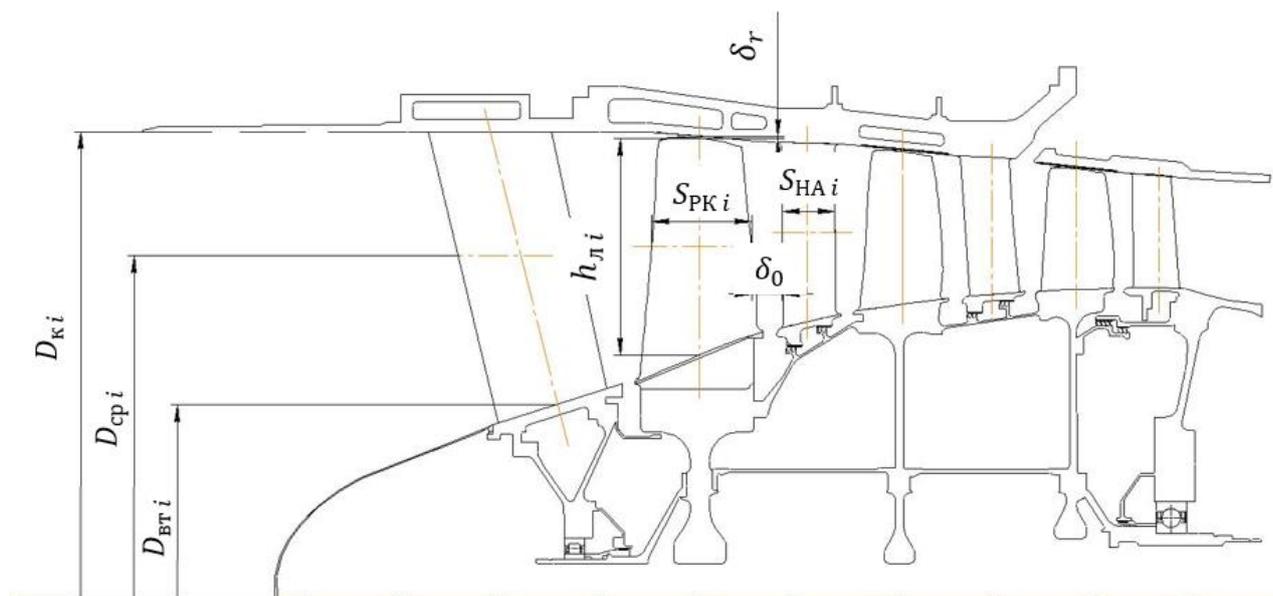


Рисунок 1 – Схема базового многоступенчатого осевого компрессора
 $D_{к i}$ – наружный (периферийный) диаметр; $D_{вт i}$ – втулочный диаметр;
 $D_{сп i}$ – средний диаметр; $h_{л i}$ – высота лопатки; $S_{ПК i}$ – ширина венца рабочего колеса;
 $S_{НА i}$ – ширина венца направляющего аппарата; δ_0 – осевой зазор; δ_r – радиальный зазор

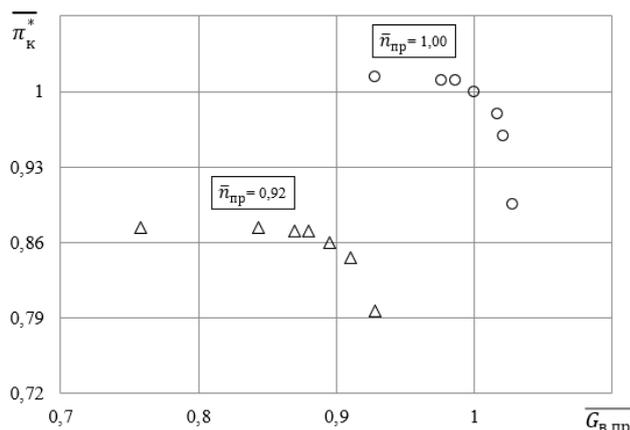


Рисунок 2 – Экспериментальная зависимость степени повышения давления от приведённого расхода воздуха и приведённой частоты вращения ротора компрессора в относительном виде

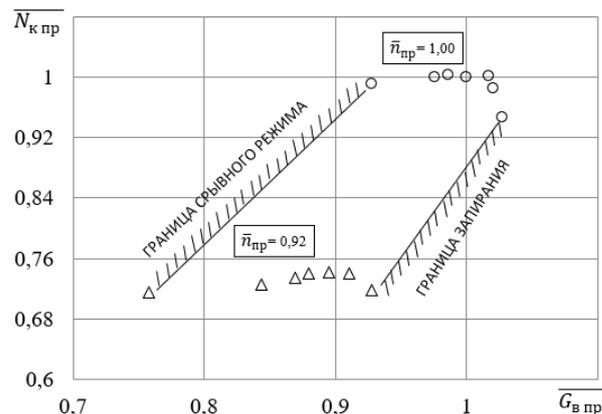


Рисунок 3 – Экспериментальная зависимость мощности от приведённого расхода воздуха и приведённой частоты вращения ротора компрессора в относительном виде

Таблица 2 – Значения предельной относительной погрешности косвенных измерений для некоторых определяемых параметров с доверительной вероятностью 95%

Обозначение режима		$\delta G_{в,}$ %	$\delta \pi_{к}^*$ %	$\delta L_{к,}$ %	$\delta N_{к,}$ %	$\delta M_{кр,}$ %	Обозначение режима		$\delta G_{в,}$ %	$\delta \pi_{к}^*$ %	$\delta L_{к,}$ %	$\delta N_{к,}$ %	$\delta M_{кр,}$ %
	$\overline{G}_{в}$							$\overline{G}_{в}$					
$\overline{n}_{пр} = 0,92$	0,76	2,31	0,37	3,34	3,97	4,00	$\overline{n}_{пр} = 1,00$	0,93	1,55	2,74	3,15	3,19	0,33
	0,84	1,87	0,37	3,87	4,30	4,33		0,98	1,41	2,93	3,25	3,29	0,33
	0,87	1,76	0,38	3,99	4,36	4,39		0,99	1,38	2,97	3,27	3,31	0,33
	0,88	1,72	0,38	4,00	4,36	4,39		1,00	1,34	3,05	3,33	3,37	0,34
	0,90	1,66	0,38	4,11	4,43	4,46		1,01	1,30	3,12	3,38	3,42	0,34
	0,91	1,61	0,39	4,24	4,53	4,56		1,02	1,29	3,22	3,47	3,51	0,35
	0,93	1,55	0,41	4,59	4,84	4,87		1,03	1,27	3,47	3,70	3,73	0,37

2 Построение рабочей области пневмотормоза по экспериментальным данным

На основании экспериментальных характеристик базового МОК (рисунки 2 и 3) была сформирована его рабочая область как пневмотормоза. Для этого мощностные характеристики были перестроены в координатах «приведённая мощность компрессора $N_{к пр}$ – приведённая частота вращения компрессора $n_{пр}$ » и приобрели вид вертикальных линий (рисунок 4). Для получения рабочей области пневмотормоза крайние точки этих линий были соединены между собой.

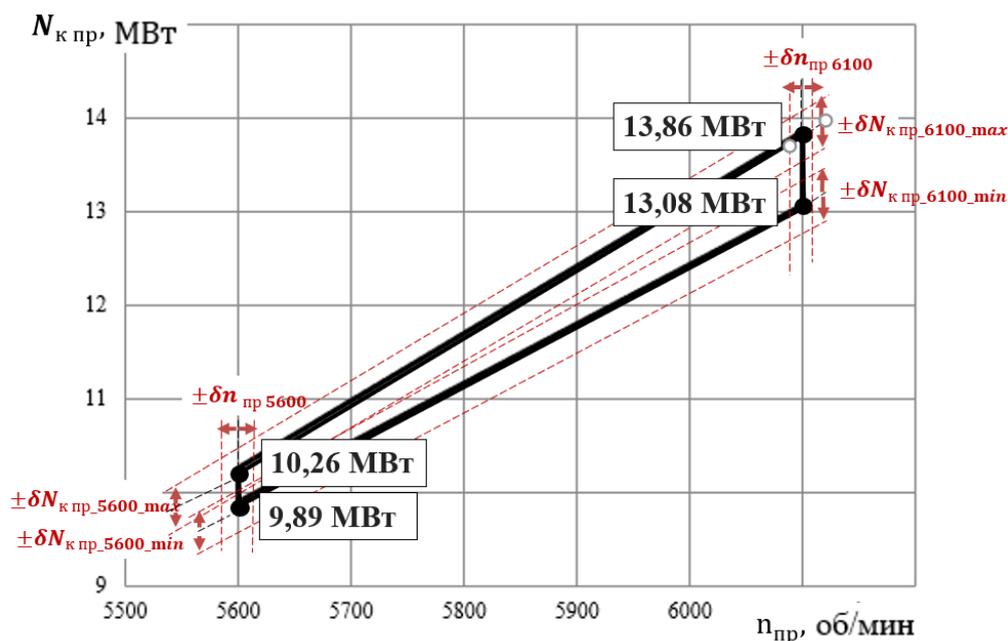


Рисунок 4 – Рабочая область пневмотормоза на основе базового МОК в координатах $N_{к пр} - n_{пр}$

На границы рабочих областей пневмотормоза на рисунке 4 нанесены предельные относительные погрешности измерений мощности и частоты вращения ротора.

Из анализа рабочей области пневмотормоза по параметрам $N_{к пр} - n_{пр}$, представленной на рисунке 4, следует, что он работоспособен в диапазоне приведённых частот вращения $n_{пр}$ от 5600 мин^{-1} до 6100 мин^{-1} . Для приведённой частоты вращения $n_{пр} = 5600 \text{ мин}^{-1}$ минимальное значение приведённой мощности $N_{к пр}$ составляет $9,89 \text{ МВт}$, а максимальное значение – $10,26 \text{ МВт}$. Таким образом, диапазон изменения приведённой мощности равен $0,37 \text{ МВт}$. Для приведённой частоты вращения $n_{пр} = 6100 \text{ мин}^{-1}$ минимальное значение приведённой мощности $N_{к пр}$ составляет $13,08 \text{ МВт}$, максимальное значение – $13,86 \text{ МВт}$, диапазон изменения приведённой мощности равен $0,78 \text{ МВт}$. Из рисунка 4 видно, что для базового МОК диапазон изменения приведённой мощности является весьма узким и составляет менее 1 МВт – от $0,37 \text{ МВт}$ для приведённой частоты вращения 5600 мин^{-1} и до $0,78 \text{ МВт}$ для приведённой частоты вращения 6100 мин^{-1} .

3 Выбор параметров численной модели рабочего процесса многоступенчатого осевого компрессора как пневмотормоза

Численное моделирование проводилось согласно распространённому подходу [3, 4] с использованием методов вычислительной газовой динамики (CFD), основанных на численном решении осреднённых по времени уравнений Навье-Стокса (RANS) в коммерческом программном пакете NUMECA Fine/Turbo. На первом этапе была создана расчётная область, представляющая собой область течения газа вокруг одной лопатки каждого лопаточного венца компрессора, и выполнена её дискретизация. Затем были определены параметры моделирования (параметры сеточной модели, модель турбулентности), а также заданы начальные и граничные условия (на входе в компрессор задавалось значение полного давления p_n^* и полной температуры T_B^* , на выходе из расчётной области для изменения режима работы компрессора при постоянной частоте вращения варьировалось статическое давление p_k). Характеристики компрессора были рассчитаны для трёх рабочих режимов при от-

носительных частотах вращения $\bar{n}_{пр} = 0,92; 1,00$ и $1,10$. На втором этапе выполнена итеративная расчётная симуляция. На завершающем третьем этапе был проведён анализ результатов расчёта и полученных зависимостей (мощностной характеристики).

Создание геометрии расчётной области выполнялось в автоматическом блочно-структурированном сеточном генераторе для турбомашин Numeca AutoGrid5 с использованием рабочих чертежей базового МОК и рабочих чертежей его лопаток. Для импорта геометрии лопаток использовался программный комплекс Profiler [5, 6].

На следующем этапе расчётная область была разбита на элементы и создана так называемая структурированная расчётная сетка. Подход к построению таких сеток в данном сеточном генераторе Numeca AutoGrid5 заключается в следующем: создаётся двухмерная сетка в межлопаточном канале, которая затем вытягивается по высоте проточной части с заданным количеством слоёв трёхмерной сетки.

Согласно анализу литературных источников были выявлены рекомендуемые значения параметров сеточных моделей рабочего процесса МОК в сочетании с использованием модели турбулентности *k-epsilon* (*k-e*), позволяющие получить наиболее точный результат за наименьшее время. На основе выявленных рекомендаций была создана структурированная расчётная сетка. Её параметры приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Принятые значения основных параметров сеточной модели проточной части базового МОК

№ п/п	Параметр и его обозначение		Значение параметра
1.	y^+	Безразмерный параметр, характеризующий размер элемента, ближайшего к стенкам проточной части (ПЧ).	1
2.	B2B	Количество элементов в одном слое расчётной сетки.	22 000
3.	ER	Максимальный Expansion Ratio - фактор роста ячеек, показывающий во сколько раз высота одной ячейки y_{i-1} больше следующей y_i .	1,2
4.	MR	Максимальный Aspect Ratio - максимальная относительная высота ячеек канала, определяемая как отношение максимальной высоты элемента в канале y_{max} к высоте пристеночной ячейки y_{min} .	1000

В качестве граничных условий на входе в компрессор задавалось значение полного давления $p_n^* = 101325$ Па и полной температуры $T_v^* = 288,15$ К. Направление потока на входе в расчётную область было задано осевым. Расход воздуха через компрессор изменялся за счёт варьирования на втулочном диаметре статического давления на выходе из расчётной области (рисунок 5).

Далее были построены характеристики в виде зависимости $\overline{N}_{кпр} = f(\overline{G}_{впр})$ при различных относительных приведённых частотах вращения ротора компрессора $\bar{n}_{пр}$. Все полученные зависимости были представлены в относительном виде. За базовую принята точка на характеристике МОК с максимальным КПД для частоты вращения $\bar{n} = 1$. Значения всех параметров были приведены в относительный вид с помощью формулы: $\bar{x} = x/x_p$. Сравнение экспериментальных и рассчитанных характеристик базового МОК приведено на рисунке 6 (линиями представлены расчётные характеристики, значками – экспериментальные данные).

Следует отметить, что на рисунке 6 представлены характеристики МОК только при высоких частотах вращения в диапазоне $\bar{n}_{пр} = 0,92...1,10$. И в дальнейшем при определении области рабочих режимов пневмотормоза уделяется внимание только этому диапазону

относительной частоты вращения. Последнее обусловлено тем, что в настоящей статье рассматривается пневмотормоз, предназначенный для испытания ГТД СТ на частотах вращения, близких к номинальным (расчётным) частотам вращения, и применяемый для подтверждения параметров ГТД СТ в процессе серийного производства, а также после периодических и внеплановых ремонтов.

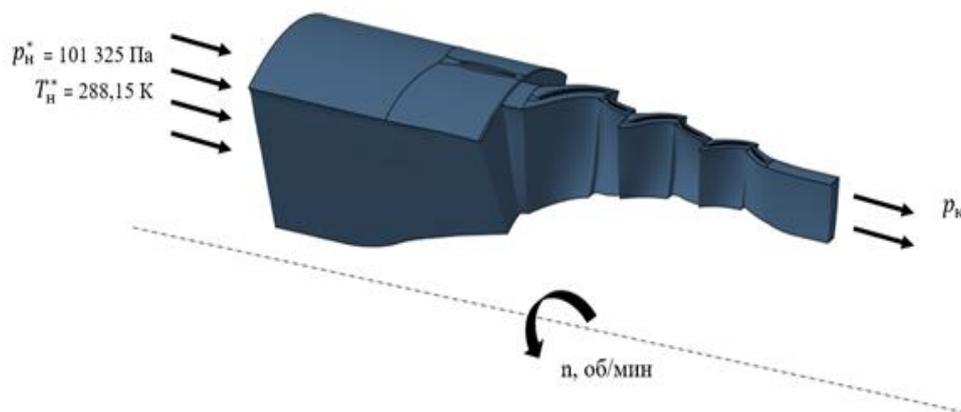


Рисунок 5 – Расчётная область базового МОК с нанесением граничных условий

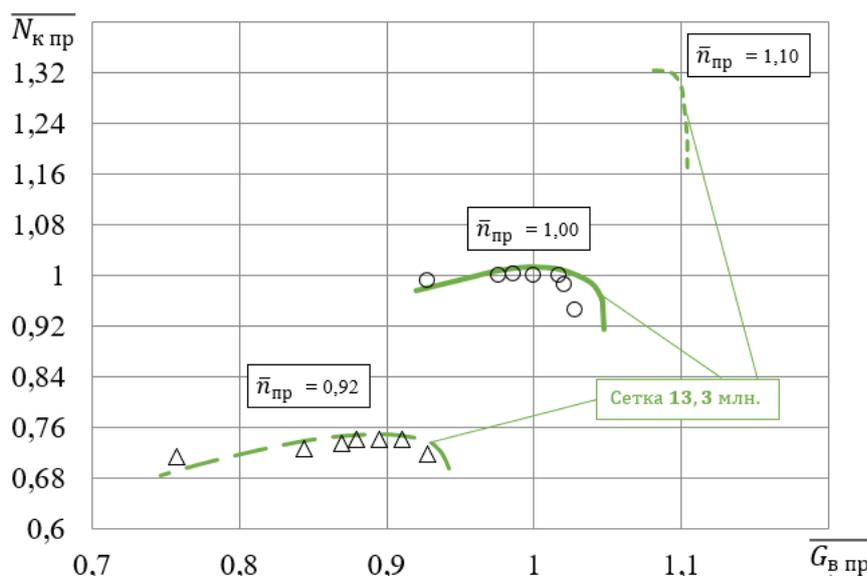


Рисунок 6 – Сравнение расчётных и экспериментальных мощностных характеристик базового МОК

Расчёты были произведены с использованием процессора Intel® Core™ i7-4790. Для ускорения процесса решения задача разделялась между семью ядрами. Время, затраченное процессором компьютера на обработку задачи по решению одной точки характеристики компрессора, равнялось в среднем 8 часов 44 минут. В среднем на одной линии характеристики располагалось десять точек и расчёт её занимал около 61 часа или 2,5 суток. Для получения рабочей области пневмотормоза необходимо получить минимум две ветки характеристики МОК. Таким образом, определение границ рабочей области одного варианта пневмотормоза (следовательно, и оценка его применимости для испытаний ГТД СТ) будет занимать в среднем не менее 5 суток. Увеличение количества рассматриваемых вариантов пневмотор-

моза приведёт к многократному увеличению времени проектирования пневмотормоза. В связи с этим была рассмотрена задача по уменьшению времени расчёта.

Анализ рабочей области пневмотормоза (рисунок 7) позволяет определить, что граница «запирания» компрессора, характерная для повышенных расходов воздуха через МОК, является нижней границей рабочей области пневмотормоза. Верхняя граница рабочей области пневмотормоза проходит через точки характеристик с максимальным значением мощности. Таким образом, граница срывных режимов работы МОК, соответствующая пониженному расходу воздуха, не является границей рабочей области пневмотормоза. В связи с этим в рамках решаемой задачи рекомендации по формированию конечно-элементных сеток моделей потока в МОК для расчёта границ рабочей области пневматического тормоза были получены для участка характеристики от границы «запирания» до максимального значения вырабатываемой МОК мощности. Выбор этого участка обусловлен тем, что он позволяет включить в рабочую область пневмотормоза максимальный диапазон потребляемой компрессором мощности. В связи с этим часть характеристики от максимального значения мощности до границы срывных режимов может быть не использована при построении рабочей области пневмотормоза. Обеспечение работы компрессора в части характеристики от максимального значения мощности до границы срывных режимов предлагается обеспечить за счёт использования в качестве выходного устройства регулируемого сопла с центральным телом и регулируемого входного направляющего аппарата.

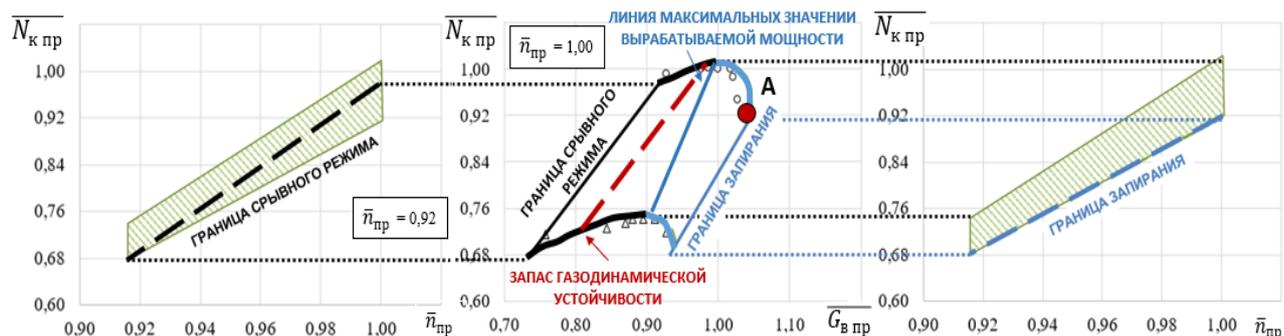
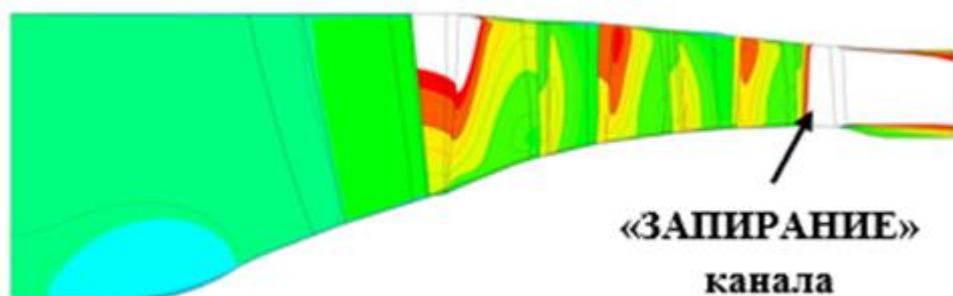
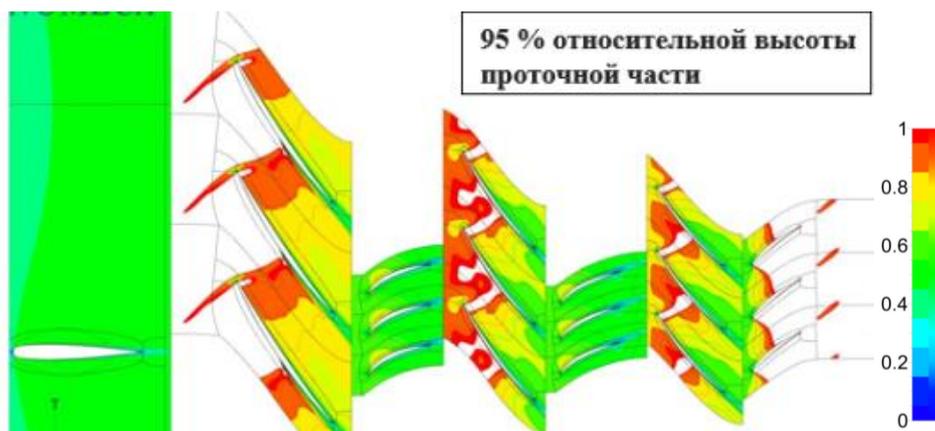


Рисунок 7 – Расположение границ работы МОК в рабочей области пневмотормоза

Из анализа картины течения потока в проточной части МОК на границе «запирания» (рисунок 8), полученной с помощью созданной численной модели, очевидно, что «запирание» происходит в самом узком сечении проточной части МОК – горле направляющего аппарата третьей ступени. Также можно отметить характерную для компрессора низкого давления картину: на периферии первого, второго и третьего рабочих колёс также происходит частичное «запирание» канала. Это связано с высокими окружными скоростями в этих зонах и относительно низкими температурами потока на входе в компрессор.



Меридиональное сечение



Цилиндрическое сечение

Рисунок 8 – Рассчитанные поля чисел Маха в относительной системе координат, полученные с помощью численной модели базового МОК в точке А (рисунок 7)

С целью сокращения времени расчёта проведено исследование влияния снижения числа конечных элементов модели на адекватность результатов расчёта, в том числе моделирование рабочего процесса вблизи границы «запирания». Установлено, что снижение числа конечных элементов для данного МОК ниже 4,6 млн. элементов до 3,4 млн. элементов, позволило адекватно смоделировать область «запирания» в горле последнего направляющего аппарата МОК. Однако, запирание в рабочих колесах компрессора, вызванное запиранием первого рабочего колеса на периферии и распространяющееся на последующие рабочие колёса, моделируется некорректно (рисунок 9). Об этом свидетельствуют эпюры чисел Маха, построенные в области горла третьего рабочего колеса: интегральные значения чисел Маха в области периферийного сечения для сеток, насчитывающих 13,3 млн. и 4,6 млн. элементов, существенно больше, чем для сетки, насчитывающей 3,4 млн. элементов (рисунок 10). Таким образом, были определены следующие относительные параметры облегчённой сеточной модели (4,6 млн. элементов), позволяющей адекватно моделировать скачки уплотнения в рабочих колесах, возникающие на границе «запирания» компрессора низкого давления: количество элементов для одного лопаточного венца в одном слое расчётной сетки $\cong 10\,500$, $u^+ \cong 1$, $ER \cong 1,35$, $MR \cong 2000$.

С помощью облегчённой сеточной модели были рассчитаны характеристики базового компрессора (рисунок 11), аналогичные представленным на рисунке 6.

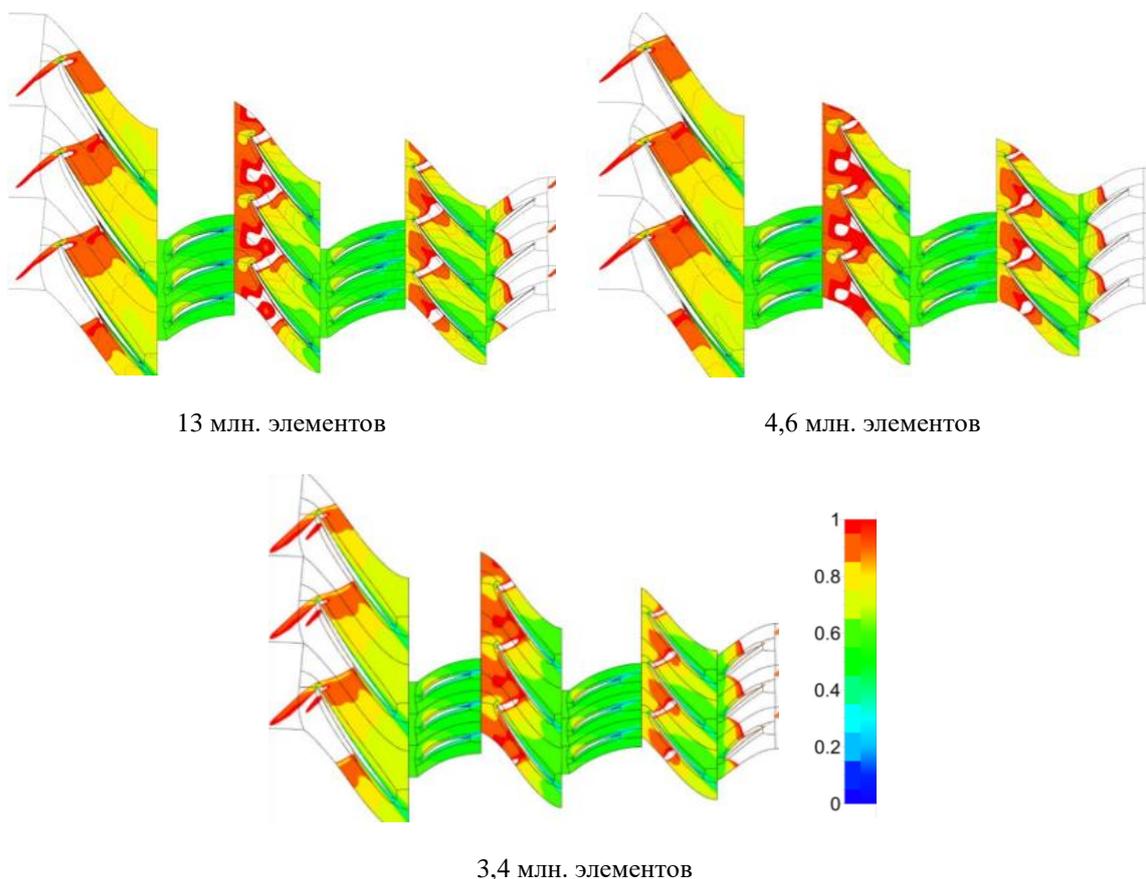


Рисунок 9 – Рассчитанные поля чисел Маха в относительной системе координат, полученные с помощью численных моделей базового МОК в точке А (рисунок 7)

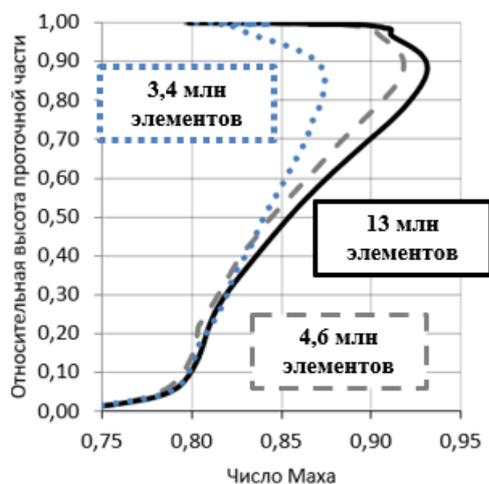


Рисунок 10 – Эпюра чисел Маха по высоте проточной части в горле рабочего колеса третьей ступени в точке А (рисунок 7)

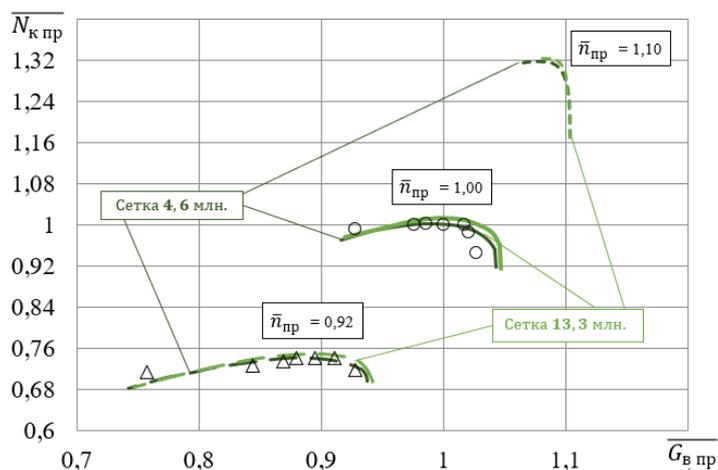


Рисунок 11 – Сравнение расчётной и экспериментальной мощностных характеристик базового МОК

Из анализа рисунка 11 следует, что результаты расчёта с помощью облегчённой конечно-элементной модели удовлетворительно совпадают с результатами, полученными с помощью сеточной модели с 13,3 млн. элементов. Расхождение между ними не превышает 1,8%,

что заметно меньше экспериментальной погрешности определения как мощности, так и крутящего момента.

Количество времени, затраченное процессором компьютера на обработку задачи по расчёту одной точки характеристики, составило порядка четырёх часов. В среднем одна кривая характеристики содержала десять точек, и её расчёт занимал около 28 часов или 1,2 суток. Таким образом, облегчённая модель позволила проводить расчёты более чем в два раза быстрее, чем модель с количеством элементов 13,3 млн. В связи с этим было решено использовать облегчённую сеточную модель для проведения исследований вариантов модификации МОК с целью их применения в качестве пневмотормозов.

4 Способ построения рабочей области пневмотормоза с помощью численной модели

На основании расчётной мощностной характеристики, представленной на рисунке 11, была построена область рабочих режимов базового МОК как пневмотормоза, приведённая на рисунке 12. Здесь же даны нижние границы рабочих областей, определённые экспериментальным путём. Они лежат выше расчётных границ не более чем на 3,2%. Это связано с тем, что в некоторых случаях граница «запирания» может быть не определена в процессе эксперимента, так как режим «запирания» является устойчивым режимом работы компрессора, а определение границы связано с существенными финансовыми и временными затратами. В связи с этим при построении рабочей области пневмотормоза во избежание возможного попадания в зону некорректного моделирования работы компрессора при необходимости следует корректировать нижнюю и верхнюю границы пневмотормоза, полученные расчётным путём (рисунок 12): нижнюю границу в соответствии с экспериментальными данными, верхнюю – в соответствии с требуемыми величинами запаса газодинамической устойчивости компрессора.

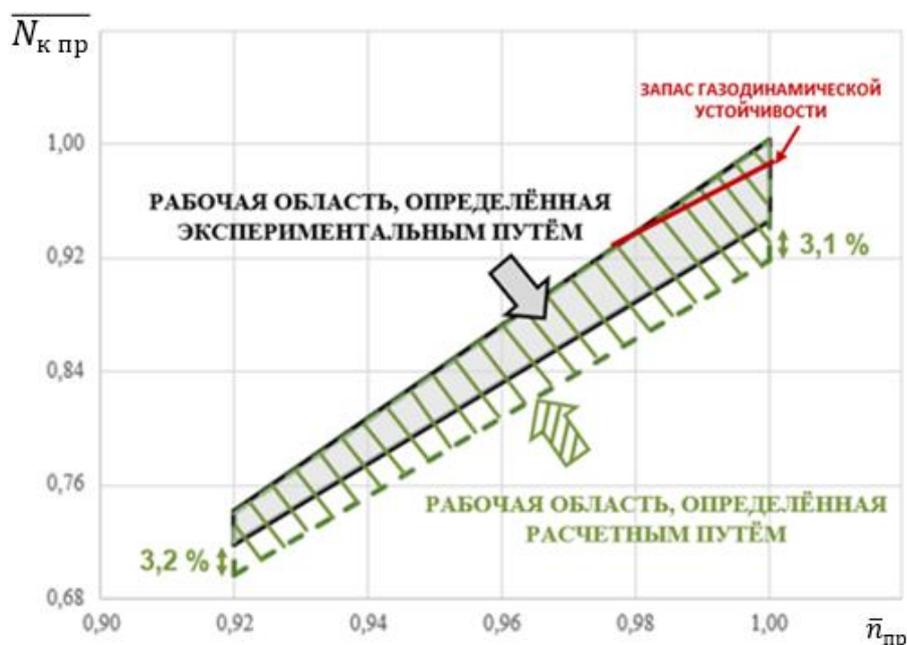


Рисунок 12 - Рабочая область пневмотормоза по параметрам $\overline{N}_{к пр}$ и $\overline{n}_{пр}$

Заключение

На основе проведенных исследований были получены рекомендации по формированию конечно-элементных сеток численных моделей потока многоступенчатых осевых компрессоров для расчёта с их помощью границ рабочей области пневмотормозов:

1. Значение безразмерного параметра y^+ следует принимать приблизительно равным 1;
2. Количество элементов для одного лопаточного венца в одном слое расчётной сетки выдерживать на уровне 10 500 элементов;
3. Максимальное значение коэффициента роста ячеек ER устанавливать на уровне 1,35;
4. Максимальную относительную высоту ячеек канала MR выдерживать приблизительно равной 2000;
5. При необходимости, во избежание возможного попадания в зону некорректного моделирования работы компрессора, следует корректировать нижнюю и верхнюю границы пневмотормоза, полученные расчётным путём.

Применение этих рекомендаций позволяет сократить время расчёта более чем в два раза и при этом обеспечить адекватность получаемых расчётных результатов экспериментальным данным.

Благодарности

Результаты исследования были получены при финансовой поддержке Российской Федерацией в лице Минобрнауки России (грант на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технологического развития, соглашение № 075-15-2024-558).

Список использованных источников

1. ПАО «ОДК-Кузнецов» [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.uecrus.com/about/structure/pao-odk-kuznetsov/> (дата обращения: 01.10.24).
2. МИ2083–90. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей. – Москва : Стандартинформ, 1991. – 11 с.
3. Попов, Г. М. Методы формирования численных моделей рабочего процесса осевых неохлаждаемых авиационных турбин: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.05 / Попов Григорий Михайлович. – Самара, Самар. нац. исслед. ун-т им. С. П. Королева (Самар. ун-т), 2017.
4. Patankar, S. V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow / S. V. Patankar // Hemisphere Publishing Corporation. – 1980. – 197 p.
5. Патент № 2013617453 Российская федерация, МПК G01M15/14. Программное средство создания и модификации компьютерных моделей лопаток турбомашин Profiler.: № 2013614900: заявлено 17.06.2013, опубликовано 14.08.2013 / Шаблий Л. С.
6. Шаблий, Л. С. Автоматизация построения моделей лопаточных венцов для CAE расчётов в программе Profiler / Л. С. Шаблий, И. Б. Дмитриева, Г. М. Попов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2012. – № 5(36). – Ч.1. – С. 208-214.

Development of recommendations for forming numerical models of the working process of axial compressors to calculate, using them, the operational boundaries of a pneumatic brake

A. B. Prokof'ev | Doctor of Science (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Theory of Aircraft Engines named after V. P. Lukachev, First Vice-Rector – Vice-Rector for Research; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; prok@ssau.ru

Yu. D. Novikova | Senior Lecturer of the Department of Theory of Aircraft Engines named after V. P. Lukachev; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; novikova@ssau.ru

V. N. Matveev | Doctor of Science (Engineering), Professor of the Department of Theory of Aircraft Engines named after V. P. Lukachev; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; matveev.vn@ssau.ru

To determine the operational boundaries of pneumatic brakes based on multistage axial compressors, recommendations have been developed for selecting the configuration and parameter values of the finite element flow mesh in these devices. The proposed recommendations allow for a reduction in the number of mesh elements in models of the compressor's inter-blade channels without decreasing the accuracy of determining the operational boundaries of pneumatic brakes. Testing of the developed recommendations has shown that their application enables more than a twofold reduction in the time required for the gas-dynamic design of pneumatic brakes.

Keywords: multistage axial compressor; numerical simulation; gas-dynamic stability margin of the compressor; turbulence model; "choke" boundary; pneumatic braking device

Citation: Prokof'ev, A. B., Novikova, Yu. D. and Matveev, V. N. (2024), "Development of recommendations for forming numerical models of the working process of axial compressors to calculate, using them, the operational boundaries of a pneumatic brake", *Journal of Dynamics and Vibroacoustics*, vol. 10, no. 4, pp. 109-121. DOI: 10.18287/2409-4579-2024-10-4-109-121. (In Russian; abstract in English).

References

1. PJSC UEC-Kuznetsov [Electronic resource]. – URL: <https://www.uecrus.com/about/structure/pao-odk-kuznetsov/> (date of access: 01.10.24).
2. Standartinform (1991), MI2083–90. *Measurements are indirect. Determination of measurement results and estimation of their errors*, Moscow. (In Russian)
3. Popov, G. M. (2017), "Methods for generating numerical models of the working process of axial uncooled aircraft turbines", Ph. D. Thesis, Samara, Russia. (In Russian)
4. Patankar, S. V. (1980), *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publishing Corporation, 197 p.
5. Shabliy, L. S. Samara National Research University named after Academician S. P. Korolev (2013), *Programmnoe sredstvo sozdaniya i modifikacii komp'yuternyh modelej lopatok turbomashin Profiler* [Profiler software tool for creating and modifying computer models of turbomachinery blades], Russia, Pat. 2013617453. (In Russian)
6. Shabliy, L. S., Dmitrieva, I. B. and Popov, G. M. (2012), "Avtomatizaciya postroeniya modeley lopatochnyh vencov dlya CAE raschyotov v programme Profiler" [Automatization of creation vane models for CAE with Profiler], *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S. P. Korolyova (nacional'nogo issledovatel'skogo universiteta)*. – № 5(36). – pp. 208-214.