

УДК 621.515

А. А. МИРОШНИЧЕНКО, аспирант СумГУ, Сумы;
А. А. ОБУХОВ, научный сотрудник ПАО «Сумское НПО им. М.В. Фрунзе»;
В. П. ПАРАФЕЙНИК, д-р техн. наук; ведущий научный сотрудник
ПАО «Сумское НПО им. М.В. Фрунзе»

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕМОДЕЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В ГЕОМЕТРИИ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ СРЕДНЕРАСХОДНОЙ СТУПЕНИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА

В статье представлены результаты физического и численного исследования семейства среднерасходных ступеней центробежного компрессора. Выполнен анализ влияния существенных немодельных изменений ширины рабочих каналов в меридиональном сечении проточной части ступени на смещение и изменение формы её газодинамических характеристик. Результаты проведенных расчетно-экспериментальных исследований позволяют при дальнейшем проектировании ступеней с внесением немодельных изменений прогнозировать с достаточной для технических расчетов точностью смещение интегральных газодинамических характеристик по условному коэффициенту расхода.

Ключевые слова: ступень центробежного компрессора, проточная часть, немодельные изменения, вычислительная гидродинамика, интегральные газодинамические характеристики.

СОКРАЩЕНИЯ И УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- b** – ширина канала в элементах проточной части;
- η** – коэффициент полезного действия (КПД);
- ψ** – коэффициент напора;
- Φ** – условный коэффициент расхода;
- БЛД** – безлопаточный диффузор;
- ОНА** – обратно-направляющий аппарат;
- ПЧ** – проточная часть;
- РК** – рабочее колесо;
- ЦК** – центробежный компрессор.

ИНДЕКСЫ

- '** – параметры и критерии, относящиеся к модифицированной ступени;
- 0** – параметры потока определенные в сечении $0-0$, расположенном перед РК;
- 2** – параметры потока определенные в сечении $2-2$, расположенном на выходе из РК;
- 3** – параметры потока определенные в сечении $3-3$, расположенном на входе в диффузор;
- 6** – параметры потока определенные в сечении $6-6$, расположенном за лопатками ОНА;
- max** – максимальное значение критерия эффективности;
- min** – минимальное значение критерия эффективности, соответствующие режиму помпажа;
- опт** – критерии эффективности в расчетной точке;
- п** – политропный.

Введение

Развитие промышленности вызывает необходимость увеличения объемов

© А.А. Мирошниченко, А.А. Обухов, В.П. Парафейник, 2015

добычи различных энергоносителей. Одним из основных источников энергии является природный газ. Транспортировка углеводородных газов от места добычи к их конечному потребителю осуществляется компрессорными станциями с газоперекачивающими агрегатами, создаваемыми на основе ЦК и газотурбинного привода. Эффективность ЦК зависит от газодинамического совершенства основных элементов ступени его ПЧ: РК, диффузора и ОНА. Значительная энергоемкость ЦК предъявляет высокие требования к его эффективности, а также вызывает необходимость проведения научно-исследовательских работ по их совершенствованию.

В условиях жесткой конкуренции на рынке продукции машиностроения разработчик ЦК ограничен сжатыми сроками проектирования, изготовления и поставки оборудования заказчику, что требует наличия у его разработчика надежных методов проектирования компрессоров.

Из известных методов проектирования ЦК [1–3] в ПАО «Сумское НПО им. М.В. Фрунзе» (далее ПАО) нашел применение метод моделирования (масштабирования), преимуществами которого является сравнительная простота и оперативность получения проектных газодинамических характеристик, так как ПЧ создается на основе существующих в информационной базе модельных ступеней. Среди недостатков данного метода следует отметить невозможность достижения эффективности ПЧ компрессора выше используемого прототипа, а также необходимость иметь обширную базу экспериментально проверенных ПЧ, которые могли бы обеспечить заданные параметры.

Степень ЦК имеет предел экономичности обусловленной массовым расходом газа, перемещаемым через неё, при соответствующих соотношениях различных геометрических параметров ПЧ. Для согласования работы ступеней ЦК при его проектировании методом моделирования приходится использовать смещение зоны максимальной эффективности газодинамической характеристики ступени относительно оптимального значения условного коэффициента расхода. Обеспечить требуемое смещение интегральных газодинамических характеристик ступени ЦК удастся путем внесения немодельных изменений в элементы ПЧ ступени имеющейся в проектной организации базы модельных ступеней ЦК [4].

Термин «немодельные изменения» геометрии ПЧ в настоящее время является малораспространенным в компрессоростроении. Это обусловлено тем, что турбокомпрессор, представляющий из себя сложное изделие в конструктивном и технологическом отношении, является продуктом компромиссных решений. Они имеют место при выборе компоновочных схем ЦК и ПЧ, решении вопросов статической и динамической прочности, а также связаны с выбором унифицированных и технологических решений. Таким образом, под термином «немодельные изменения», строго говоря, могут подразумеваться различные изменения, оказывающие влияние на параметры ЦК, поскольку метод моделирования имеет широкое распространение не только при проектировании турбомашин, но и в механике в целом.

В настоящей работе исследуется влияние немодельных изменений в геометрии ПЧ ступени ЦК, в частности, ширины рабочих каналов в меридиональном сечении ступени, оказывающие наиболее существенные влияние на их газодинамические характеристики.

Анализ известных литературных данных указывает на отсутствие систематизированных рекомендаций по внесению немодельных изменений в ПЧ ступеней ЦК и определенных границ их применения. Поэтому вопрос определения границ применения и формирования рекомендаций для уточнения метода

проектирования с внесением немодельных изменений в геометрию ПЧ ступени ЦК является важным вопросом проектирования и дальнейшего развития методологии разработки промышленных ЦК.

1 Постановка задачи и объекты исследования

Задачей данной работы было исследование влияния немодельных изменений, вызванных отклонением ширины рабочих каналов в меридиональном сечении ПЧ ступени ЦК от их проектных значений в базовой ступени, на её интегральные газодинамические характеристики. Исследование проводилось в два этапа: первый – физический эксперимент на аэродинамическом стенде и отработка методики вычислительного эксперимента с использованием экспериментальных данных; второй – численное моделирование с использованием программно-технических средств *ANSYS CFX*. Физический эксперимент заключался в исследования газодинамических характеристик двух ступеней: базовой и модифицированной ступени, меридиональное сечение которой было расширено на 10 %. Основной задачей первого этапа работ было получение экспериментальных газодинамических характеристик на модели среднерасходной ступени ЦК, имеющейся в информационной базе ПАО, а также модифицированной ступени и отработка методики вычислительного эксперимента по моделированию рабочего процесса ступени ЦК со значительными немодельными отклонениями. Дальнейшее численное исследование на втором этапе работ проводилось для ряда ступеней с изменением ширины каналов ПЧ в диапазоне от -30 % до + 30 % с шагом 10 %.

Используемая базовая ступень ЦК является средненапорной ($\beta_{л2} = 32^\circ$) и относится к ступеням промежуточного типа. Её номинальный режим работы соответствует значению условного коэффициента расхода равного $\Phi_0 = 0,06$ и относится к среднерасходным ступеням, широко применяемым в ЦК конструкции ПАО. Величина запаса по помпажу анализируемой ступени составляет 44 %.

Модифицированная ступень получена путем расширения меридионального сечения базовой ступени на 10 %, при этом величина Φ_0 ступени составляет 0,066. Основные геометрические параметры базовой и расширенной ступеней, использовавшихся при физическом и вычислительном экспериментах, приведены в табл. 1, а их эскизы представлены на рис. 1.

Таблица 1.

Основные конструктивные параметры экспериментально исследуемых ступеней ЦК

Ступень	D_2 , мм	b_2 , мм	$D_{вт}$, мм	D_0 , мм	b_3 , мм	Z_{1-2}	Z_{5-6}
База	400	26,6	129,4	225,9	28,2	11	24(12)
База+10 %		29,3	124,1	230,4	31		

Таким образом, объектами исследования являются трехзвенные ступени ЦК (РК+БЛД+ОНА). Для осуществления физических экспериментов было изготовлено 2 комплекта ПЧ модельных ступеней с геометрией роторных и статорных элементов указанных в табл. 1. При проведении вычислительных экспериментов диапазон изменения геометрических параметров модифицированных ступеней соответствовал значениям: ширина РК на выходе $b_2 = 18,6-34,6$ мм, ширина диффузора $b_3 = 19,7-36,7$ мм; диаметр РК на входе $D_0 = 202-245$ мм при неизменном значении остальных геометрических параметров, указанных в табл. 1. Геометрические параметры, определяющие меридиональный профиль ступени (b_2 , b_3 и т.д.) изменялись

линейно. Значения диаметров, определяющих входное и выходное сечения РК модифицированной ступени, вычислялись из условия линейного увеличения площади.

Целью экспериментальных исследований является подтверждение заявленных газодинамических характеристик базовой ступени, а также подтверждение допущения об их линейном смещении при расширении рабочих каналов ПЧ в меридиональном сечении.

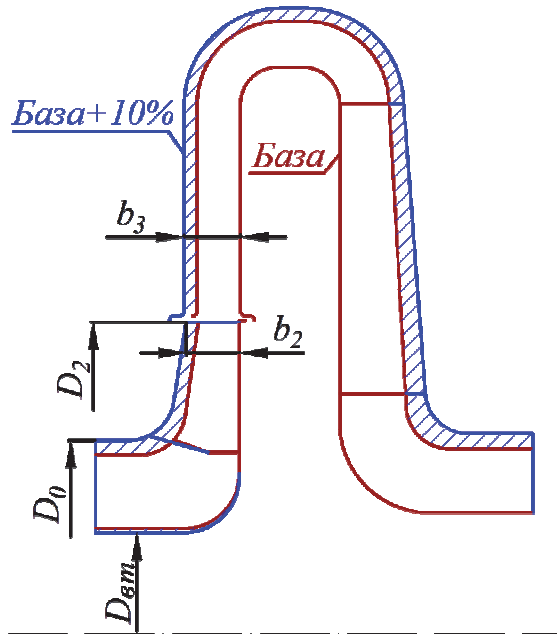


Рис. 1 – Меридиональные сечения исследуемых ступеней

Экспериментальные исследования эффективности ступеней ЦК проводились на аэродинамическом стенде АД-400 научно-исследовательского комплекса ПАО [5]. Стенд был оснащен пневмометрическими приборами, позволяющими определять основные критерии эффективности ПЧ с необходимой точностью [6]. Значения относительных погрешностей определения политропного КПД для обеих ступеней не превышало 2 % и 2,5 % для величин политропного коэффициента напора.

Частота вращения роторов модельных ПЧ устанавливалась из условия обеспечения $Mu_2 \approx 0,63$ и корректировалась на протяжении эксперимента, в зависимости от температуры на входе в ступень. При этом значения условного числа Рейнольдса достигали значений $Reu_2 = 4,4 \cdot 10^5$.

Для определения критериев эффективности измерялись параметры потока перед РК и после ОНА (T_0, P_0, T_6, P_6). Расход воздуха перемещаемого через ступень в процессе испытаний, измерялся при помощи диафрагмы, установленной во всасывающем патрубке. Относительная погрешность измерения расхода составила 1,5 %.

2 Критерии эффективности ступени ЦК

Критериями эффективности для ступени ЦК являются интегральные газодинамические параметры – коэффициент политропного напора $\psi_n = f(\Phi_0)$ и политропный КПД $\eta_n = f(\Phi_0)$, которые определялись по следующим зависимостям [2]:

– условный коэффициент расхода

$$\Phi_0 = \frac{4\bar{V}_0}{\pi D_2^2 u_2}, \quad (1)$$

где \bar{V}_0 – объёмный расход по условиям всасывания, м³/мин; $u_2 = \pi D_2 n / 60$ – окружная скорость на выходе из рабочего колеса, м/с; D_2 – диаметр рабочего колеса, м; n – частота вращения ротора компрессора, об/мин;

– коэффициент политропного напора ступени

$$\psi_n = \frac{RT_0 \sigma (\Pi^{1/\sigma} - 1)}{u_2^2}, \quad (2)$$

где R – газовая постоянная, Дж/(кг·К); $\Pi = P_6/P_0$ – отношение давлений;
 $\sigma = \ln(\Pi)/\ln(P_6/P_0)$ – газодинамическая функция;
– политропный КПД

$$\eta_{\text{п}} = \frac{RT_0\sigma(\Pi^{1/\sigma} - 1)}{C_p(T_6 - T_0)}, \quad (3)$$

где P_6, P_0 – давление за лопатками ОНА и перед РК соответственно, Па; T_6, T_0 – температура за лопатками ОНА и перед РК соответственно, К; C_p – изобарная теплоемкость, Дж/(кг·К).

3 Особенности методики численного моделирования течения газа в ступени ЦК

Для численного моделирования использовался программный комплекс *ANSYS CFX*. Верификация методики численного моделирования проводилась путем сопоставления интегральных газодинамических характеристик ступени ЦК, полученных в результате численного эксперимента, с экспериментальными данными, полученными на аэродинамическом стенде АД-400.

Моделирование процесса течения газа в ПЧ ступени ЦК производилось в циклически-симметричной, стационарной постановке. При этом в модель были внесены следующие допущения [7]:

- параметры потока считались однородно распределенными по входному сечению;
- использована геометрически упрощенная модель перехода из РК в БЛД; при этом не моделировались боковые пазухи и течения газа в них, между РК и статорными деталями корпуса; а также не моделировалась работа лабиринтных уплотнений основного и покрывного дисков РК;
- отсутствует теплообмен с окружающей средой.

На входе в расчетную область в качестве граничных условий задавались параметры адиабатически заторможенного потока перед РК, а на выходе из расчетной области – доля массового расхода, проходящего через сегмент ПЧ.

Проточная часть ступени ЦК была заменена блочно-структурированной расчетной сеткой [8]. Для применения *SST* модели турбулентности, которая способна наиболее точно предсказывать место возникновения отрыва потока, была измельчена расчетная сетка на стенках ПЧ исследуемой ступени ЦК. Среднее значение Y^+ на всех исследуемых режимах не превышало 2. Уровень шероховатости на стенках ПЧ был принят равным 3,2 мкм. Выбор шага интегрирования t определялся из соотношения $t = 30/(\pi n)$, где n – частота вращения РК, об/мин.

Критериями сходимости численного расчета приняты флуктуации значений политропного КПД и коэффициента политропного напора. Их величина для ступени ЦК находится в пределах погрешности физического эксперимента по определению газодинамических характеристик.

Обработка результатов численного моделирования производилась в Post процессоре *ANSYS CFX* и включала определение параметров необходимых для расчета интегральных газодинамических характеристик ступени ЦК.

4 Результати аналізу фізичного і численного моделювання

Газодинамічні характеристики, отримані при фізичному і розрахунковому експерименті, для базової ступені і ступені, меридіональне сечення каналів ПЧ яких було розширено на 10 %, представлені на рис. 2.

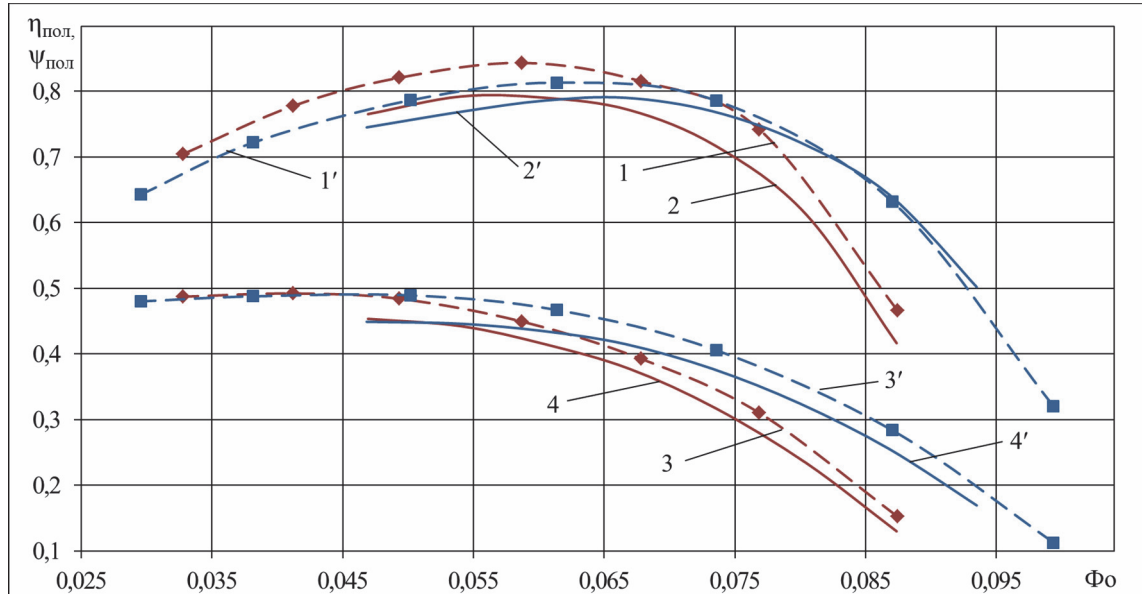


Рис. 2 – Інтегральні газодинамічні характеристики ступеней ЦК: 1, 1', 3, 3' – політропний КПД і коефіцієнт напора, відповідно, по результатам фізичного експерименту (—♦—; —■—); 2, 2', 4, 4' – політропний КПД і коефіцієнт напора, відповідно, по результатам чисельного експерименту (—♦—; —■—)

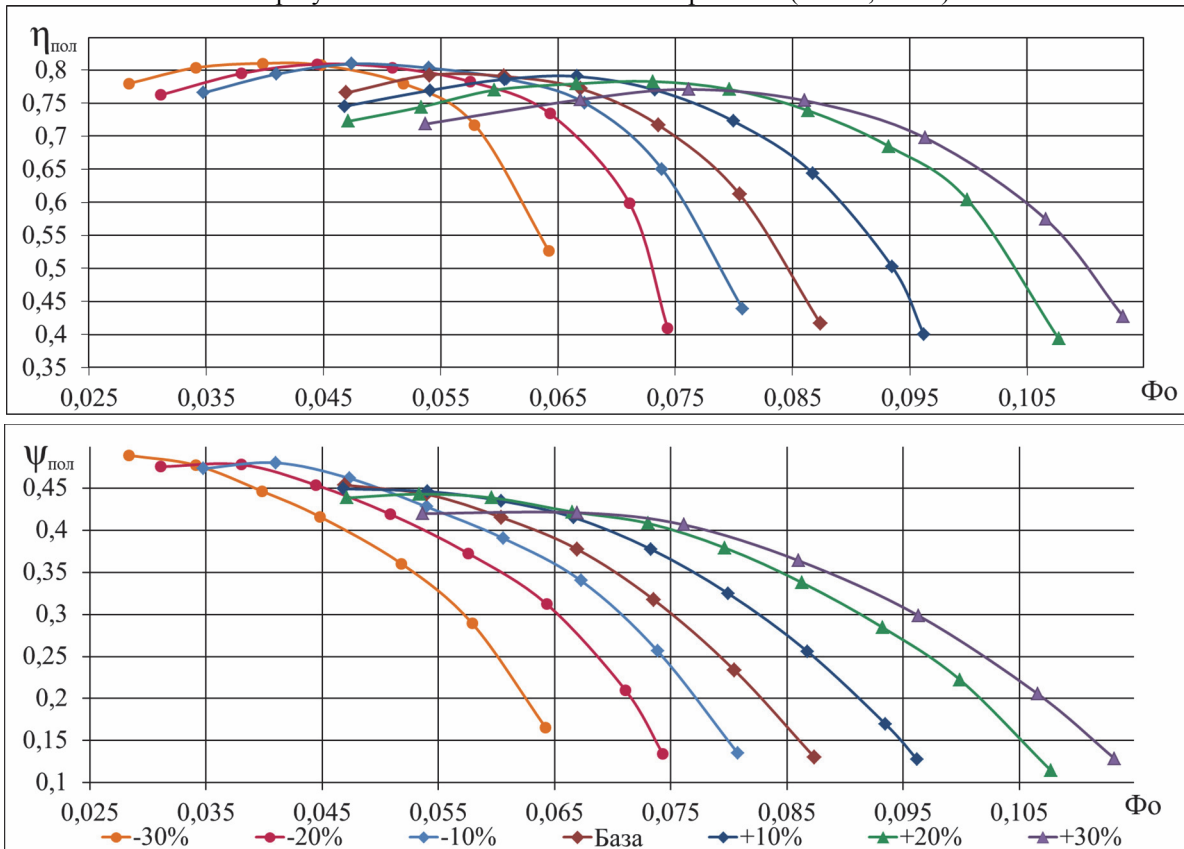


Рис. 3 – Інтегральні газодинамічні характеристики базової і модифікованих ступеней

Как видно из рис. 2, взаимное расположение интегральных газодинамических характеристик исследуемых ступеней, полученные экспериментально и численно, имеет эквидистантный характер, что свидетельствует о правильном выборе настроек решателя численного моделирования. Разность между соответствующими значениями находятся в коридоре погрешностей физического эксперимента и допущений, принятых при численном моделировании [7], что позволяет отказаться от физического эксперимента и проводить последующие исследования (для диапазона изменения ширины каналов ПЧ в меридиональном сечении в диапазоне от -30% до $+30\%$) методами вычислительной гидродинамики. Результаты расширенного численного эксперимента представлены на рис. 3.

Анализ данных, представленных на рисунке 3, позволяет сделать вывод о том, что наблюдается следующая общая тенденция: при расширении каналов ПЧ характеристики становятся более пологими, что, соответственно, расширяет зону эффективной работы. При заужении наблюдается обратная картина – характеристики становятся более крутыми.

Для более детального анализа влияния немодельных изменений геометрии ПЧ на характер изменения интегральных газодинамических характеристик, использовались следующие критерии оценки их расположения и формы [9]: величина немодельного отклонения ширины каналов ПЧ в меридиональном сечении (Δ , %); величина сдвига характеристики по условному коэффициенту расхода (δ , %); изменение относительной зоны устойчивой работы ($\Delta\bar{\Phi}_0$), величина относительного оптимального политропного КПД ($\bar{\eta}_{п\text{ опт}}$), величина относительного коэффициента политропного напора в расчётной точке ($\bar{\Psi}_{п\text{ опт}}$), относительная величина максимального значения коэффициента политропного напора ($\bar{\Psi}_{п\text{ max}}$).

Принятые критерии определялись с использованием следующих относительных значений анализируемых параметров:

– величина немодельного отклонения ширины ПЧ, %

$$\Delta = \frac{b'_2}{b_2}; \tag{4}$$

– ширина зоны устойчивой работы

$$\Delta\bar{\Phi}_0 = \frac{\Phi'_{0\text{ max}} - \Phi'_{0\text{ min}}}{\Phi_{0\text{ max}} - \Phi_{0\text{ min}}}; \tag{5}$$

– величина политропного КПД в расчётной точке

$$\bar{\eta}_{п\text{ опт}} = \frac{\eta'_{п\text{ опт}}}{\eta_{п\text{ опт}}}; \tag{6}$$

– значение коэффициента политропного напора в расчётной точке

$$\bar{\Psi}_{п\text{ опт}} = \frac{\Psi'_{п\text{ опт}}}{\Psi_{п\text{ опт}}}; \tag{7}$$

– максимальное значение коэффициента политропного напора

$$\bar{\Psi}_{п\text{ max}} = \frac{\Psi'_{п\text{ max}}}{\Psi_{п\text{ опт}}}. \tag{8}$$

Величина сдвига характеристики δ определялась на основе анализа величины смещения по условному коэффициенту расхода для базовых характеристик до совпадения с характеристиками модифицированной ступени.

Зависимости, характеризующие изменение критериев эффективности и зоны устойчивой работы ступеней ЦК при изменении ширины рабочих каналов ПЧ, представлены на рис. 4–7.

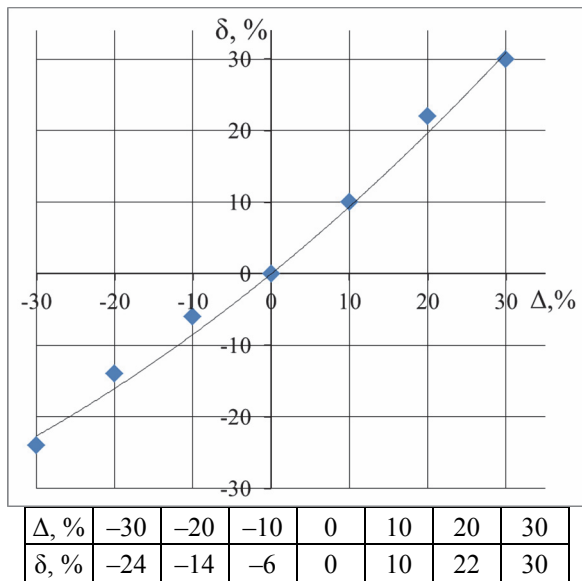


Рис. 4 – Смещение критериев эффективности по Φ_0 в зависимости от величины немодельного отклонения

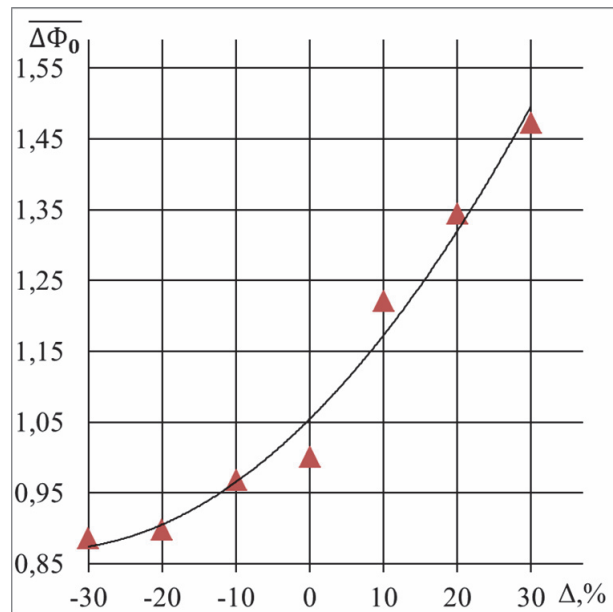


Рис. 5 – Изменение относительной ширины зоны устойчивой работы

Из рисунка 4 видно, что изменение ширины рабочих каналов ПЧ ступени ЦК приводит к смещению её интегральных газодинамических характеристик. Наблюдается линейный характер зависимости $\delta = f(\Delta)$: при расширении на 10 % характеристики также смещаются на 10 %; при 30–процентном расширении смещение достигает, соответственно, 30 %. Заужение рабочих каналов ПЧ приводит к «гистерезисному» смещению интегральных газодинамических характеристик ступени, например, при заужении на 10 % и 30 % газодинамические характеристики смещаются на 6 % и 24 %, соответственно.

На рис. 5 представлена зависимость изменения ширины зоны устойчивой работы исследуемых ступеней ЦК при изменении ширины рабочих каналов ПЧ. Из рисунка можно сделать вывод о том, что при увеличении ширины проходных каналов ПЧ в меридиональном сечении зона устойчивой работы ступени увеличивается, в то время как при заужении – уменьшается. Так при расширении ПЧ на 30 % зона устойчивой работы увеличилась на 32 %, а при заужении на 30 % уменьшается на 13 %.

На рисунках 6 и 7 представлены зависимости изменения оптимального политропного КПД, а также величины коэффициентов оптимального и максимального политропного напора при изменении ширины рабочих каналов ПЧ. Из рисунков видно, что при заужении ширины рабочих каналов ПЧ на –30 % происходит повышение политропного КПД на 2,6 % и на 5,5 % для политропного коэффициента напора на расчетном режиме работы ступени ЦК. Расширение на 30 % приводит к уменьшению относительного значения коэффициента политропного КПД на 2,4 % и на 6,5 % для относительного значения коэффициента политропного напора. Результаты проведенного исследования дают возможность прогнозировать смещение газодинамических характеристик и их значения для номинального режима работы, а

также осуществить в дальнейшем анализ влияния немодельных изменений в геометрии ПЧ исследуемой ступени на характер изменения критериев эффективности с учетом физической картины течения в отдельных элементах ПЧ.

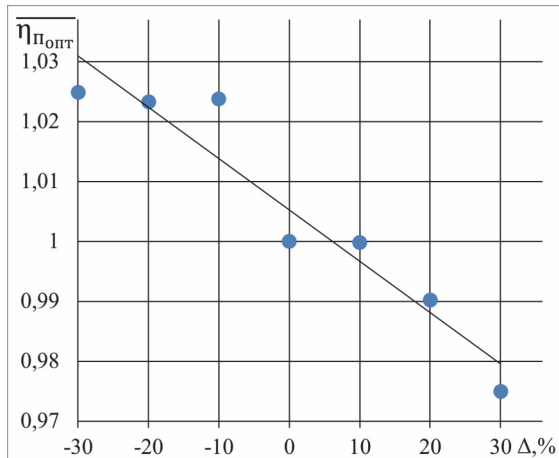


Рис. 6 – Изменение относительной величины политропного КПД в расчётной точке

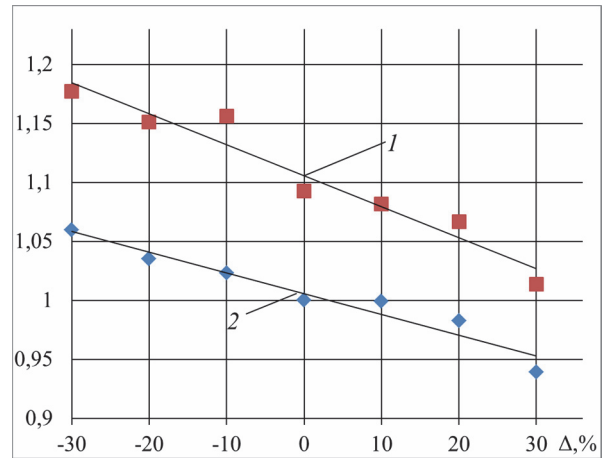


Рис. 7 – Изменение максимального и расчётного значений коэффициента политропного напора:
 1 – $\bar{\psi}_{\text{полт max}}$; 2 – $\bar{\psi}_{\text{полт}}$

Таким образом, результаты расчётно-экспериментального исследования влияния немодельных изменений ширины рабочих каналов в меридиональном сечении ПЧ среднерасходной ступени ЦК в диапазоне от -30% до $+30\%$ показали их существенное влияние на поведение и форму интегральных газодинамических характеристик исследуемой ступни ЦК.

Выводы

Экспериментально подтверждено допущение о линейном смещении интегральных газодинамических характеристик ступени ПЧ на 10% при соответствующем расширении рабочих каналов ПЧ в меридиональном контуре. При этом обеспечивается удовлетворительное совпадение критериев эффективности среднерасходной ступени ЦК, полученных при физическом и численном эксперименте.

Смещение интегральных газодинамических характеристик по условному коэффициенту расхода при расширении ПЧ имеет линейных характер; при заужении газодинамические характеристики смещаются «гистерезисно», т.е. при заужении рабочих каналов ПЧ в меридиональном контуре на 10% , 20% , 30% интегральные газодинамические характеристики смещаются по условному коэффициенту расхода на 6% , 14% , 24% , соответственно.

Максимальная относительная зона эффективной работы исследуемой ступени наблюдается при максимальном немодельном расширении рабочих каналов ПЧ в меридиональном сечении на $+30\%$.

Изменение значения политропного КПД в рабочей точке имеет линейный характер. Его максимальное значение достигается при заужении на 30% и минимальное – при расширении на 30% .

Максимальные значения коэффициентов политропного напора достигаются при максимальном заужении ширины рабочих каналов ПЧ ступени ЦК на 30% .

При дальнейших исследованиях целесообразно выполнить углубленный анализ влияния физических особенностей рабочего процесса в модифицированной ступени ЦК на конфигурацию её газодинамических характеристик.

Список литературы: 1. *Галеркин, Ю. Б.* Турбокомпрессоры [Текст] / Ю. Б. Галеркин. – СПб.: Издательство Политехнического университета, 2008. – 675 с. 2. *Калінкевич, М. В.* Теорія турбокомпресорів [Текст] : навч. посібник / М. В. Калінкевич, О. Г. Гусак. — Суми : СумДУ, 2014. — 269 с. 3. *Ден, Г. Н.* Механика потока в центробежных компрессорах [Текст] / Г. Н. Ден. – Ленинград : Машиностроение, 1973. – 272 с. 4. *Ludtke, K. H.* Process Centrifugal Compressor, [Text] / K. H. Ludtke. – Berlin : Springer, 2004. 5. *Смирнов, А. В.* Аэродинамический стенд для исследований модельных ступеней центробежных компрессоров [Текст] / А. В. Смирнов, А. М. Бороденко, А. А. Обухов, М. Н. Удод // Вісник Сумського державного університету. – 2012 – № 2. – С. 66–71. – ISSN 1817-9215. 6. *Повх, И. Л.* Аэродинамический эксперимент в машиностроении [Текст] / И. Л. Повх. – 3-е изд. – Ленинград : Машиностроение (Ленинградское отделение), 1974. – 480 с. 7. *Смирнов, А. В.* Применение коммерческих CFD программных комплексов для определения газодинамических характеристик центробежных компрессорных ступеней [Текст] / А. В. Смирнов, А. А. Обухов, И. Н. Зинченко // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2013. – № 1(31). – С. 7–11. 8. *Галеркин, Ю. Б.* Результаты расчета вязкого потока в неподвижных элементах центробежных компрессорных ступеней с помощью программной системы ANSYS CFX [Текст] / Ю. Б. Галеркин, А. И. Боровков, И. Б. Воинов, А. В. Гаев и др. // Компрессорная техника и пневматика. – 2007. – № 2. – С. 42–47. 9. *Галеркин, Ю. Б.* Методы исследования центробежных компрессорных машин [Текст] / Ю. Б. Галеркин, Ф. С. Рекстин. – М.: Машиностроение, 1969. – 304 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Galerkin Ju. B.* *Turbokompressory.* St. Petersburg. : Izdatel'stvo Politehnicheskogo universiteta, 2008. Print. 2. *Kalinkevich, M. V., and O. G. Gusak.* *Teorija turbokompresoriv.* Sumy : SumDU, 2014. Print. 3. *Den, G. N.* *Mehanika potoka v centrobezhnyh kompressorah.* Leningrad : Mashinostroenie, 1973. Print. 4. *Ludtke, K. H.* *Process Centrifugal Compressor.*, Berlin: Springer, 2004 Print. 5. *Smirnov, A. V., et al.* "Ajerodinamicheskij stend dlja issledovanij model'nyh stupenej centrobezhnyh kompressorov." *Visnik Sums'kogo derzhavnogo universitetu.* No 2. 2012. 66–71. ISSN 1817-9215. Print. 6. *Povh, I. L.* *Ajerodinamicheskij jeksperiment v mashinostroenii.* Leningrad : Mashinostroenie, 1974. Print. 7. *Smirnov, A. V., A. A. Obukhov and I. N. Zinchenko.* "Primenenie kommercheskih CFD programmnyh kompleksov dlja opredelenija gazodinamicheskikh harakteristik centrobezhnyh kompressornyh stupenej." *Kompressornoe i jenergeticheskoe mashinostroenie.* No 1(31). 2013. 7–11. Print. 8. *Galerkin, Ju. B., et al.* "Rezultaty rascheta vjazkogo potoka v nepodvizhnyh jelementah centrobezhnyh kompressornyh stupenej s pomoshh'ju programmnoj sistemy ANSYS CFX." *Kompressornaja tehnika i pnevmatika* 2 (2007): 42–47. Print. 9. *Galerkin, Ju. B., and F. S. Rekstin.* *Metody issledovanija centrobezhnyh kompressornyh mashin.* Moscow : Mashinostroenie, 1969. Print.

Поступила (received) 14.01.2015