ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО «ПЕРЕРЕЗЫВАНИЯ» СТРУЙ РАБОЧЕГО ТЕЛА ИЗ СОПЛОВОГО АППАРАТА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ СТУПЕНЕЙ ЛПИ С ОСЕСИММЕТРИЧНЫМИ СОПЛАМИ Крупнов Д.И.¹, Раков Г.Л.²

¹Крупнов Дмитрий Игоревич - магистрант; ²Раков Геннадий Леонидович - кандидат технических наук, Высшая Школа энергетического машиностроения, Санкт-Петербургский политехнический университет, г. Санкт-Петербург

Аннотация: в статье представлены результаты численного исследования влияния степени перерезывания сопел на КПД одноступенчатой осевой турбины на различных режимах, характеризуемых отношением U/C_0 .

Результаты численного исследования были сопоставлены с экспериментальными данными, полученными при исследовании ступеней с осесимметричными соплами в СПбПУ. Показано, что уменьшение перемычки между выходными эллипсами вплоть до полного ее исключения, повышает эффективность ступени. Для исследованного СА η_i вырос с 0,547 до 0,597.

Ключевые слова: численное моделирование, малорасходная турбина, осесимметричные сопла, коэффициент скорости соплового аппарата, эффективность осевой турбины.

STUDY OF THE INFLUENCE OF GAS-DYNAMIC "CUTTING" OF JETS OF THE WORKING FLUID FROM THE NOZZLE APPARATUS ON THE EFFICIENCY OF LPI STAGES WITH AXISYMMETRIC NOZZLES Krupnov D.I.¹, Rakov G.L.²

¹Krupnov Dmitry Igorevich - Undergraduate; ²Rakov Gennady Leonidovich - Candidate of Technical Sciences, HIGHER SCHOOL OF POWER ENGINEERING, ST. PETERSBURG POLYTECHNIC UNIVERSITY, ST. PETERSBURG

Abstract: the article presents the results of a numerical study of the influence of the degree of nozzle overcutting on the efficiency of a single-stage axial turbine in various modes characterized by the ratio U/C_0 . The results of the numerical study were compared with the experimental data obtained in the study of stages with axisymmetric nozzles at SPbPU. It is shown that reducing the jumper between the output ellipses, up to its complete elimination, increases the efficiency of the stage. For the studied SA, η_i increased from 0.547 to 0.597.

Keywords: numerical simulation, low-flow turbine, axisymmetric nozzles, nozzle velocity coefficient, axial turbine efficiency.

УДК 621.438

Введение

Сопловой аппарат современных малорасходных турбинных ступеней существенным образом отличается от традиционных направляющих решеток полноразмерных ступеней газовых турбин. Активно применяются два варианта сопловых аппаратов – с плоскими и с осесимметричными соплами. Многими авторами отмечено [1, 2, 5], что последние имеют целый ряд преимуществ. К ним можно отнести высокую технологичность процесса изготовления, отсутствие поворота потока в проточной части сопла и более низкий уровень волновых потерь.

Эффективность таких сопловых аппаратов во многом зависит от компоновки сопел в сегменте. С изменением шага между соплами меняются их выходные сечения. Выходные эллипсы могут как располагаться на значительном удалении – с широкой перемычкой между ними, так и накладываться (перерезываться). Для описания взаимного расположения выходных эллипсов сопел автором работы [3] была предложена величина, называемая степенью перерезывания:

$$\tau = \frac{l_1 - t_1}{l_1},\tag{1}$$

где: l_1 – большая ось выходного эллипса сопла, мм; t_1 – шаг сопел.

Также автором был установлен оптимальный диапазон степени перерезывания: $-0,02 < \tau < 0,02$.

В статье представлены результаты численного исследования влияния степени перерезывания сопел на эффективность одноступенчатой осевой турбины на различных режимах, характеризуемых отношением U/C_0 . Результаты численного эксперимента были сопоставлены с экспериментальными данными, полученными при исследовании сопловых аппаратов в СПбПУ [1].

Постановка задачи и методы расчета

В данной работе поставлены следующие задачи:

 Определение влияния степени перерезывания на коэффициент скорости соплового аппарата и на эффективность турбинной ступени на различных режимах работы;

– Сопоставление полученных численным методом результатов с данными экспериментальных исследований.

В качестве исследуемой модели была выбрана осевая турбинная ступень МТГ-20, разработанная на кафедре турбин, гидромашин и авиационных двигателей СПбПУ. Сопловой аппарат включает 14 осесимметричных сопел, дозвуковая часть которых выполнена по принципу сопла Витошинского. Сопла установлены под углом $\alpha_{12} = 5^{\circ}$. Рабочее колесо состоит из диска, выполненного заодно с 21 рабочей лопаткой, и бандажа. Лопатки имеют удлиненную входную кромку с реализованной обратной стреловидностью. Твердотельные модели соплового аппарата и рабочего колеса показана на рисунке 1.



Рис. 1. Твердотельные модели ступени МТГ-20: а) – СА; б) – РК

Степень перерезывания для соплового аппарата τ варьировалась в пределах от $\tau = -0,037$ до $\tau = -0,371$. На рисунке 2 изображены выходные эллипсы СА с наибольшим и наименьшим перерезыванием в исследуемом диапазоне τ .



Рис. 2. Выходные эллипсы CA при: a) $\tau = -0,371; \delta$ $\tau = -0,037$

Основным методом исследования является численное моделирование процессов течения рабочего тела в турбомашинах, реализуемое в пакете ANSYS CFX. Сеточные модели построены с помощью ANSYS ICEM CFD. Опираясь на накопленный опыт газодинамических расчетов малорасходных турбин [2,4,5], в работе использованы следующие основные положения расчетной методики:

– Секторное моделирование. Применен подход моделирования сектора ступени, при котором моделировались 2 сопла и 3 межлопаточных канала РК. Домены сопел и межлопаточных каналов включают по половине осевого зазора. Такая компоновка сектора позволяет обеспечить близкое к единице соотношение площадей на интерфейсе стыковки СА – РК на этапе постановки граничных условий. Одновременно с этим удобно визуализировать взаимодействие потоков рабочего тела в пространстве осевого зазора на участке между двумя соплами на этапе обработки данных;

– Сеточная дискретизация. Характерная размерность расчетных областей принята на основе и верифицированных работ в той же области исследований [2,6]. Нерегулярные сетки, состоящие в ядре потока из Tetra-ячеек, в области твердых стенок выполнены с слоем из Неха-ячеек, что позволяет более точно

моделировать пристеночный слой течения рабочего тела. Высота первой пристеночной ячейки выбирается исходя из условия использования высокорейнольдсных моделей турбулентности (30 < y+< 300). Ключевые характеристики сеток представлены в Таблице 1;

Домен	Количество	Aspect ratio	Min.	Expansion factor	Y^+
	ячеек, тыс. шт.		Angle, град.		
CA	1100	0,9	16	1	35
РК	1250	0,9	18	1	35

Таблииа	1. Xa	пакте	пистики	пасчетных	сетон
1 aominina	1. 210	panne	ристики	puc icmnoix	centor

– Моделирование турбулентности. Для моделирования турбулентности выбран метод осреднения уравнения Навье-Стокса по Рейнольдсу (RANS), который позволяет проводить расчеты в стационарной постановке и является наименее ресурсоемким по сравнению с подходами LES и DES. Многими авторами доказано, что для случая моделирования течения в турбомашинах модель турбулентности SST позволяет достичь оптимального сочетания точности, устойчивости и машинного времени счета.

– **Граничные условия.** В качестве граничных условий используются стандартные ГУ для задач турбомашин без моделирования теплообмена (адиабатные стенки), а именно:

1) Полные давление и температура на входе в рабочую область;

2) Частота вращения рабочего колеса;

3) Статическое давление на выходе из расчетной области.

Стыковка вращающегося домена со статором сопряжена с выбором интерфейса. Применение интерфейса Stage для расчетов транс- и сверхзвуковых ступеней МРТ показали появление нефизических всплесков энтропии на поверхности стыковки статора с ротором. В связи с этим для перехода от домена СА к домену РК примется интерфейс Frozen Rotor, обеспечивающий непосредственный переход из абсолютной системы координат в относительную при переходе во вращающуюся область.

Таблица 2. Граничные условия расчета

Полное давление газа на входе в ступень, P_0^* , МПа	0,5	
Полная температура газа на входе в ступень, T_0^* , К	300	
Статическое давление газа за ступенью, <i>P</i> ₂ , МПа	0,1013	
Рабочее тело	Air Ideal Gas	
Модель турбулентности	SST	
Постановка задачи	Стационарная	(Frozen
	Rotor)	

- Критерии сходимости решения. Общепринятыми критериями сходимости решения в стационарной постановке считаются:

1) Уровень нормализованных небалансов менее 1%;

2) Падение невязок более чем на 2 порядка;

3) Отсутствие изменения параметров в точках мониторинга более чем на 5%.

Постановка граничных условий на расчетной модели в ANSYS CFX показана на рисунке 3.



Рис. 3. Граничные условия в CFX Pre

Для конкретного сравнения сопловых аппаратов в составе ступени путем прямых расчетов в постпроцессоре СFX был рассчитан ряд интегральных характеристик. Скорости и "параметры торможения" определены усреднением по массовому расходу в соответственном сечении. Статические параметры определены осреднением по области. Крутящий момент на РК определен с учетом момента, действующего на бандаж и корневой обвод РК.

Фактическая степень расширения в ступени π_t определяется по формуле:

$$\tau_{\rm T} = \frac{P_0^*}{P_2},\tag{2}$$

где: P_0^* – полное давление на входе в ступень, Πa ; P_2 – статическое давление газа за ступенью, Πa . Располагаемые перепады энтальпий на ступень H_0 и на сопловой аппарат H_{CA} вычислены по формулам:

$$H_{0} = R \frac{k}{k-1} T_{0}^{*} \left(1 - \left(\frac{1}{\pi_{r}}\right)^{\frac{k-1}{k}} \right);$$
(3)

$$H_{CA} = R \frac{k}{k-1} T_0^* \left(1 - \left(\frac{p_1}{p_0^*} \right)^{\frac{\kappa-1}{k}} \right), \tag{4}$$

где: k = 1,4; $R = 287,58 \, \square m \cdot \kappa e^{-1} \cdot K^{-1}$; P_1 – статическое давление газа за СА, $\square a$. Коэффициент скорости соплового аппарата получен с использованием формулы:

$$\rho = \frac{c_1}{\sqrt{2H_{CA}}},\tag{5}$$

где: c_1 – скорость потока на выходе из CA, M/c;

Внутренний КПД по статическим параметрам равен:

$$\eta_i = \frac{\mathsf{M}_{PK}\pi n}{30GH_0},\tag{6}$$

где: М_{*PK*} – момент на РК, $H \cdot M$; G – расход рабочего тела, $\kappa r/c$.

Результаты численного исследования

Коэффициент скорости соплового аппарата $\varphi = f(\tau)$, на оптимальном режиме работы ступени $\binom{U}{C_0}$ opt \cong 0,42 получен путем численного расчета по формуле (5) и представлен на рисунке 4.



Рис. 4. Зависимость $\varphi = f(\tau)$ *при* $\omega = 30000$ об/мин

Кривую зависимости $\varphi = f(\tau)$ можно разделить на два участка. Первый участок кривой имеет нисходящий характер, что является следствием эжектирующего воздействия потока, выходящего из СА, на пассивный газ в застойных зонах пространства осевого зазора. Это явление сопровождается снижением донного давления $P_{\partial oh}$. Второй участок кривой имеет восходящий характер, что может говорить о приближении величины $P_{\partial oh}$ к величине P_1 в основном потоке. Максимальная величина коэффициента скорости СА $\varphi = 0,897$ была получена при степени перерзывания $\tau = 0,037$, что на 2,5% выше, чем у базового варианта МТГ-20 с $\tau = 0,371$. При дальнейшем уменьшении перемычки между выходными эллипсами донное давление станет равным статическому давлению в основном потоке [1]. Диаграмма распределения давления на среднем диаметре показана на рисунке 5.



Рис. 5. Распределение давления в осевом зазоре при: a) $\tau = -0,371$; б) $\tau = -0,037$

Угол выхода потока из соплового аппарата $\alpha_1 = f(\tau)$, на оптимальном режиме для исследуемых СА показан на рисунке 6.



Рис. 6. Зависимость $\alpha_1 = f(\tau)$ *при* $\omega = 30000$ об/мин $u \pi_{\rm T} = 4,94$

Эжектирующий эффект, сопровождаемый снижением донного давления, приводит к отклонению потока и увеличению угла α_1 , что, в свою очередь, приводит к снижению коэффициента скорости СА. На участке кривой $[\tau] < [\tau_{\mathfrak{sc}}]$ постепенное уравнивание давлений сопровождается снижением величины угла выхода потока и росту φ .

Графики зависимостей внутреннего КПД ступени $\eta_i = f(U/C_0)$ и внутреннего КПД на оптимальном режиме $\eta_i = f(\tau)$ изображены на рисунках 7 и 8 соответственно. Кривые η_i получены при условии $C_0 = \sqrt{2H_0} \approx const$. Наклон моментной характеристики определен путем проведения 2 расчетов – на номинальном режиме и режиме с пониженной частотой вращения. По полученным значения M_{PK} и U/C_0 произведена интерполяция и вычислены значения η_i .



Рис. 7. Зависимость $\eta_i = f(U/C_0)$ при $\pi_{\rm T} = 4,94$



Рис. 8. Зависимость $\eta_i = f(\tau)$ *при* $\omega = 30000$ об/мин $u \pi_{\tau} = 4,94$

С уменьшением "перемычки" между выходными эллипсами наблюдается рост η_i . Это объясняется снижением эжекционных потерь вследствие увеличения площади выхода потока, а также снижением потерь, связанных с нарушением стационарности течения рабочего тела при переходе межлопаточного канала от одного выходного эллипса к другому.

Заключение

Полученные результаты, в целом, хорошо соотносятся с результатами реальных экспериментов [1]. Можно ожидать, что и в диапазонах τ , не охваченных данным исследованием, корреляция с результатами экспериментов будет присутствовать. Наблюдается завышение величины η_i , связанное, в первую очередь, с проведением расчетов с стационарной постановке. Однако, это не мешает оценить характер влияния варьируемого параметра τ на эффективность ступени.

В данной работе не охвачен диапазон положительных величин перерезывания ввиду невозможности реализации секторного подхода при моделировании. Численное моделирование полных венцов требует значительно более высоких вычислительных мощностей. Тем не менее, при компоновке сопел с наложением выходных эллипсов можно ожидать интенсификацию волновых потерь, вызванных взаимодействием сверхзвуковых струй рабочего тела.

По результатам проведенного численного исследования можно сделать следующие выводы:

1. При увеличении степени перерзывания до $\tau_{\kappa p} \approx -0,2$ наблюдается снижение эффективности соплового аппарата, характеризуемой коэффициентом скорости СА φ .;

2. Эффективность ступени η_i .повышается во всем исследованном диапазоне изменения τ несмотря на снижение эффективности СА в диапазоне до $\tau_{\kappa p}$;

3. Снижение *φ* оказывает меньшее влияние на эффективность ступени, чем снижение эжекционных потерь и потерь, связанных с переходом межлопаточного канала РК от одного сопла к другому;

Список литературы

- 1. *Раков Г.Л.* Аэродинамическое совершенствование малорасходных турбин: дисс. ... канд. техн. наук. Л., 1982.
- 2. Себелев А.А. Совершенствование малоразмерных турбин с осесимметричными соплами С: дисс. ... канд. техн. наук. СПб, 2017.
- 3. Юсупов Э.И. Исследование некоторых методов повышения к.п.д. одновенечных сверхзвуковых парциальных турбин: дисс. ... канд. техн. наук. Л., 1970.
- 4. Смирнов М.В. Исследования сопловых аппаратов конструкции ЛПИ с тангенциальным входом численными методами: дисс. ... магистра. СПб, 2013.
- 5. *Паутов Д.В.* The investigation of the low mass flow LPI turbine by numerical simulation: дис. ... магистра. СПб, 2015.
- 6. *Нгуен К.К., Ласкин А.С.* Численное исследование влияния межвенцового зазора на переменные силы в осевой ступени турбины // Молодой ученый, 2015. № 10. С. 270–274.
- 7. Исследование особенностей течения в малорасходных турбинных ступенях конструкции ЛПИ / Н.А. Забелин, Г.Л. Раков, В.А. Рассохин, А.А. Себелев, М.В. Смирнов // Научно-технические ведомости СПбГПУ, 2013. № 1 (166). С. 45–53.