

DOI: 10.18721/JEST.25209
УДК 621.438.001.2

А.К. Нгуен, К.Л. Лапшин

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

СТРУКТУРА ТЕЧЕНИЯ ГАЗА В ТУРБИННЫХ СТУПЕНЯХ С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ ГРАДИЕНТОМ СТЕПЕНИ РЕАКТИВНОСТИ

В статье исследовано течение газа в турбинных ступенях с отрицательным градиентом степени реактивности, полученным за счёт применения тангенциального наклона направляющих лопаток. Объекты исследования: две турбинные ступени. Первая: ступень с тангенциальным наклоном направляющих лопаток, линии центров скругления радиусов выходных кромок профилей которых прямолинейны, лежат в плоскости r - u цилиндрической системы координат и отклонены от направления r на среднем радиусе на 23 градуса в сторону вращения ротора. Вторая ступень создана на базе первой ступени. Две ступени отличаются тем, что во второй ступени линии центров скругления радиусов выходных кромок профилей в срединной части направляющих лопаток также прямолинейны и наклонены на 23 градуса на среднем радиусе, но затем у корня и у периферии плавно выведены на направление радиуса r . Построены расчетные модели двух турбинных ступеней с помощью программ, входящих в комплекс ANSYS Workbench: Geometry, Turbogrid. 3D проверочные газодинамические расчеты выполнены с помощью программы ANSYS CFX. На номинальном режиме для двух турбинных ступеней проанализированы: картина течения газа в меридианных обводах проточной части и конфигурация линий тока, выходящих из направляющего аппарата на корневом, среднем и периферийном радиусах. Построены графики суммарных характеристик турбинных ступеней (окружной КПД и степени реактивности у корня и у периферии) на разных режимах при изменении частоты вращения ротора, выполнены траверсирования параметров потока по высоте лопатки на номинальных режимах. Дано заключение о рациональном проектировании турбинных ступеней с отрицательным градиентом степени реактивности.

Ключевые слова: осевые турбинные ступени, тангенциальный наклон, направляющие лопатки, потери кинетической энергии, ANSYS CFX.

Ссылка при цитировании:

А.К. Нгуен, К.Л. Лапшин. Структура течения газа в турбинных ступенях с отрицательным градиентом степени реактивности // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 2. С. 118–131. DOI: 10.18721/JEST.25209.

A.Q. Nguyen, K.L. Lapshin

Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia

STRUCTURE OF GAS FLOWS IN TURBINE STAGE WITH NEGATIVE GRADIENT OF REACTIVITY DEGREE

The study has explored the flow in turbine stages with a negative gradient of degree of reactivity. Stages of this type were created using the tangential inclination of guide blades. The objects of research were two turbine stages. The first stage was a turbine stage with tangential inclination of guide blades. The lines of rounding centers of the radii of output edges of guide blades were rectilinear, lying in the r - u plane of the cylindrical coordinate system and inclined by 23 degrees in the direction of rotation of the rotor at the mean radius. The second turbine stage was created on the basis of the first stage. The two turbine stages differed in

that the lines of rounding centers of radii of output edges in the middle part of guide blades were also rectilinear and inclined by 23 degrees at the mean radius in the second turbine stage, but they were smoothly directed to the radius direction r at the root and the periphery. The calculation models of turbine stages were constructed in the Geometry and TurboGrid programs included in ANSYS Workbench. 3D testing gas-dynamic calculations were performed in ANSYS CFX. The pattern of gas flow in the meridian contours of the flow section and the configuration of the current lines on the root, middle and peripheral radiuses were analyzed in nominal mode for the two turbine stages. The graphs of summary characteristics of turbine stages (the efficiency index and the degree of reactivity at the root and periphery) in different modes were presented. The distribution of flow parameters in nominal modes was given by the height of the blade. The conclusion about the rational design of turbine stages with tangential inclination of guide blades were given.

Keywords: axial turbine stages, tangential inclination, guide blades, kinetic energy losses, ANSYS CFX.

Citation:

A.Q. Nguyen, K.L. Lapshin, Structure of gas flows in turbine stage with negative gradient of reactivity degree, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 25 (2) (2019) 118–131, DOI: 10.18721/JEST.25209.

Актуальность работы. Тангенциальный наклон направляющих лопаток (ТННЛ) применяется с целью повышения КПД турбинной ступени за счет снижения градиента степени реактивности [1–13, 15–18]. Такой позитивный результат по сравнению со ступенями обычного типа ($c_{ur} = \text{const}$, $\alpha_1 = \text{const}$) может быть получен главным образом вследствие уменьшения протечек под диафрагмой и над бандажом рабочих лопаток (РЛ), а для высоконагруженных ступеней – также из-за уменьшения чисел Маха в абсолютном движении в корневой зоне за направляющими лопатками (НЛ) и в относительном движении у периферии за РЛ [1, 2, 4, 10]. При этом, однако, в ступени увеличиваются потери кинетической энергии с выходной скоростью, поэтому для каждого конкретного случая следует искать оптимальное решение методами компьютерной оптимизации [11].

За счёт применения традиционного ТННЛ, когда наклоняется по отношению к радиусу лопатка в целом, может быть создана турбинная ступень даже с отрицательным градиентом степени реактивности. Отрицательный градиент степени реактивности открывает дополнительные возможности воздействия на суммарное осевое усилие, действующее на ротор турбоустановки и, в неко-

торых случаях, позволяет применить незакрученные рабочие лопатки, получив все связанные с этим технологические преимущества. Такая «экзотическая» турбинная ступень была впервые предложена в ЛПИ (Ленинградский политехнический институт, ныне Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого)¹. Экспериментальные исследования такой ступени были выполнены на воздушной турбине в лаборатории турбиностроения ЛПИ. 3D проверочные газодинамические расчеты этой ступени проведены также пакетом ANSYS CFX [12].

Традиционный ТННЛ, как показали эксперименты [1], формирует неблагоприятные течения в корневой, и, особенно, в периферийной зоне НЛ, в местах стыка лопаток с меридианными обводами проточной части. В статьях [3–7, 15–18] детально рассмотрены методы проектирования турбинных ступеней с ТННЛ, в том числе и с «саблевидными» лопатки. Для последних и предпоследних длинных ступеней паровых турбин в Санкт-Петербургском политехниче-

¹ Лапшин К.Л. К расчету турбинных ступеней с навалом направляющих лопаток // Известия вузов. Энергетика. 1969. № 3. С. 116–119; Лапшин К.Л. Исследование турбинных ступеней со сниженным градиентом степени реактивности: дис. ... канд. техн. наук. Л.: ЛПИ, 1969. 188 с.

ском университете Петра Великого предложены «интегральные» направляющие лопатки с тангенциальным наклоном², что дает возможность уменьшить эрозионный износ рабочих лопаток и повысить КПД ступени. Суть «интегральных» направляющих лопаток состоит в том, в срединной части они имеют тангенциальный наклон, а у корня и периферии плавно выводятся на направление радиуса. Представляется актуальным исследовать картину течения потока газа и основные характеристики как для турбинной ступени с традиционным тангенциальным наклоном направляющих лопаток, так и с «интегральными» направляющими лопатками.

Цель работы: исследование физической картины течения потока газа и основных характеристик турбинных ступеней с отрицательным градиентом степени реактивности как с традиционным тангенциальным наклоном направляющих лопаток, так и с «интегральными» направляющими лопатками, с применением аэродинамического пакета ANSYS CFX в качестве виртуального стенда. По полученным результатам будет выполнено сравнение между этими двумя турбинными ступенями и дано заключение о рациональном проектировании турбинных ступеней с отрицательным градиентом степени реактивности.

Постановка задачи. Чтобы исследовать течение потока газа и основные характеристики для турбинных ступеней с отрицательным градиентом степени реактивности, полученным за счёт традиционного тангенциального наклона направляющих лопаток и «интегральных» направляющих лопаток, выполнены экспериментальные исследования двух турбинных ступеней на виртуальном стенде ANSYS CFX. Правомерность использования ANSYS CFX в качестве виртуального стенда доказана в статье [12].

² Лапшин К.Л. Оптимизация проточных частей паровых турбин с применением «интегральных» сопловых лопаток // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 1. С. 61–66.

Ступень I. Оригинальная турбинной ступень с отрицательным градиентом степени реактивности, имеющая среднюю веерность $\left(\frac{d_{2c}}{l_2} = 6,34\right)$, спроектирована при условии $\alpha_1 = \text{const}$ и $\beta_1 = \text{const}$ [1]. Направляющие лопатки имеют угол наклона прямолинейной линии центров радиусов скругления выходных кромок профилей относительно оси r на среднем радиусе, равный 23° , а эффективный угол $\alpha_{1\text{эф}}$ постоянен по высоте лопатки и равен $18^\circ 10'$. Рабочие лопатки, имеющие постоянные профили по высоте лопатки, не закручены. Лопаточный угол $\beta_{1л} = 55^\circ$, эффективный угол на среднем радиусе $\beta_{2\text{эф}} = 24^\circ$. Линия центров масс профилей рабочих лопаток ориентирована по радиусу (см. рис. 1). Теоретические и экспериментальные исследования этой ступени представлены в [1, 12, 13].

Ступень II. Направляющие и рабочие лопатки турбинной ступени II спроектированы на базе турбинной ступени I. Отличие между двумя турбинными ступенями состоит в том, что линии центров радиусов скругления выходных кромок профилей направляющих лопаток во второй ступени выведены на направление радиуса у корня и у периферии (см. рис. 1).

Основные геометрические характеристики оригинальной ступени I представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные геометрические характеристики оригинальной ступени I

Basic geometric characteristics of original stage I

Величины	Направляющие	Рабочие
Радиус корневого сечения R' , мм	159,1	159,1
Длина лопаток l , мм	58,2	59,5
Шаг лопаток t_c , мм	11,86	17,45
Хорда лопаток b_c , мм	16,5	27,85
Число лопаток, шт.	100	68
Осевой зазор Δz_1 , мм	8	

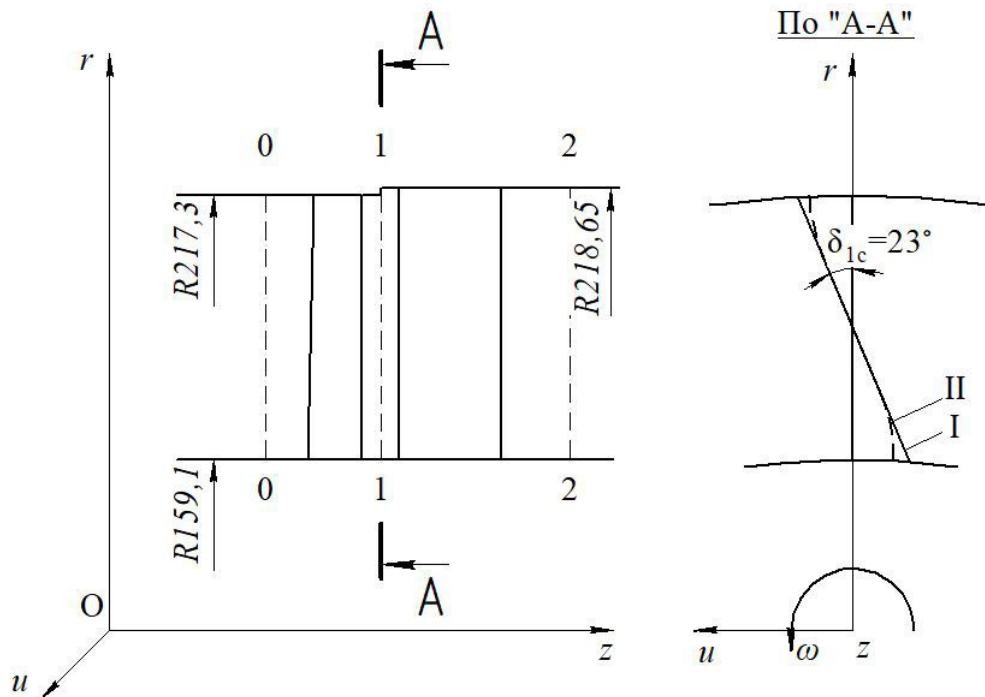


Рис. 1. Схема исследуемых ступеней
 Fig. 1. The scheme of the investigated stages

Расчетные модели исследуемых турбинных ступеней представляют собой секторы проточной части, состоящие из трех направляющих и двух рабочих лопаток. Расчетные сетки созданы с помощью программ Geometry и Turbogrid, входящих в программный комплекс ANSYS. При создании сеток обеспечено их сгущение вблизи поверхностей, обтекаемые потоком газа, чтобы обеспечить корректность газодинамических расчетов параметров потока в пограничных слоях. Степень неравномерности потока перед рабочими лопатками, вычисленная по известной формуле Г.Ю. Степанова, невелика (примерно 3 %). Поэтому для обеих ступеней применяется способ решения стационарной задачи – Stage. При этом все параметры потока усредняются в окружном направлении на поверхности сопряжения между расчетными моделями направляющих и рабочих лопаток [14]. Граничные условия для решения задачи представлены в табл. 2.

Таблица 2

Граничные условия
Boundary conditions

Полное давление потока на входе в ступени P_0^* , МПа	0,137
Полная температура потока на входе в ступени T_0^* , К	368
Давление в потоке на выходе из ступеней P_2 , МПа	0,1033
Рабочее тело	Air Ideal Gas
Модель турбулентности	$k-\epsilon$
Способ решения задач	Стационарные – Stage

Результаты расчетов

После решения стационарных трехмерных задач рассмотрена картина течения потока газа в меридианных обводах проточной части турбинных ступеней и конфигурация линий тока, выходящих из направляющих аппаратов на корневом, среднем и периферийном радиусах на номинальном режиме при значении параметра $\left(\frac{u}{C_0}\right)_{opt} = 0,58$.

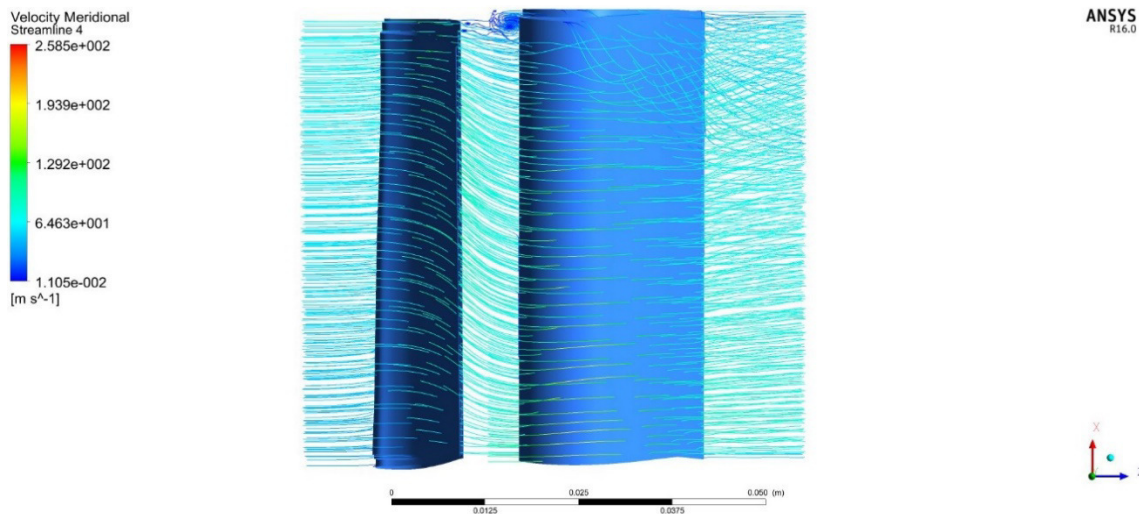


Рис. 2. Меридианные линии тока в турбинной ступени I
 Fig. 2. Meridional streamlines in turbine stage I

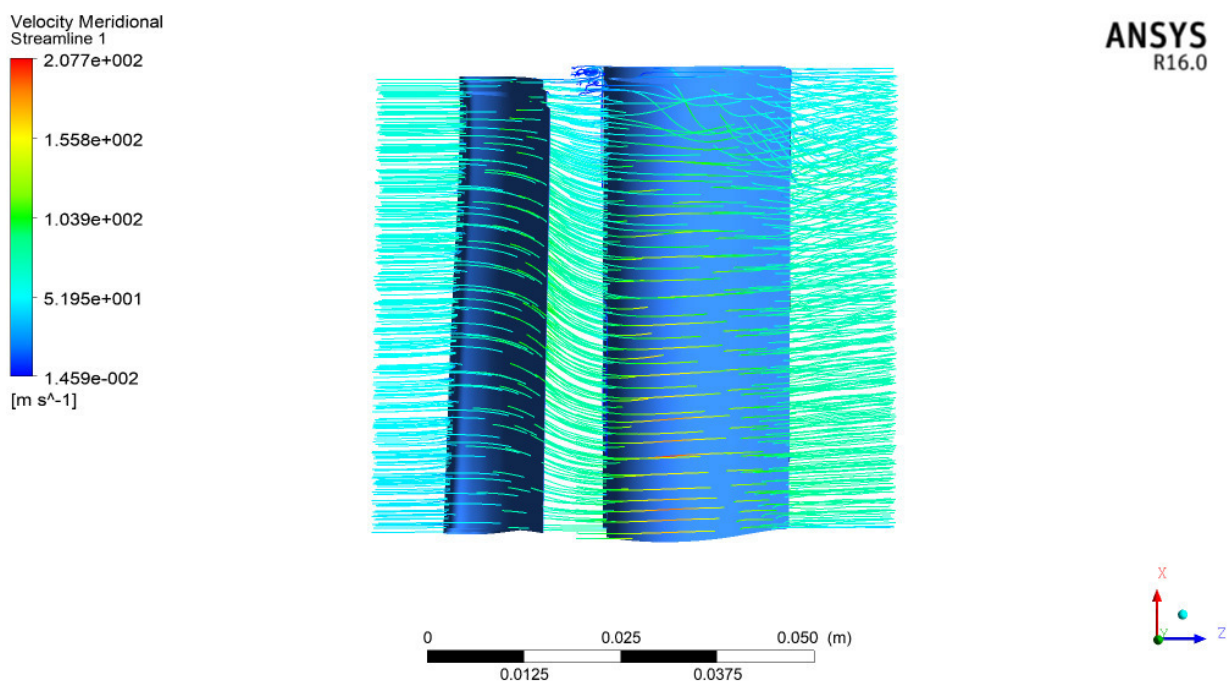


Рис. 3. Меридианные линии тока в турбинной ступени II
 Fig. 3. Meridional streamlines in turbine stage II

На рис. 2, 3 представлены меридианные линии тока в турбинных ступенях. Как известно, в турбинных ступенях обычного типа ($c_{ur} = \text{const}$, $\alpha_1 = \text{const}$) в цилиндрических меридианных обводах проточной части линии тока практически совпадают с образующими цилиндрических поверхностей, соосных с осью z турбины. А в

исследуемых турбинных ступенях с тангенциальным наклоном направляющих лопаток и «интегральными» направляющими лопатками линии тока в осевом зазоре между направляющими и рабочими лопатками искривлены выпуклостью к оси турбины z . Такое искривление линий тока под влиянием центробежных сил

инерции вызывает снижение градиента давления $\frac{\partial p_1}{\partial r}$ вплоть до отрицательного в закрученном потоке за направляющим аппаратом. Изменение градиента давления $\frac{\partial p_2}{\partial r}$ в потоке за рабочим колесом обычно невелико по высоте лопатки. По указанным причинам степень реактивности в ступенях I и II у корня становится больше, чем у периферии.

В периферийной области перед рабочим колесом в турбинной ступени II зона циркуляционного вихря и следующая за ней зона отрывного течения у периферии рабочих лопаток меньше (по площадям зон), чем у турбинной ступени I. Это объясняется тем, что в турбинной ступени II в зоне стыка НЛ с периферийным обводом формируется более благоприятное течение, чем в турбинной ступени I.

На рис. 4, 5 представлены конфигурации линий тока в турбинных ступенях, которые приходят из каналов между направляющими лопатками на окружности у корня, на среднем и периферийном радиусах перед рабочими лопатками. Для среднего радиуса линии тока внутри каналов между направляющими

лопатками формируют поверхности тока, почти перпендикулярные перу направляющей лопатки. На корневом и периферийном радиусах для ступени I такая картина течения качественно сохраняется. Таким образом, под влиянием тангенциального наклона возникает «косое» обтекание направляющих лопаток, которое существенно отличается от популярной модели течения на осесимметричных поверхностях тока.

В турбинной ступени II с «интегральными» направляющими лопатками на среднем радиусе, как и в турбинной ступени I, линии тока внутри каналов между направляющими лопатками формируют поверхности тока, почти перпендикулярные перу направляющей лопатки. А на корневом и периферийном радиусах в турбинной ступени II, как и в турбинной ступени обычного типа, линии тока формируют внутри каналов поверхности тока, почти совпадающие с осесимметричными поверхностями. Это объясняется тем, что линии центров радиусов скругления выходных кромок профилей направляющих лопаток у ступени II выведены на направление радиуса у корня и на периферии.

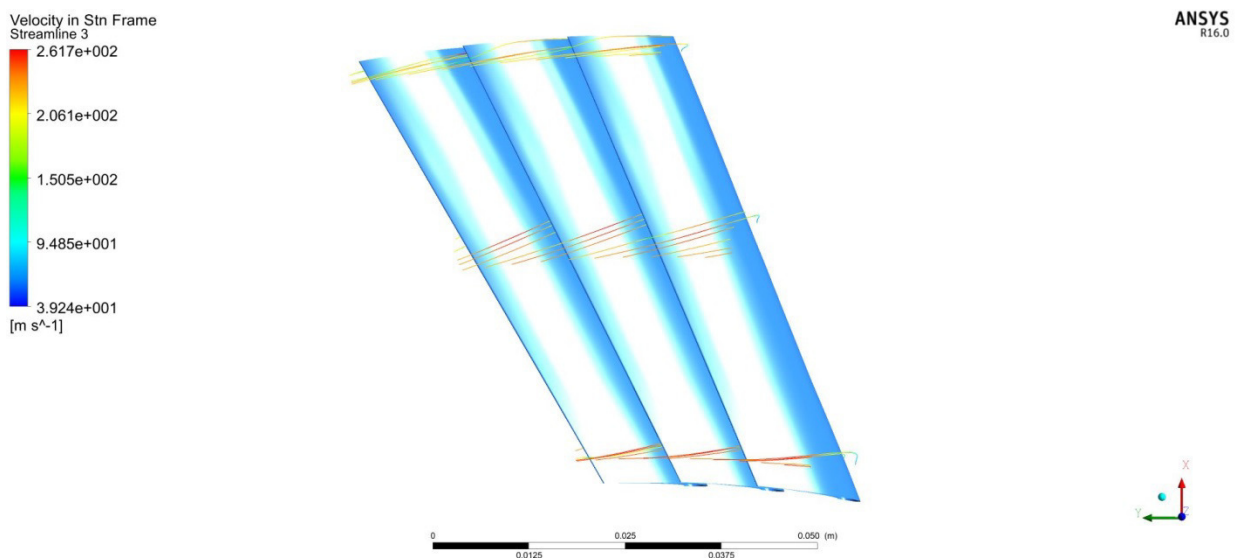


Рис. 4. Кривые линий тока за направляющими лопатками на трех радиусах в турбинной ступени I
 Fig. 4. Curves of streamlines behind guide blades on three radiuses in turbine stage I

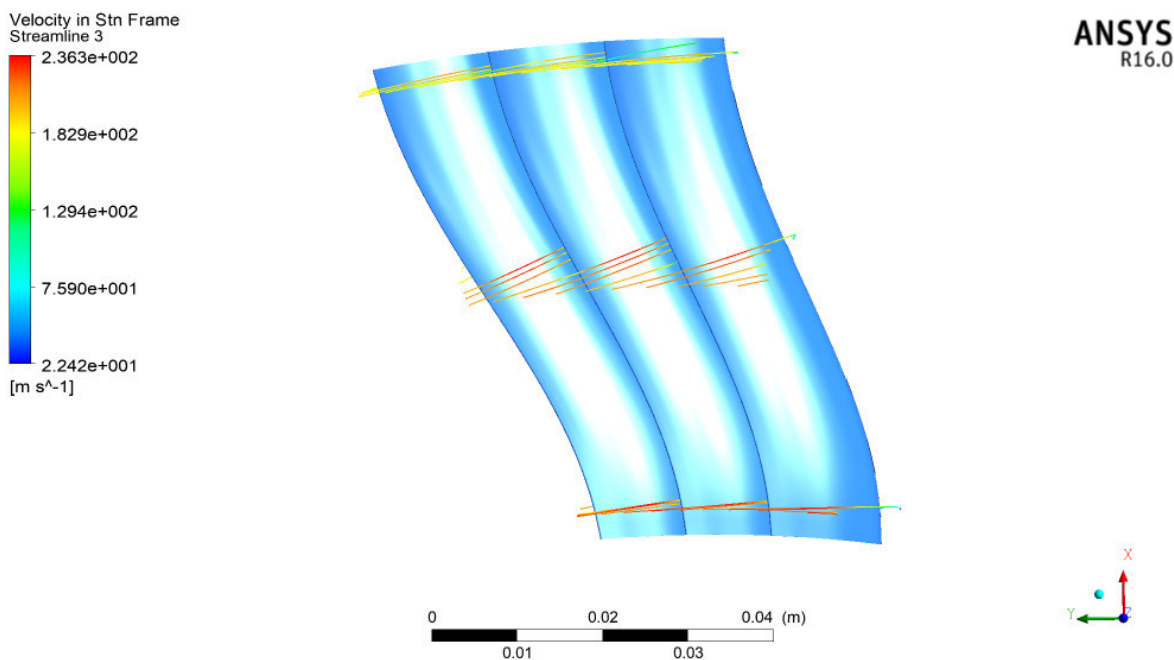


Рис. 5. Кривые линий тока за направляющими лопатками на трех радиусах в турбинной ступени II
 Fig. 5. Curves of streamlines behind guide blades on three radiuses in turbine stage II

Далее (рис. 6) построены суммарные характеристики турбинных ступеней (окружной КПД и степени реактивности у корня и у периферии) на разных режимах при изменении частоты вращения ротора.

На рис. 6 видно, что обе турбинные ступени достигают максимума КПД при значении параметра $\left(\frac{u}{C_0}\right)_{opt} = 0,58$. Во всей зоне изменения значения $\frac{u}{C_0}$ КПД турбинной ступени I с тангенциальным наклоном направляющих лопаток ниже, чем в турбинной ступени II с «интегральными» направляющими лопатки. На оптимуме КПД ступени II больше ступени I на 0,8%.

За счет применения ТННЛ в обеих ступенях степень реактивности у корня больше, чем у периферии, т. е. градиент степени реактивности вдоль радиуса – отрицателен. Вместе с тем, разность степеней реактивности $\Delta\rho_T = \rho_T'' - \rho_T'$ на оптимальном режиме для ступени I равна (-0,29), а для ступени II – (-0,22), что объясняется различием

в конструкции направляющих аппаратов этих ступеней.

3D расчёты открыли возможность представить траверсирования коэффициентов потерь кинетической энергии за направляющим аппаратом и рабочим колесом, углов потока и выходной скорости из турбинных ступеней по высоте лопатки (рис. 7–13). Траверсирования параметров и углов потока в турбинных ступенях выполнены на номинальном режиме при значении $\left(\frac{u}{C_0}\right)_{opt} = 0,58$. Все параметры траверсирования усреднены [14] в расчетных сечениях 1-1 и 2-2 (рис. 1).

Коэффициент потерь кинетической энергии ζ_1 в направляющем аппарате турбинной ступени II меньше, чем в турбинной ступени I, особенно в прикорневой зоне (рис. 7). Это объясняется тем, что линии центров масс профилей направляющих лопаток в ступени II выведены на направление радиуса у корня и у периферии. Тем самым в ступени II устранены неблагоприятные течения в местах стыка лопаток с меридианными обводами проточной части.

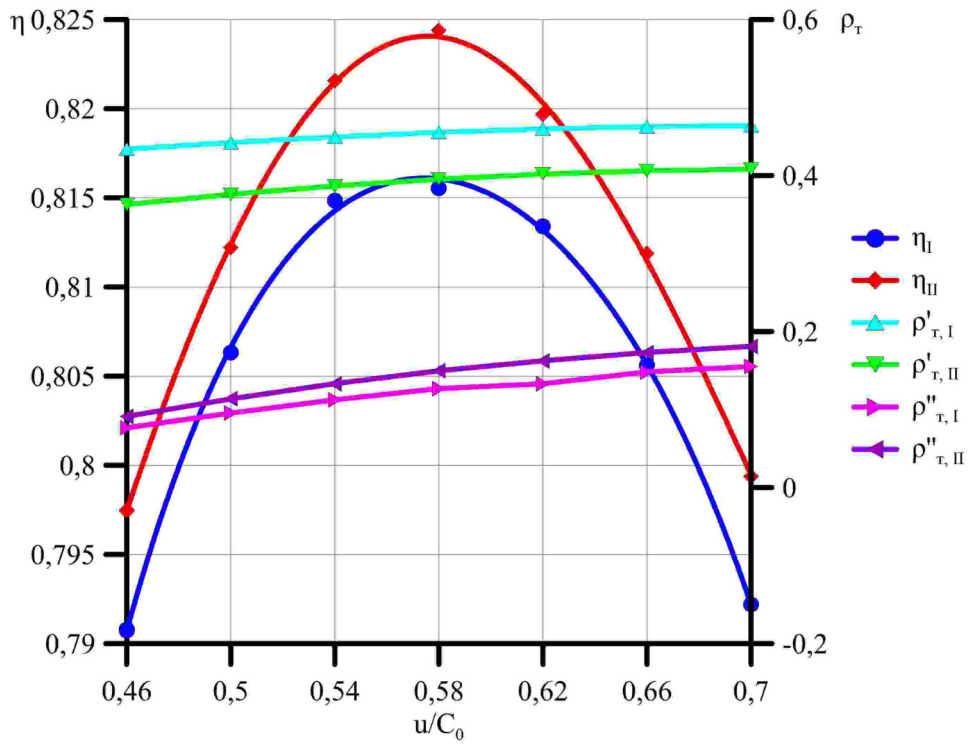


Рис. 6. Суммарные характеристики турбинных ступеней
 Fig. 6. Summary characteristics of turbine stages

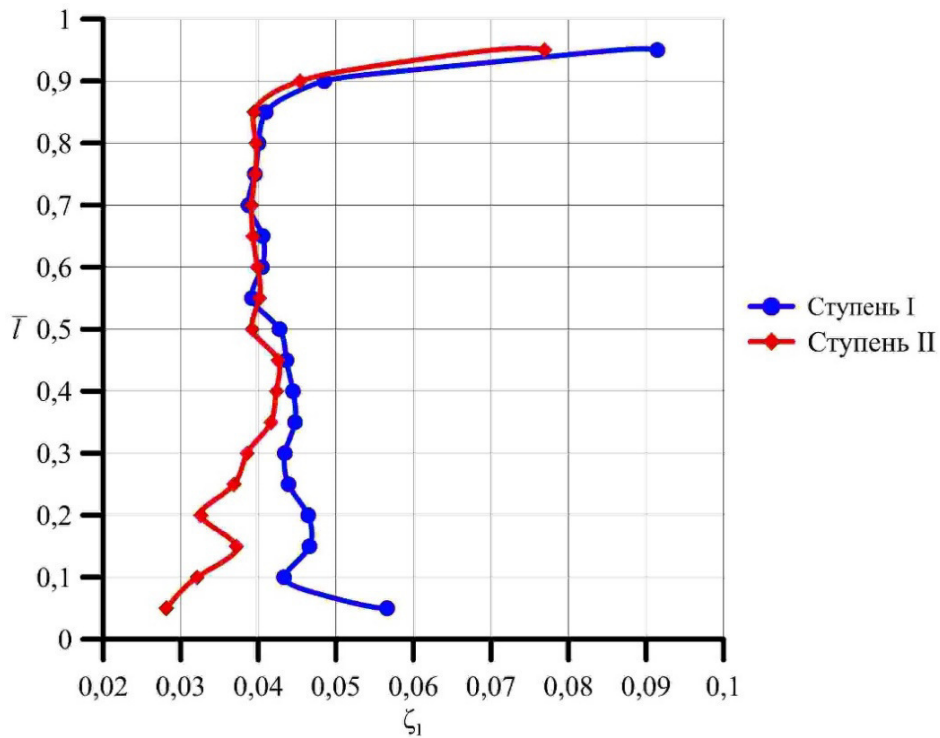


Рис. 7. Коэффициенты потерь кинетической энергии ζ_1 в направляющем аппарате по высоте лопатки
 Fig. 7. The coefficient of losses of the kinetic energy ζ_1 for the guide vane by the height of the blade

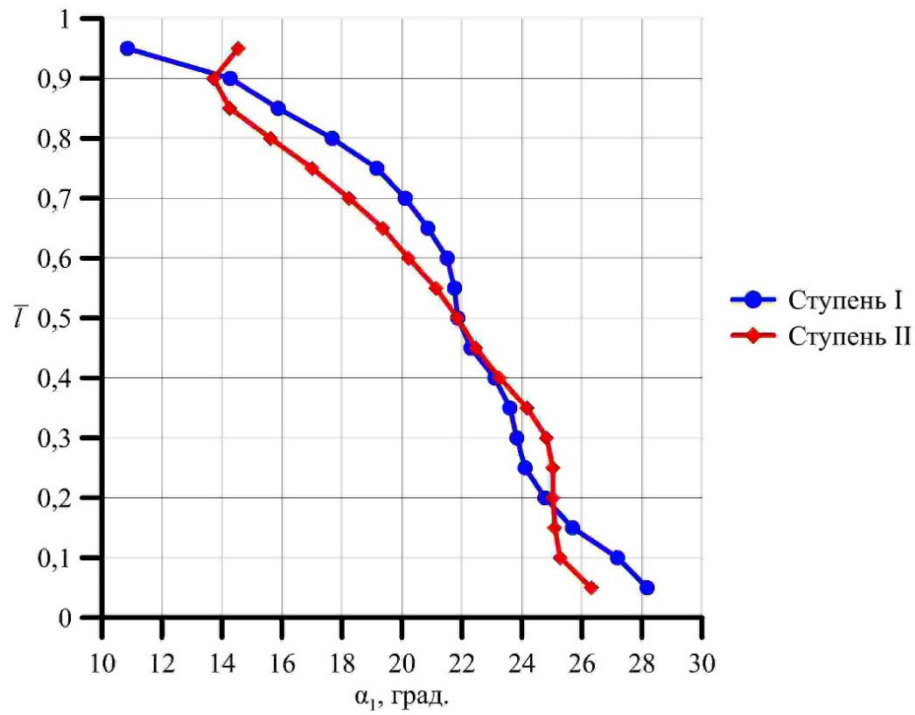


Рис. 8. Углы потока α_1 за направляющим аппаратом по высоте лопатки
 Fig. 8. The flow angle α_1 behind the guide vane by the height of the blades

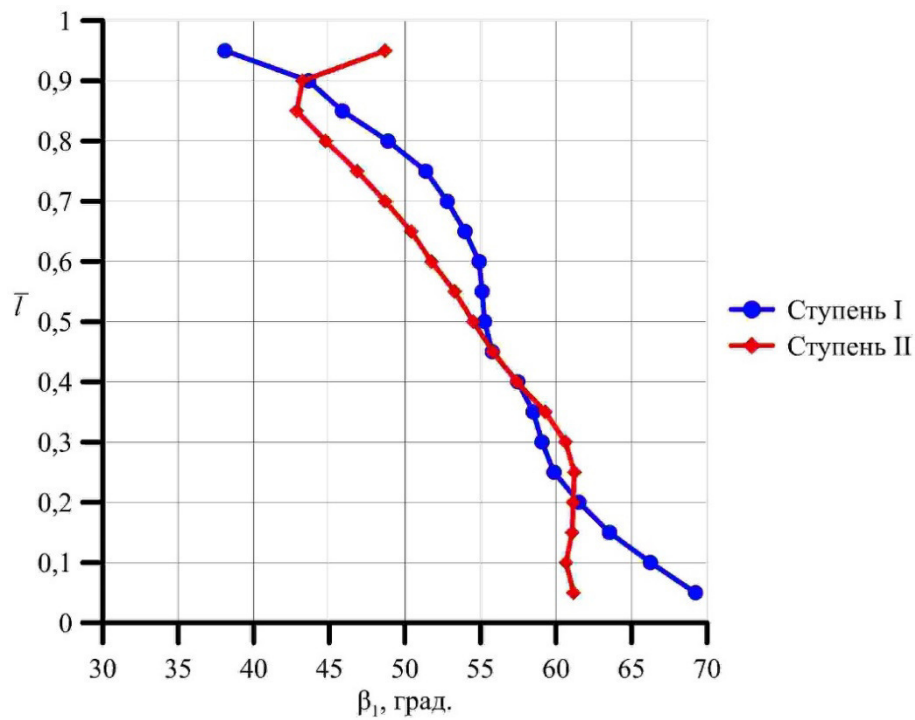


Рис. 9. Углы потока β_1 перед РЛ по высоте лопатки
 Fig. 9. The flow angle β_1 in front of rotor blades by the height of the blade

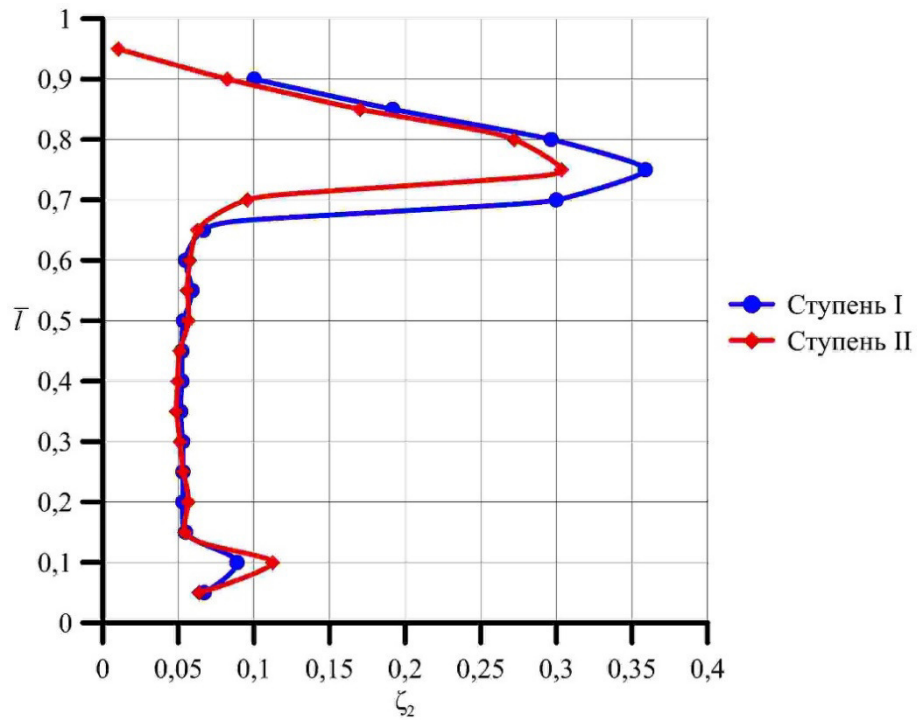


Рис. 10. Коэффициенты потерь кинетической энергии ζ_2 в рабочем колесе по высоте лопатки
 Fig. 10. The coefficient of losses of the kinetic energy ζ_2 for the impellers by the height of the blade

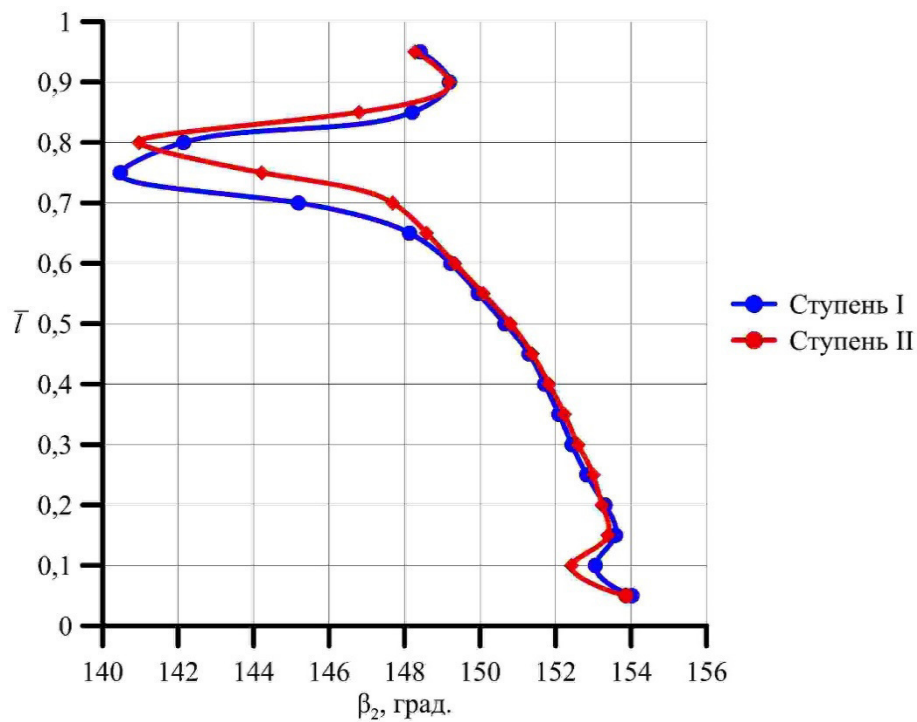


Рис. 11. Углы потока β_2 за РЛ по высоте лопатки
 Fig. 11. The flow angle β_2 behind rotor blades by the height of the blade

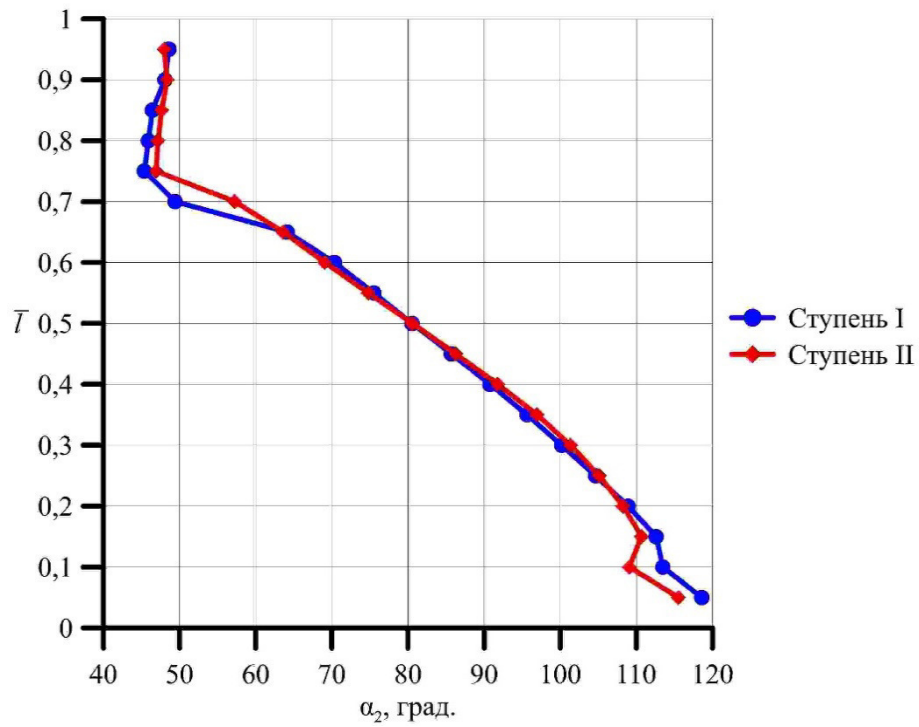


Рис.12. Углы потока α_2 за РЛ по высоте лопатки
 Fig. 12. The flow angle α_2 behind rotor blades by the height of the blade

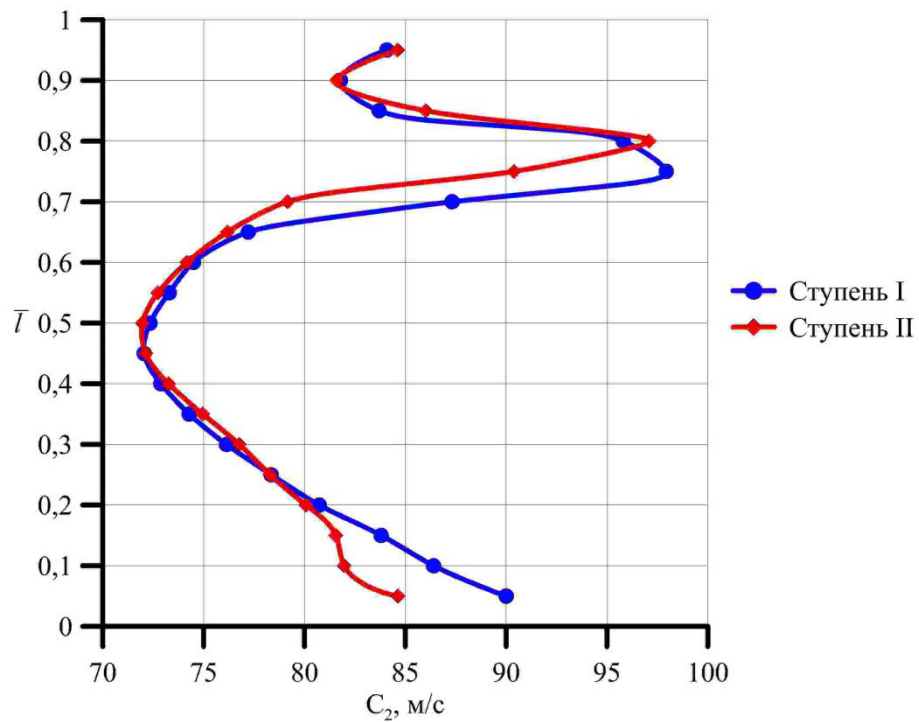


Рис. 13. Выходные скорости C_2 из турбинных ступеней по высоте лопатки
 Fig. 13. Velocities outlet C_2 from turbine stages by the height of the blade

Углы потока α_1 в обеих ступенях уменьшаются от корня к периферии (рис. 8), что типично для ступеней с отрицательным градиентом степени реактивности, полученным за счет применения ТННЛ [1, 12, 13].

Как уже упоминалось, направляющие лопатки ступеней I и II проектировались при условии постоянства эффективного угла $\alpha_{1\text{эф}} = \arcsin(a_1/t_1) = 18^\circ 10' = \text{const}$ на цилиндрических поверхностях тока. Если дозвуковое течение газа в ступени обычного типа близко к цилиндрическому, то и поточные углы α_1 будут примерно соответствовать условию $\alpha_1 = \text{const}$ [8]. Как показано на рис. 2–5, течение газа в направляющих аппаратах (НА) ступеней I и II имеет сложный пространственный характер. Если эффективные углы $\alpha_{1\text{эф}}$ оценивать вдоль криволинейных поверхностей тока, то в 2/3 части НА от корня горла a_1 будут регистрироваться на большем радиусе, чем шаги t_1 . Поэтому и эффективные $\alpha_{1\text{эф}}$, и поточные α_1 углы увеличиваются по сравнению с проектными значениями. В 1/3 части НА у периферии в ступени I и эффективные $\alpha_{1\text{эф}}$, и поточные α_1 углы, напротив, уменьшаются по сравнению с проектными значениями. Предположительно это можно объяснить негативным влиянием стыка НЛ с периферийным обводом под тупым углом и обратным влиянием в дозвуковом потоке отрывного течения у периферии РЛ (рис. 2). Ступень II лучше соответствует условию $\alpha_1 = \text{const}$, чем ступень I (рис. 8). Способ реализации условия $\alpha_1 = \text{const}$ в ступенях с отрицательным градиентом степени реактивности рассмотрен в статье [13].

Углы потока β_1 в обеих ступенях также уменьшаются от корня к периферии (рис. 9), поэтому рабочие лопатки обтекаются с отрицательными углами атаки у корня и положительными – у периферии.

Коэффициент потерь кинетической энергии ζ_2 в рабочем колесе турбинной ступени II меньше, чем в турбинной ступени I, особенно в периферийной зоне (рис. 10). Это объясняется тем, что в ступени II устранены неблагоприятные течения в месте стыка направляющих лопа-

ток с меридианными обводами проточной части. Тем самым, как уже отмечалось, уменьшается зона отрывных течений у периферии в ступени II по сравнению со ступенью I (рис. 2, 3).

Углы потока β_2 в обеих ступенях уменьшаются от корня к периферии (рис. 11) вследствие веерности, присущей решетке рабочих лопаток постоянного профиля. Типичный для ступеней с отрицательным градиентом степени реактивности провал углов β_2 у периферии для ступени II выражен слабее, чем для ступени I.

Углы потока α_2 в обеих ступенях также уменьшаются от корня к периферии (рис. 12). В корневой зоне углы α_2 в ступени II меньше, а периферийной зоне больше, чем в ступени I.

Выходная скорость C_2 (рис. 13) и соответствующие ей удельные потери кинетической энергии $\frac{C_2^2}{2}$ в ступени II меньше, чем в ступени I.

По указанным выше причинам КПД турбинной ступени II больше, чем в турбинной ступени I (рис. 6).

Выводы

Физическая картина течения газа в турбинных ступенях с отрицательным градиентом степени реактивности, полученным под влиянием тангенциального наклона направляющих лопаток, характеризуется значительным искривлением меридианных линий тока в осевом зазоре между направляющими и рабочими лопатками выпуклостью к оси турбины z . Линии тока внутри каналов между направляющими лопатками формируют поверхности тока, почти перпендикулярные перу направляющей лопатки. То есть для ступеней с ТННЛ характерно «косое» обтекание направляющих лопаток, существенно отличающееся от течения на осесимметричных поверхностях тока.

По соображениям экономичности, в турбинных ступенях с отрицательным градиентом степени реактивности, полученным под влиянием тангенциального наклона направляющих лопаток, выгоднее вместо традиционных применять «интегральные» направляющие лопатки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Афанасьева Н.Н., Бусурин В.Н., Гоголев И.Г., Дьяконов Р.И. [и др.]**. Аэродинамические характеристики ступеней тепловых турбин. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1980. 263 с.
- [2] **Алексеев О.Н., Кириллов А.И., Лапшин К.Л., Черников В.А.** Исследования турбинных ступеней с навалом сопловых лопаток // Труды ЛПИ. 1969. № 310. С. 35–40.
- [3] **Батурич О.В., Матвеев В.Н.** Расчетное исследование влияние тангенциального наклона сопловых лопаток на газодинамическую эффективность ступени осевой турбины // Вестник Самарского государственного аэродинамического университета. 2008. № 3. С. 114–118.
- [4] **Гаев В.Д.** Разработка и модернизация проточных частей для повышения эффективности и функциональности паровых турбин: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2018. 280 с.
- [5] **Ершов С.В., Яковлев В.А.** Аэродинамическая оптимизация лопаточных аппаратов турбин: подходы, методы и результаты // Проблемы машиностроения. 2012. Т. 15, № 2. С. 3–13.
- [6] **Ершов С.В., Яковлев В.А.** Аэродинамическая оптимизация пространственной формы лопаток паровых и газовых турбин // Авиационно-космическая техника и технология. Национальный аэродинамический университет им. Н.Е. Жуковского ХАИ. Харьков. 2008. № 7. С. 66–70.
- [7] **Ершов С.В., Яковлев В.А.** Многорежимная аэродинамическая оптимизация пространственной формы лопаточных аппаратов турбин // Авиационно-космическая техника и технология. Национальный аэродинамический университет им. Н.Е. Жуковского ХАИ. Харьков. 2010. № 9. С. 29–33.
- [8] **Кириллов И.И.** Теория турбомашин. Л.: Машиностроение, 1972. 533 с.
- [9] **Кириллов И.И., Агафонов Б.Н., Афанасьева Н.Н., Кириллов А.И., Проскураков Г.В., Черников В.А., Шварцман О.А.** Исследование и отработка ступеней для высокотемпературных газовых турбин // Теплоэнергетика. 1983. № 3. С. 50–55.
- [10] **Кириллов А.И., Сироткин Я.А., Лапшин К.Л.** Особенности расчета турбинных ступеней с тангенциальным наклоном направляющих лопаток // Энергомашиностроение. 1984. № 7. С. 2–5.
- [11] **Лапшин К.Л.** Компьютерная оптимизация паровых и газовых турбин. СПб. 2018. URL: <http://elib.spbstu.ru/dl/2/s18-1.pdf>, <http://doi.org/10.18720/SPBPU/2/s18-1>
- [12] **Нгуен А.К., Лапшин К.Л.** Характеристики и структура потока турбинной ступени с отрицательным градиентом степени реактивности // Научно-технические ведомости СПбГПУ. СПб. Изд-во Политехнического университета. 2016. №2. С. 163–173.
- [13] **Нгуен А.К., Лапшин К.Л.** К вопросу о рациональном проектировании турбинных ступеней с тангенциальным наклоном направляющих лопаток // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 4, № 3. С. 114–125. DOI:10.18721/JEST.240310.
- [14] **Нгуен А.К., Лапшин К.Л.** Влияние тангенциального наклона рабочих лопаток на потери кинетической энергии в осевой турбинной ступени // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2017. Т. 23, № 4. С. 66–73. DOI:10.18721/JEST.230406.
- [15] **Тюхтяев А.М., Ласкин А.С., Захаров А.В.** Потери кинетической энергии потока по высоте направляющего аппарата последней ступени мощных паровых турбин // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 6. С. 66–81.
- [16] **Яковлев В.А., Ершов С.В.** Многорежимная оптимизация последней ступени ЦНД паровой турбины // Вестник Национального технического университета «ХПИ»: сб. науч. тр. Темат. вып.: Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. 2010. № 2. С. 32–38.
- [17] **Woft R., Romanov K.** Steam Turbine: Siemens Reactive Blading – Designed for Highest Efficiency and Minimal Performance Degradation. 2014. Russia Power, (2014) 1–19.
- [18] **Shieh T.H.** Aerothermodynamic Effect and Modeling of the Tangential Curvature of Guide Vanes in an Axial Turbine Stage // International Journal of Rotating Machinery. Vol. 2017. Article ID 3806356, 16 p. URL: <https://doi.org/10.1155/2017/3806356>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

НГУЕН Ан Куанг – аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого
E-mail: anquang12a1@mail.ru
ЛАПШИН Кирилл Леонидович – доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого
E-mail: kirill.lapschin@gmail.com

Дата поступления статьи в редакцию: 13.02.2019



REFERENCES

- [1] N.N. Afasnasyeva, V.N. Busurin, I.G. Gogolev, R.I. Dyakonov [et al.], Aerodynamic characteristics of thermal turbine stages. L.: Engineering, 1980.
- [2] O.N. Alekseyev, A.I. Kirillov, K.L. Lapshin, V.A. Chernikov, Issledovaniya turbinnnykh stupeney s navalom soplovykh lopatok [The investigation of turbine stages with the bulk of guide blades], Proceedings of Leningrad Polytechnic Institute, 310 (1969) 35–40.
- [3] O.V. Baturin, V.N. Matveev, Calculated study of tangential inclination of nozzle vanes influence on gas-dynamic efficiency of axial turbine stage, Bulletin of Samara State Aerospace University, 3 (2008) 114–118.
- [4] V.D. Gaev, Razrabotka i modernizatsiya protochnykh chastey dlya povysheniya effektivnosti i funktsionalnosti parovykh turbin [Development and modernization of flow parts to improve the efficiency and functionality of steam turbines]: dis. ...d-ra tekhn. nauk, St. Petersburg, 2018.
- [5] S.V. Yershov, V.A. Yakolev, Aerodynamic optimization of turbine blade: approaches, method and results, Engineering problems, 15 (2) (2012) 3–13.
- [6] S.V. Yershov, V.A. Yakolev, Aerodynamic optimization of spatial shape of steam and gas turbine bladings, Aviationspace technology and technology, National Aerodynamic University named N.E. Zhukovsky KhAI, Kharkov, 7 (2008) 66–70.
- [7] S.V. Yershov, V.A. Yakolev, Multi-point optimization of spatial shape of turbine bladings, Aviationspace technology and technology, National Aerodynamic University named N.E. Zhukovsky KhAI, Kharkov, 9 (2010) 29–33.
- [8] I.I. Kirillov, Theory of turbomachinery. L.: Engineering, 1972.
- [9] I.I. Kirillov, B.N. Agafonov, N.N. Afanasyeva, A.I. Kirillov, G.V. Proskuryakov, V.A. Chernikov, O.A. Shvartsman, The investigation and testing of stages for high-temperature gas turbines, Thermalpower, 3 (1983) 50–55.
- [10] A.I. Kirillov, Ya.A. Sirotkin, K.L. Lapshin, Features of the calculation of turbine stages with tangential inclination of nozzle vanes, Power engineering, 7 (1984) 2–5.
- [11] K.L. Lapshin, Computer optimization of stream and gas turbines. SPb., 2018. URL: elib.spbstu.ru/dl/2/s18-1.pdf. DOI: org/10.18720/SPBPU/2/s18-1.
- [12] A.Q. Nguyen, K.L. Lapshin, Characteristics and structure of the flow in a turbine stage with a negative gradient of the degree of reactivity. St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology, 2 (2016) 163–173. DOI: 10.5862/JEST.243.17
- [13] A.Q. Nguyen, K.L. Lapshin, To the question of the rational design of turbine stages with tangential inclination of guide blades, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology, 24 (3) (2018) 114–125. DOI: 10.18721/JEST.24.3.10
- [14] A.Q. Nguyen, K.L. Lapshin, The influence of tangential inclination of rotor blades on kinetic energy losses in an axial turbine stage, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology, 23 (4) (2017) 66–73. DOI: 10.18721/JEST.23.4.6
- [15] A.M. Tyukhatyayev, A.S. Laskin, A.V. Zakharov, Spanwise distribution of energy losses in steam turbine last stage nozzle, Electronic journal «Science and Education»: scientific periodical of the Bauman MSTU, 6 (2014) 66–81.
- [16] V.A. Yakolev, S.V. Yershov, Multi-point optimization of the last stage of steam turbine low pressure cylinder, Bulletin: Proceedings of National Technical University KhPI, Theme issue: Energy and heat engineering processes and equipment, Kharkov, 2 (2010) 32–38.
- [17] R. Woft, K. Romanov, Steam Turbine: Siemens Reactive Blading – Designed for Highest Efficiency and Minimal Performance Degradation, Russia Power, (2014) 1–19.
- [18] T.H. Shieh, Aerothermodynamic Effect and Modeling of the Tangential Curvature of Guide Vanes in an Axial Turbine Stage, International Journal of Rotating Machinery, Article ID 3806356 (2017) 16. DOI: org/10.1155/2017/3806356.

THE AUTHORS

NGUYEN An Q. – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: anquang12a1@mail.ru

LAPSHIN Kirill L. – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: kirill.lapshin@gmail.com

Received: 13.02.2019