

DOI: 10.18721/JEST.240310  
УДК 621.438.001.2

*А.К. Нгуен, К.Л. Лапшин*

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

## **К ВОПРОСУ О РАЦИОНАЛЬНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТУРБИННЫХ СТУПЕНЕЙ С ТАНГЕНЦИАЛЬНЫМ НАКЛОНОМ НАПРАВЛЯЮЩИХ ЛОПАТОК**

В статье представлены результаты исследования влияния способов рационального проектирования направляющих лопаток с тангенциальным наклоном на характеристики и структуру потока в осевых турбинных ступенях. Построены графики КПД, степеней реактивности у корня и у периферии в зависимости от параметра  $u/C_0$ . Выполнено траверсирование параметров потока по высоте лопатки (углов потока, коэффициентов потерь кинетической энергии в направляющем аппарате и в рабочем колесе, выходной скорости) и сравнение полученных результатов расчета между ступенями. Дано заключение о влиянии способов рационального проектирования направляющих лопаток с тангенциальным наклоном на характеристики и структуру потока в осевых турбинных ступенях.

*Ключевые слова:* турбинная ступень, тангенциальный наклон направляющих лопаток, способы рационального проектирования, потери кинетической энергии, степень реактивности, ANSYS CFX.

*Ссылка при цитировании:*

А.К. Нгуен, К.Л. Лапшин. К вопросу о рациональном проектировании турбинных ступеней с тангенциальным наклоном направляющих лопаток // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 3. С. 114–125. DOI: 10.18721/JEST.240310.

*A.Q. Nguyen, K.L. Lapshin*

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

## **TO THE QUESTION OF THE RATIONAL DESIGN OF TURBINE STAGES WITH TANGENTIAL INCLINATION OF GUIDE BLADES**

In this article, we have explored the influence of methods for rational design of turbine stages with tangential inclination of guide blades on the characteristics and flow structure. We have constructed calculation models for three turbine stages with tangential inclination of guide blades. 3D-testing gas-dynamic calculations were performed in the ANSYS CFX software package. We have constructed graphs for the efficiency, the degrees of reactivity at the root and at the periphery depending on the parameter. The distributions of flow parameters (flow angles, the coefficient of kinetic energy losses for the guide vanes and the impeller, outlet velocity) have been given by blade height. The calculation results between three turbine stages have been compared. The conclusion about the influence of methods of rational design of turbine stages with tangential inclination of guide blades on the characteristics and flow structure has been given.

*Keywords:* turbine stage, tangential inclination of guide vanes, methods of rational design, kinetic energy losses, degree of reactivity, ANSYS CFX.

*Citation:*

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(03)(2018) 114–125, DOI: 10.18721/JEST.240310.

## Введение

Как известно, один из современных способов оптимизации характеристик и структуры потока осевых турбинных ступеней — использование нерадиальной установки направляющих лопаток (НЛ). Применение тангенциального наклона направляющих лопаток (ТННЛ) может повысить КПД осевой турбинной ступени и уменьшить градиент степени реактивности по высоте лопатки [1–15] по сравнению со ступенью обычного типа. В лаборатории турбиностроения Ленинградского политехнического института были выполнены экспериментальные исследования осевых турбинных ступеней с ТННЛ на воздушной турбине [1] и 3D газодинамические расчеты ступени такого типа с помощью аэродинамического пакета ANSYS CFX [15]. Для этой ступени направляющие лопатки с прямолинейной (в плоскости  $r$ - $u$  цилиндрической системы координат) выходной кромкой проектировались пятью профилями, лежащими на цилиндрических поверхностях тока, при условии постоянства по высоте лопатки эффективного угла ( $\alpha_{1эф} = \text{const}$ ) для решёток НЛ. Ступень такого типа с рабочими лопатками (РЛ) постоянного по высоте лопатки профиля имеет определённые преимущества. Во-первых, РЛ не закручены, поэтому упрощается технология их изготовления для интенсивно охлаждаемых лопаток первых ступеней высокотемпературных газовых турбин. Во-вторых, ступень с ТННЛ при наличии высокой степени реактивности у корня позволяет уменьшить разницу между осевыми усилиями, действующими на ротор в системе «компрессор — турбина», когда они жестко связаны на одном валу.

Так как ТННЛ теперь применяется достаточно широко, то представляется актуальным исследование влияния различных способов рационального проектирования направляющих лопаток с традиционным (с прямолинейной выходной кромкой НЛ) тангенциальным наклоном на характеристики и структуру потока в осевых турбинных ступенях.

**Цель работы** состоит в том, чтобы исследовать влияние различных способов рационального проектирования направляющих лопаток с традиционным тангенциальным наклоном НЛ на характеристики и структуру потока в осевых турбинных ступенях на виртуальном стенде за счет использования аэродинамического пакета ANSYS CFX. Положительный опыт такого подхода показан в [15].

## Постановка задачи

Чтобы корректно достичь поставленной цели, были спроектированы три осевых турбинных ступени по указанным ниже рекомендациям.

*Ступень I.* Оригинальная ступень с ТННЛ имеет среднюю веерность  $\left(\frac{d_{2c}}{l_2} = 6,34\right)$ , ее теоретические и экспериментальные исследования были представлены в статьях [1, 15]. Направляющие лопатки созданы профилями, находящимися на пяти цилиндрических поверхностях тока по высоте лопатки (см. рис. 1). Угол тангенциального наклона между прямолинейной линией центров радиусов скругления выходных кромок профилей и осью  $r$  в плоскости  $r$ - $u$  цилиндрической системы координат составляет  $\delta = 23^\circ$  на среднем радиусе (рис. 1). Эффективный угол  $\alpha_{1эф}$  решеток профилей НЛ постоянен вдоль радиуса и равен  $18^\circ 10'$ .

*Ступень II.* Сначала проектируется НЛ с прямолинейной и радиальной линией центров радиусов скругления выходных кромок профилей ступени I на пяти цилиндрических поверхностях тока при условии  $\alpha_{1эф} = \text{const}$ . Затем перо направляющей лопатки в целом поворачивается на заданный угол тангенциального наклона  $\delta = 23^\circ$  на среднем радиусе (см. рис. 1). Именно такой подход к проектированию ступеней с ТННЛ особенно популярен на практике.

*Ступень III.* Как и для ступени I, направляющие лопатки созданы профилями ступени I, находящимися на цилиндрических поверхно-

стях тока на пяти сечениях по высоте лопатки (см. рис. 1). При этом изменены углы установки профилей направляющих лопаток на этих сечениях по сравнению со ступенью I, а именно: уменьшены углы установки профилей в сечениях 1, 2, 3 и 4, а в сечении 5 угол установки профилей увеличен. Эти изменения показаны на рис. 2. Эффективный угол решеток профилей НЛ ступени III нарастает вдоль радиуса.

Рабочие лопатки не закручены, имеют неизменные профили по высоте и одинаковы во всех трёх ступенях. Входной лопаточный угол РЛ –  $\beta_{вл} = 56^\circ$ , выходной эффективный угол решётки профилей на среднем диаметре –  $\beta_{2\phi} = 23^\circ 54'$ .

Основные геометрические характеристики оригинальной ступени I, взятые из [1], следующие:

Радиус корневого сечения $R'_1$ , мм .....	159,1
Длина направляющих лопаток $l_1$ , мм .....	58,2
Хорда направляющих лопаток $b_1$ , мм .....	16,5
Шаг направляющих лопаток $t_{1с}$ , мм .....	11,9
Число направляющих лопаток $z_1$ , шт. ....	100
Длина рабочих лопаток $l_2$ , мм .....	59,5
Хорда рабочих лопаток $b_{2с}$ , мм .....	27,9

Шаг рабочих лопаток $t_{2с}$ , мм .....	17,4
Число рабочих лопаток $z_2$ , шт. ....	68
Осевой зазор между направляющими и рабочими лопатками $\Delta z_1$ , мм .....	8

Для всех ступеней выполнены газодинамические 3D-расчеты с использованием рекомендаций статей [11–13]. Исследовались осевые турбинные ступени без радиального зазора над РК, что упрощает решение газодинамических 3D-задач.

Как известно, наличие радиального зазора у периферии РЛ без бандажной полки приводит к снижению КПД турбинной ступени. На величину снижения в значительной мере влияют два определяющих фактора: первый – конфигурация периферийного профиля РЛ, второй – уровень термодинамической степени реактивности у периферии ступени. Для всех рассмотренных в статье вариантов рабочая решётка принята одинаковой, а термодинамическая степень реактивности, как будет показано ниже, также мало меняется от варианта к варианту. Поэтому применение нулевого зазора в 3D-расчётах в определённой степени оправдано.

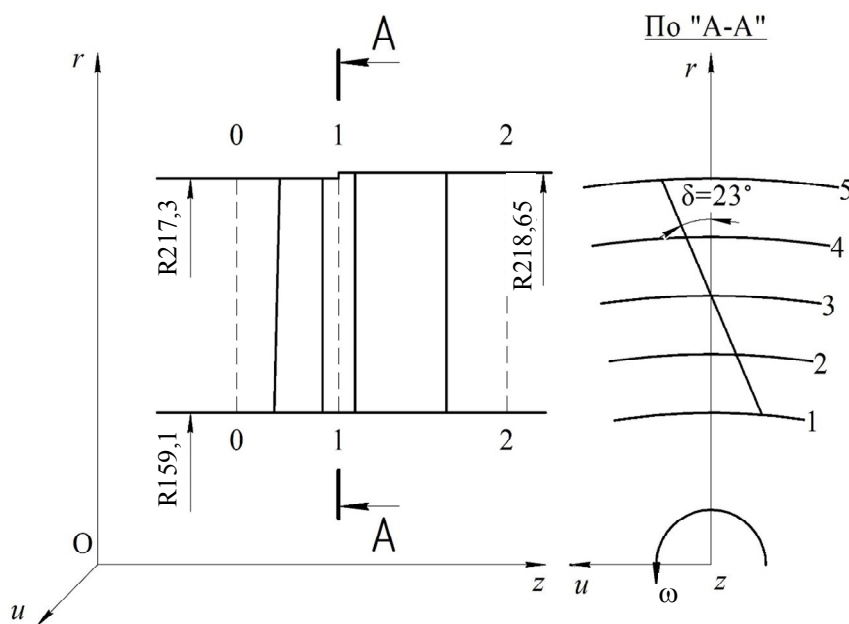


Рис. 1. Меридианные обводы ступени I и положения сечений  
 Fig. 1. Meridian contour of axial turbine stage and positions of sections

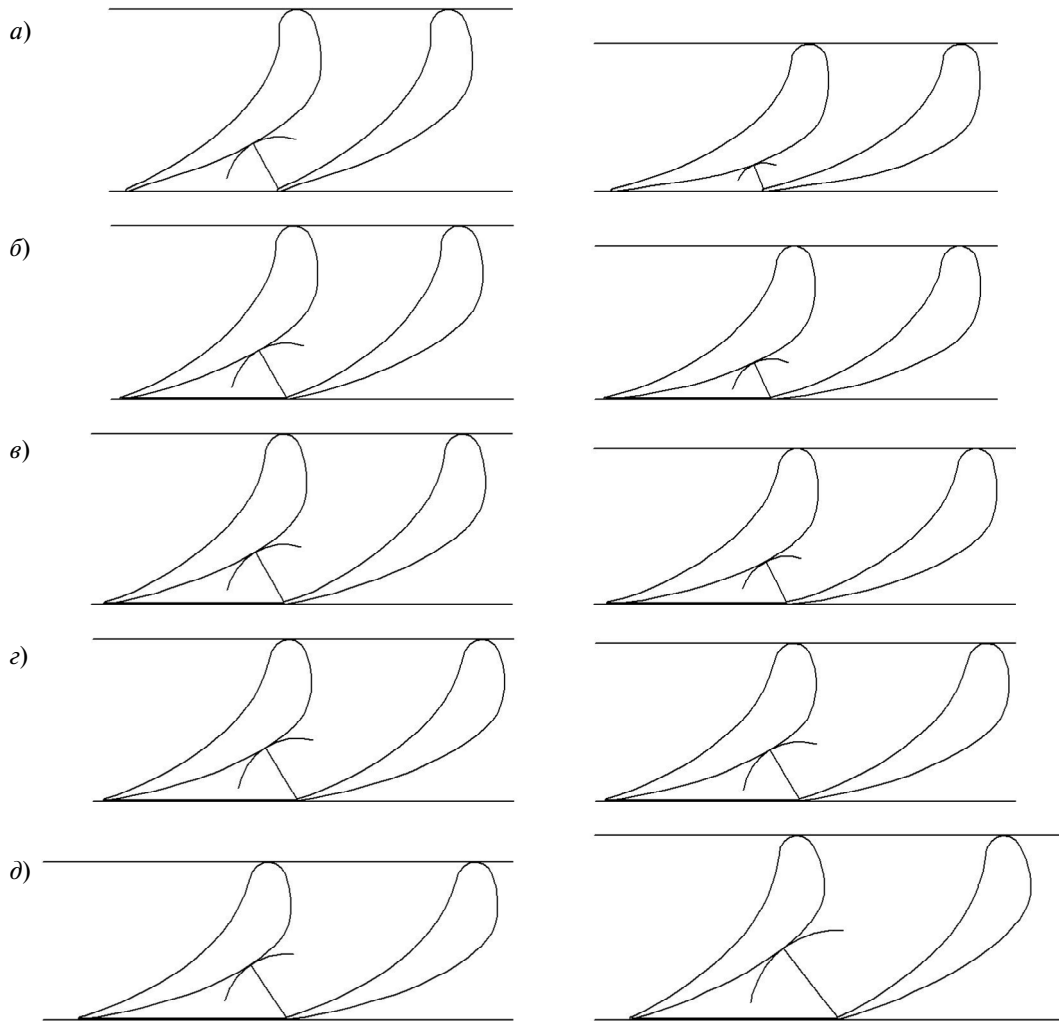


Рис. 2. Решётки профилей направляющих лопаток на пяти сечениях 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д).  
 Левые – профили НЛ ступени I, правые – профили НЛ ступени III

Fig. 2. Profiles of guide blades on five sections 1 (a), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д).  
 Left – profiles of guide blades in the stage I, right – profiles of guide blades in the stage III

*Расчетные модели:* секторы проточных частей осевых турбинных ступеней, состоящие из трех НЛ и двух РЛ. Выполнено сгущение сетки в области поверхностей, которые обтекает поток, чтобы обеспечить корректность газодинамических расчетов параметров газа в пределах пограничного слоя. Применен способ решения стационарной задачи – Stage. При использовании этого способа выполняется осреднение всех параметров потока в окружном направлении на поверхности сопряжения. Степень неравномерности пото-

ка перед РЛ, вычисленная по формуле Г.Ю. Степанова [14], составляет 3 %. Поэтому применение Stage в качестве способа решения стационарной 3D-задачи в наших расчетах вполне уместно. Приняты следующие граничные условия на входе в ступени и на выходе из ступеней:

Полное давление $P_0^*$ потока на входе в ступени, МПа .....	0,137
Полная температура $T_0^*$ потока на входе в ступени, К .....	368

Давление  $P_2$  в потоке на выходе из ступеней, МПа ..... 0,103298  
 Свойства рабочего тела ..... Air Ideal Gas  
 Принятая модель турбулентности .....  $k-\varepsilon$   
 Способ решения задачи ..... Stage

**Результаты расчетов**

После решения стационарных задач с помощью аэродинамического пакета ANSYS CFX для каждой из трёх ступеней определялись зависимости окружного КПД, степеней реактивности  $\rho'_T$  у корня и  $\rho''_T$  у периферии для различных значений параметра  $\frac{u}{C_0}$ . Эти зависимости представлены на рис. 3.

КПД ступени III больше, чем КПД ступеней I и II на всех режимах; разница по максимальным значениям составляет 1% по

сравнению со ступенью I и 1,2% по сравнению со ступенью II. Ступень II проигрывает по экономичности вблизи оптимума ступени I. Оптимум по КПД в ступени III смещен по сравнению со ступенями I и II в сторону больших значений параметра  $\frac{u}{C_0}$ .

Степени реактивности  $\rho''_T$  у периферии всех трех ступеней различаются не много. Степень реактивности  $\rho'_T$  у корня ступени III меньше, чем у ступеней I и II. Величина  $\Delta\rho_T = \rho''_T - \rho'_T$ , характеризующая снижение градиента степени реактивности, отрицательна для всех трех ступеней, причем максимальна (по модулю) для ступени I и минимальна (по модулю) для ступени III.

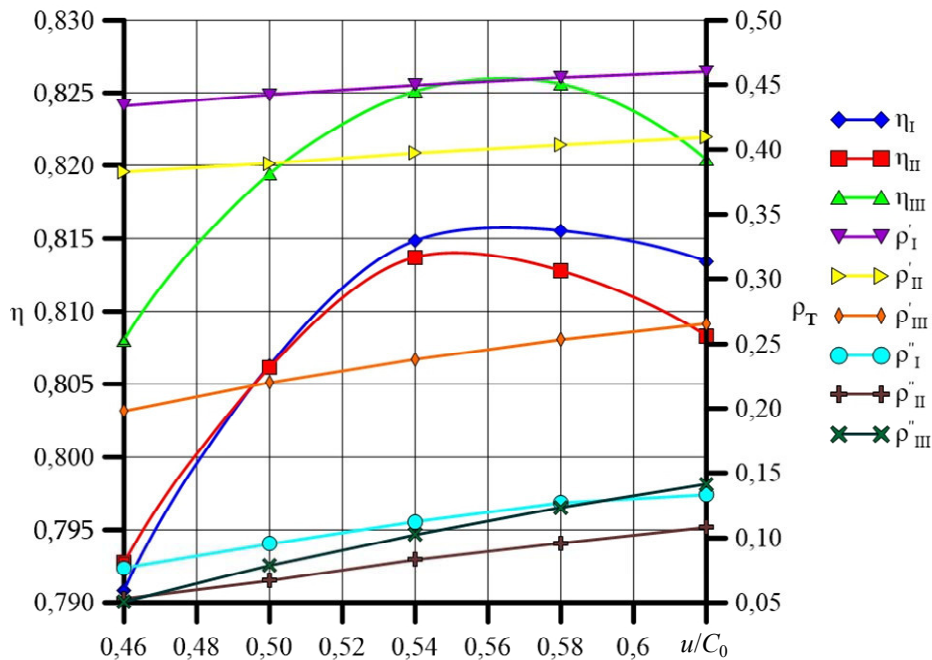


Рис. 3. Зависимости КПД  $\eta$ , степеней реактивности  $\rho'_T$  у корня и  $\rho''_T$  у периферии от параметра  $\frac{u}{C_0}$

Fig. 3. Change of the efficiency  $\eta$ , the degrees of reactivity  $\rho'_T$  at the root and  $\rho''_T$  the periphery on the parameter  $\frac{u}{C_0}$

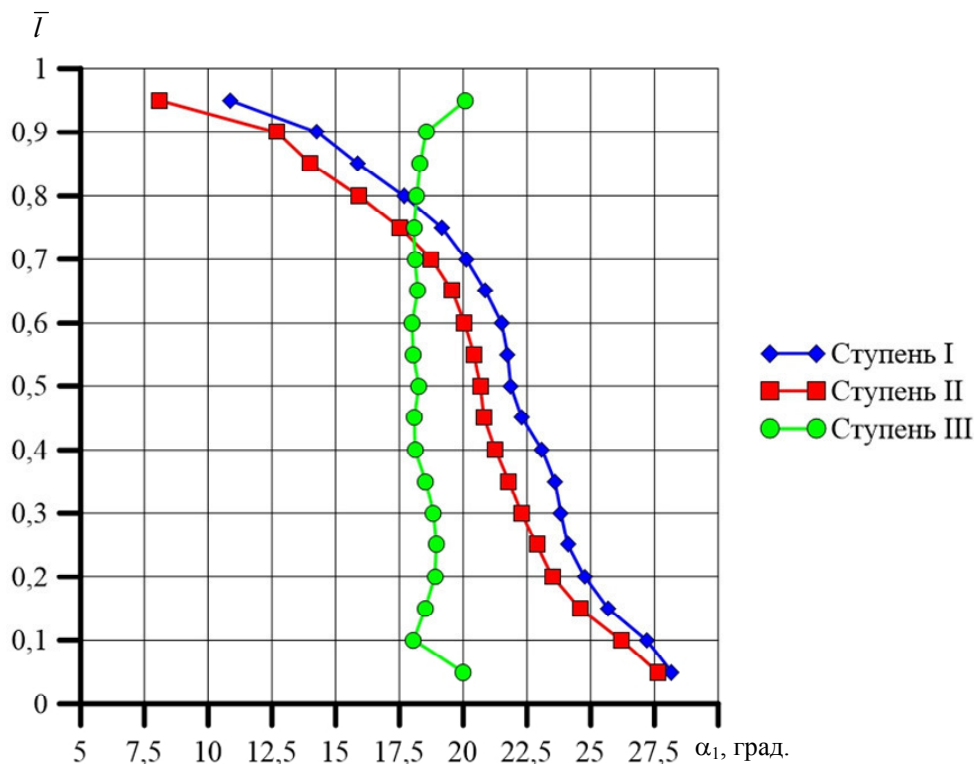


Рис. 4. Изменение угла потока  $\alpha_1$  по высоте лопатки  
 Fig. 4. Change of the flow angle  $\alpha_1$  by the height of the blades

Далее для более детального изучения влияния способов рационального проектирования направляющих лопаток на характеристики осевых турбинных ступеней были привлечены результаты траверсирования параметров потока (углы потока, коэффициенты потерь кинетической энергии в направляющем аппарате и рабочем колесе, выходная скорость) по высоте лопатки в расчетных сечениях 1–1 и 2–2 на оптимальных по КПД режимах.

На рис. 4 показаны результаты траверсирования углов потока  $\alpha_1$  по высоте лопатки. Хотя эффективные углы  $\alpha_{1\text{эф}}$  решёток в ступени I на цилиндрических поверхностях тока постоянны по высоте НЛ, поточные углы  $\alpha_1$  уменьшаются от корня к периферии, что типично для ступеней с традиционным ТННЛ [1]. Углы потока  $\alpha_1$  в ступени II несколько меньше, чем в ступени I, что связано с уменьшением при повороте пера НЛ горл решеток и поэтому углов  $\alpha_{1\text{эф}}$  в ступени II. При этом ха-

рактически изменение угла  $\alpha_1$  вдоль радиуса в ступени II такой же, как и в ступени I. Напротив, угол потока  $\alpha_1$  в ступени III почти постоянен вдоль радиуса, в то время как эффективные углы  $\alpha_{1\text{эф}}$  решёток нарастают по высоте НЛ. Это объясняется тем, что профили решеток НЛ в ступени III на пяти сечениях повернуты так, чтобы устранить разницу между углами  $\alpha_{1\text{эф}}$  и  $\alpha_1$ , существующую в ступени I. Численный эксперимент доказал целесообразность такого подхода при проектировании турбинных ступеней с традиционным ТННЛ при условии  $\alpha_1 = \text{const}$ , так как окружной КПД ступени III максимален.

Результаты траверсирования углов потока  $\beta_1$  по высоте лопатки представлены на рис. 5. Углы потока  $\beta_1$  в ступени I заметно отличаются от геометрического  $\beta_{1л} = 56^\circ$ , постоянного по высоте рабочей лопатки и равного поточному углу  $\beta_1$ , только на среднем диаметре. В прикорневой зоне поток обтекает профили рабочих лопаток

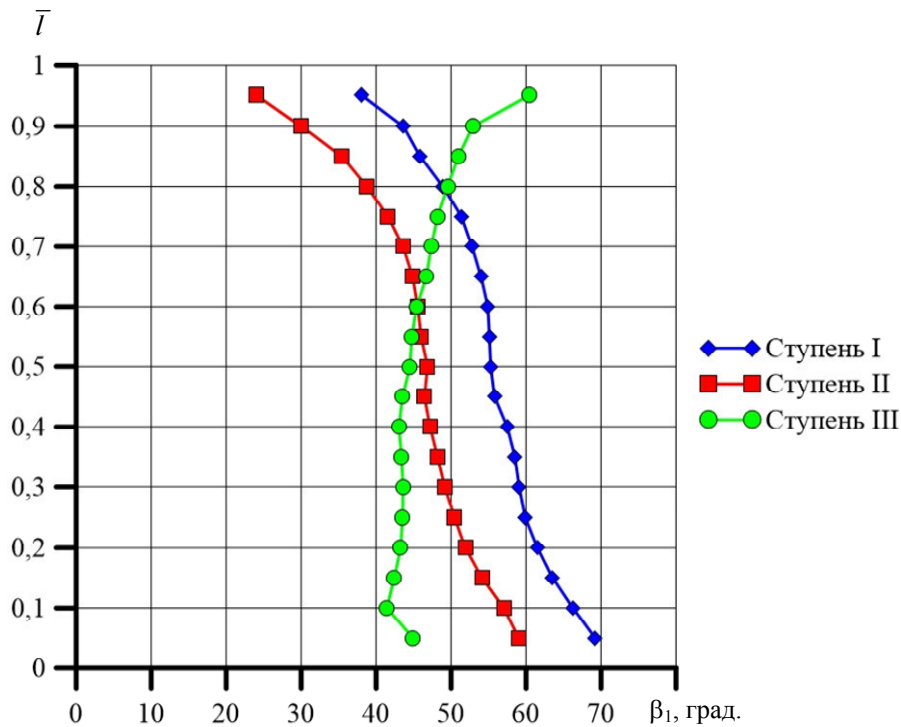


Рис. 5. Изменение угла потока  $\beta_1$  по высоте лопатки  
 Fig. 5. Change of the flow angle  $\beta_1$  by the height of the blades

в ступени I с отрицательными, а в периферийной – с положительными углами атаки. В ступени II значительная часть РЛ, за исключением прикорневой зоны, обтекается с положительными углами атаки. В ступени III рабочая лопатка практически по всей высоте обтекается с большими положительными углами атаки. Таким образом, при устранении положительных углов атаки за счет применения профиля РЛ с меньшим геометрическим углом (например,  $\beta_{1л} = 45^\circ$ ) КПД ступени III должен заметно увеличиться.

На рис. 6 показаны результаты траверсирования угла  $\alpha_2$  потока. Видно, что углы  $\alpha_2$  за рабочими лопатками заметно уменьшаются по высоте лопатки и практически совпадают для ступеней I и II. В прикорневой зоне закрутка потока за этими ступенями – отрицательная, а в периферийной – положительная; на среднем диаметре угол  $\alpha_2 \approx 80^\circ$ . В ступени III угол  $\alpha_2$  уменьшается по высоте лопатки несколько

меньше, чем в ступенях I и II, на среднем диаметре угол  $\alpha_2 \approx 63^\circ$ . Таким образом, оптимум по КПД в ступени III реализуется при заметно неосевом выходе потока из ступени, что объясняется наличием больших положительных углов атаки на входе потока в РЛ.

Распределение угла потока  $\beta_2$  по высоте лопатки представлено на рис. 7. Углы  $\beta_2$  в целом уменьшаются по высоте лопатки, что объясняется увеличением эффективного угла  $\beta_{2эф}$  для решётки, состоящей из рабочих лопаток постоянного профиля. Примерно треть проточной части за РЛ у периферии занята мощной вихревой структурой, которая возникает из-за своеобразной картины течения в турбинной ступени с ТННЛ [15] и неблагоприятных условий обтекания периферийных сечений пера НЛ, образующего тупой угол в месте стыка с обводом проточной части. Наличие этой вихревой структуры наблюдается и на рис. 8–10.

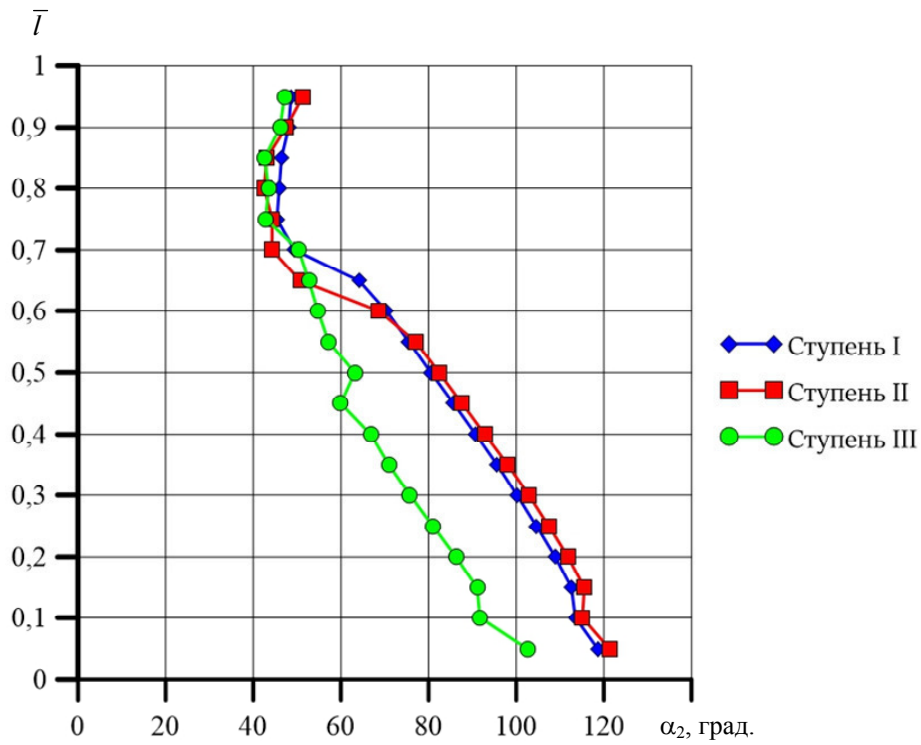


Рис. 6. Изменение угла потока  $\alpha_2$  по высоте лопатки  
 Fig. 6. Change of the flow angle  $\alpha_2$  by the height of the blades

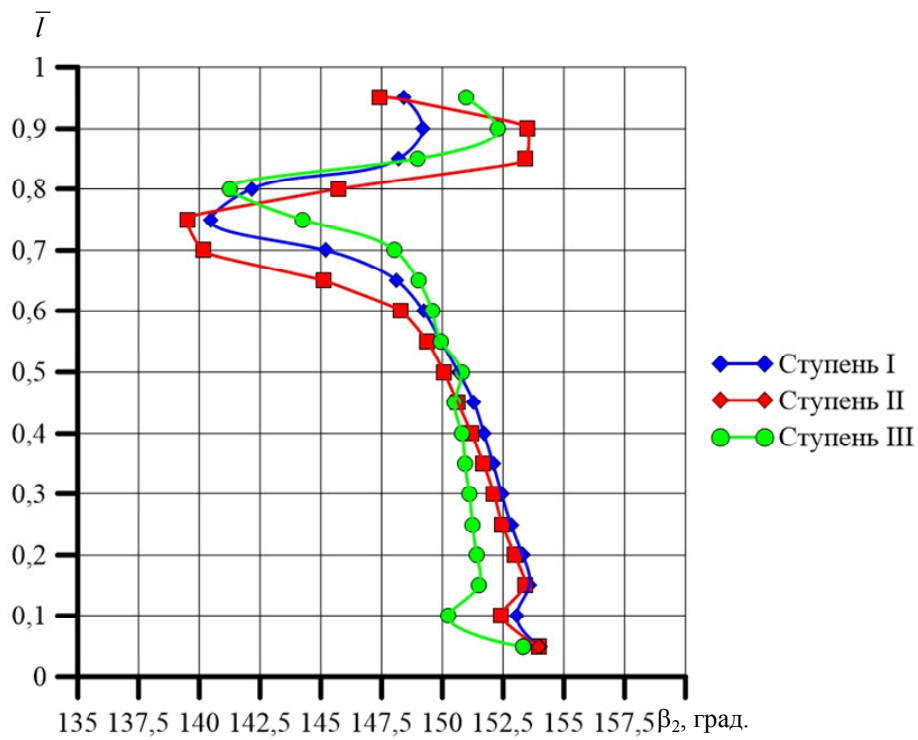


Рис. 7. Изменение угла потока  $\beta_2$  по высоте лопатки  
 Fig. 7. Change of the flow angle  $\beta_2$  by the height of the blades



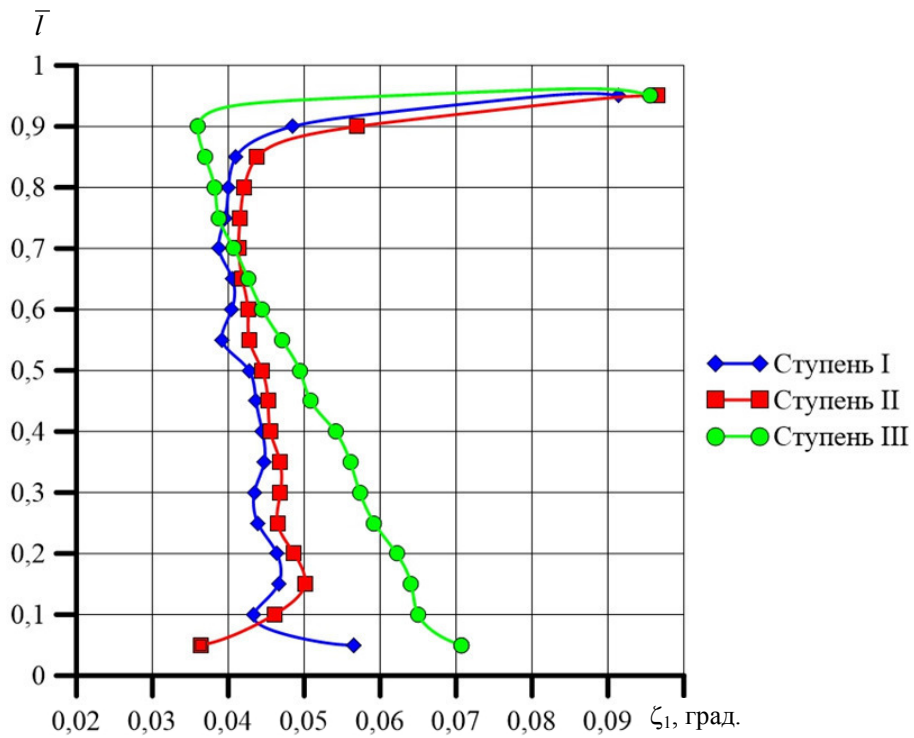


Рис. 8. Изменение коэффициента  $\zeta_1$  потерь кинетической энергии по высоте лопатки в направляющем аппарате

Fig. 8. Change of the coefficient of losses of kinetic energy  $\zeta_1$  for the guide vanes by the height of the blades

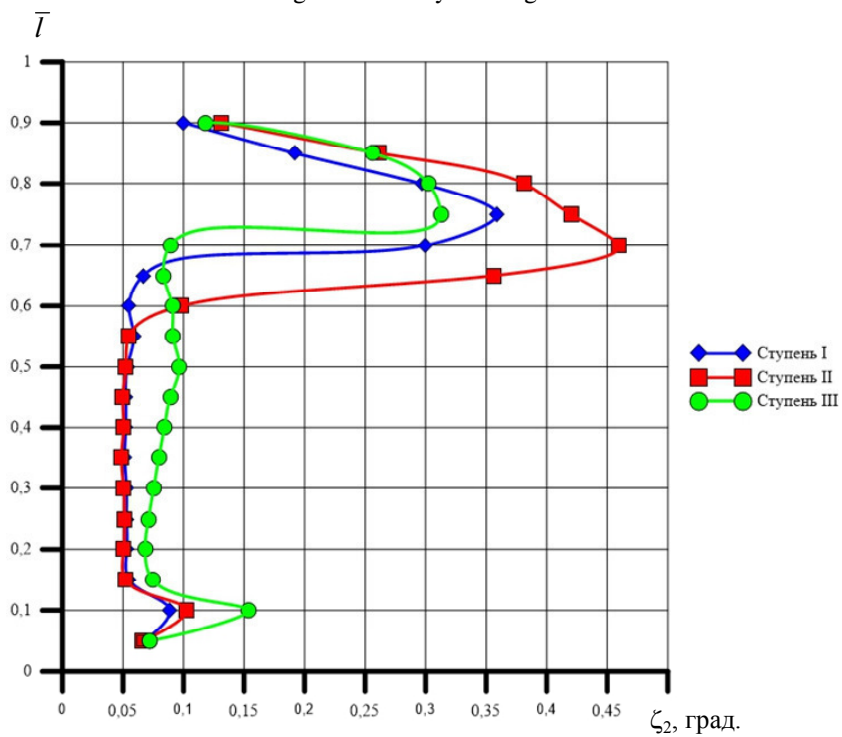


Рис. 9. Изменение коэффициента потерь  $\zeta_2$  кинетической энергии по высоте лопатки в рабочем колесе

Fig. 9. Change of the coefficient of losses of kinetic energy  $\zeta_2$  for the impellers by the height of the blades

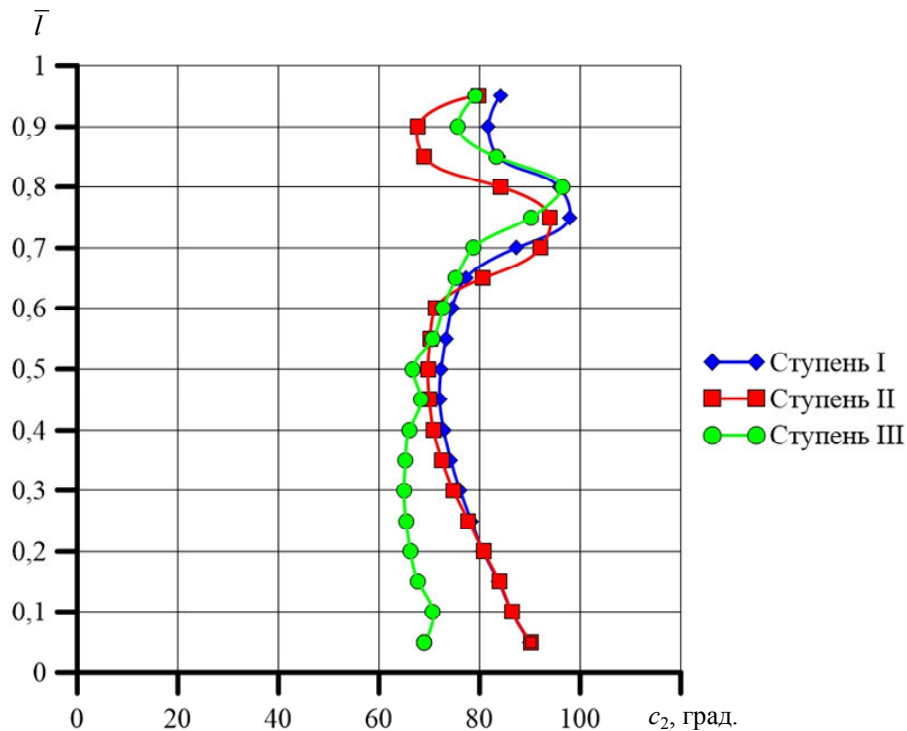


Рис. 10. Изменение выходной скорости  $c_2$  по высоте лопатки  
 Fig. 10: Change of the velocity outlet  $c_2$  by the height of the blades

На рис. 8 и 9 представлены результаты траверсирования коэффициентов потерь кинетической энергии:  $\zeta_1$  в направляющем аппарате и  $\zeta_2$  в рабочем колесе. Как обычно [15], под влиянием ТННЛ в ступенях I и II улучшается обтекание в корневых сечениях направляющих лопаток, но потери в периферийных сечениях (в том числе и в ступени III) возрастают по причине, указанной выше. Коэффициент потерь кинетической энергии  $\zeta_1$  в направляющем аппарате в ступени III на две трети высоты лопатки от корневого сечения больше, чем в ступенях I и II. Это объясняется ростом потерь на трение вследствие увеличения углов поворота потока в этой части решётки НЛ, а также краевых потерь из-за уменьшения размеров «горл» каналов в сечениях 1, 2 и 3 (см. рис. 2). Коэффициент потерь кинетической энергии  $\zeta_2$  в рабочем колесе в ступени III в этой зоне течения также больше, чем в ступенях I и II, что объясняется наличием суще-

ственных положительных углов атаки при натекании потока на рабочие лопатки.

Результаты траверсирования выходной скорости  $c_2$  по высоте лопатки показаны на рис. 10. Выходная скорость  $c_2$  ступени III заметно меньше, чем в ступенях I и II. Именно по этой причине ступень III имеет максимальный окружной КПД, несмотря на некоторое увеличение коэффициентов потерь кинетической энергии  $\zeta_1$  и  $\zeta_2$  по сравнению со ступенями I и II.

### Заключение

Исследования трёх турбинных ступеней с традиционным ТННЛ, проведенные на виртуальном стенде (ANSYS CFX), показали целесообразность проектирования НЛ с тангенциальным наклоном профилей, находящихся на цилиндрических поверхностях тока (ступени I и III). Проектирование НЛ с тангенциальным наклоном за счет поворота пера всей НЛ (ступень II) менее благоприятно.

Стремление добиться в ступени с традиционным ТННЛ выполнения условия постоянства угла потока  $\alpha_1 = \text{const}$  перед РЛ требует

проектирования НЛ с нарастающим вдоль радиуса эффективным углом  $\alpha_{1\text{эф}}$  решёток профилей (ступень III).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьева Н.Н., Бусурин В.Н., Гоголев И.Г., Дьяконов Р.И. Аэродинамические характеристики ступеней тепловых турбин / Под общ. ред. В.А. Черникова. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1980. 263 с.
2. Кириллов И.И., Кириллов А.И. Теория турбомашин. Примеры и задачи. Л.: Машиностроение (Ленинград. отд-ние), 1974, 320 с.
3. Кириллов И.И. Теория турбомашин. Л.: Машиностроение, 1972. 533 с.
4. 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.
5. Кириллов И.И., Агафонов Б.Н., Афанасьева Н.Н., Кириллов А.И., Проскуряков Г.В., Черников В.А., Шварцман О.А. Исследование и отработка ступеней для высокотемпературных газовых турбин // Теплоэнергетика. 1983. №3. С. 50–55.
6. Лапшин К.Л. Компьютерная оптимизация паровых и газовых турбин [Текст]: Монография [Электронный ресурс]. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. 200 с. URL: <http://elibr.spbstu.ru/dl/2/s18-1.pdf>, <http://doi.org/10.18720/SPBPU/2/s18-1>
7. Лапшин К.Л. Оптимизация проточных частей паровых и газовых турбин [Optimization of flow parts of steam and gas turbines]: Монография [Электронный ресурс]. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 198 с. URL: <http://dl.unilib.neva.ru/dl/2/3476.pdf>
8. Лапшин К.Л. Развитие одномерной теории осевых тепловых турбомашин. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2018. 50 с.
9. Лапшин К.Л. Оптимизация проточных частей паровых турбин с применением «интегральных» сопловых лопаток // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 1 (166). С. 61–66.
10. Лапшин К.Л., Фомин В.С., Аврутов Е.А., Кириллов В.И. Влияние тангенциального наклона направляющих лопаток на структуру потока и характеристики осевой турбинной ступени // Изв. вузов. Энергетика. 1985. № 7. С. 76–80.
11. Смирнов Е.М., Кириллов А.И., Рис В.В. Опыт численного анализа пространственных турбулентных течений в турбомашинах // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2004. № 1. С. 56–70.
12. Кириллов А.И., Рис В.В., Смирнов Е.М. Опыт решения методических и практических задач численного моделирования течений и теплообмена в турбомашинах // Справочник. Инженерный журнал. Приложение «Методы совершенствования энергетических установок». Изд-во «Машиностроение». Москва. 2004. № 10. С. 13–19.
13. Епифанов А.А., Кириллов А.И., Рассохин В.А. Расчет трехмерного течения в ступенях малорасходных турбин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. 2012. № 1 (142). С. 65–70.
14. Лапшин К.Л. Теория оптимального проектирования тепловых турбомашин / СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. 136 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://doi.org/10.18720/SPBPU/2s17-205>
15. Нгуен А.К., Лапшин К.Л. Характеристики и структура потока турбинной ступени с отрицательным градиентом степени реактивности // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2016. № 2 (243). С. 163–173.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**НГУЕН Ан Куанг** — аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: [anquang12a1@mail.ru](mailto:anquang12a1@mail.ru)

**ЛАПШИН Кирилл Леонидович** — доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: [kirill.lapschin@gmail.com](mailto:kirill.lapschin@gmail.com)

Дата поступления статьи в редакцию: 10.09.2018



## REFERENCES

- [1] Afasnasyeva N.N., Busurin V.N., Gogolev I.G., Dyakonov R.I. Aerodinamicheskiye kharakteristiki stupeney teplovykh turbin [Aerodynamic characteristics of thermal turbines stages] / Pod obshch. red. V.A. Chernikova. Leningrad: Mashinostroyeniye, Leningr. otd-niye, 1980. 263 p. (rus.)
- [2] Kirillov I.I., Kirillov A.I. Teoriya turbomashin. Primery i zadachi. [Theory of turbomachinery. Examples and exercises]. Leningrad: Mashinostroyeniye (Leningrad. otd-niye), 1974. 320 p. (rus.)
- [3] Kirillov I.I. Teoriya turbomashin. [Theory of turbomachinery]. Leningrad: Mashinostroyeniye, 1972. 533 p. (rus.)
- [4] Alekseyev O.N., Kirillov A.I., Lapshin K.L., Chernikov V.A. Issledovaniya turbinnnykh stupeney s navalom soplovykh lopatok [The research of turbine stages with the bulk of the nozzle vanes]. *Trudy LPI*. 1969. № 310. P. 35–40. (rus.)
- [5] Kirillov I.I., Agafonov B.N., Afanasyeva N.N., Kirillov A.I., Proskuryakov G.V., Chernikov V.A., Shvartsman O.A. Issledovaniye i otrabotka stupeney dlya vysokotemperaturnykh gazovykh turbin. [The research and treatment stages for high temperature gas turbines]. *Teploenergetika*. 1983. №3. S. 50–55. (rus.)
- [6] Lapshin K.L. Kompyuternaya optimizatsiya parovykh i gazovykh turbin [Computer optimization of steam and gas turbines]: Monografiya / SPb.: Izd-vo Polotehnich. un-ta, 2018. 200 s. [Elektronnyy resurs]. URL: <http://elibr.spbstu.ru/dl/2/s18-1.pdf>, <http://doi.org/10.18720/SPBPU/2/s18-1> (rus.)
- [7] Lapshin K.L. Optimizatsiya protochnykh chastey parovykh i gazovykh turbin [Optimization of flow parts of steam and gas turbines]: Monografiya / SPb.: Izd-vo Polotehnich. un-ta, 2013. 198 s. [Elektronnyy resurs]. URL: <http://dl.unilib.neva.ru/dl/2/3476.pdf> (rus.)
- [8] Lapshin K.L. Razvitiye odnomernoy teorii osevykh teplovykh turbomashin [Development of the one-dimensional theory of axial thermal turbines]. SPb.: Izd-vo Polotehnich. un-ta, 2018. 50 s. (rus.)
- [9] Lapshin K.L. Optimizatsiya protochnykh chastey parovykh turbin s primeneniyem «integralnykh» soplovykh lopatok [Optimization of flow parts of steam turbines using «integrated» nozzle vanes]. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU*. 2013. № 1 (166). P. 61–66. (rus.)
- [10] Lapshin K.L., Fomin V.S., Avrutov Ye.A., Kirillov V.I. Vliyaniye tangentsialnogo naklona napravlyayushchikh lopatok na strukturu potoka i kharakteristiki osevoy turbinnnoy stupeni [The influence of the tangential inclination of the guide vanes on the structure of flow and the characteristics of axial turbine stages]. *Izvestiya vuzov. Energetika*. 1985. № 7. S. 76–80. (rus.)
- [11] Smirnov Ye.M., Kirillov A.I., Ris V.V. Opyt chislennogo analiza prostranstvennykh turbulentnykh techeniy v turbomashinakh [Experience of numerical analysis of spatial turbulent flows in turbomachines]. *St. Petersburg state politechnical universiti journal*. 2004. № 1. P. 56–70. (rus.)
- [12] Kirillov A.I., Ris V.V., Smirnov Ye.M. Opyt resheniya metodicheskikh i prakticheskikh zadach chislennogo modelirovaniya techeniy i teploobmena v turbomashinakh [Experience of solving methodological and practical problems of numerical simulation of flows and heat exchange in turbomachines]. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal. Prilozheniye «Metody sovershenstvovaniya energeticheskikh ustanovok»* [Application «Methods of improving power plants»]. 2004. № 10. S. 13–19/(rus.)
- [13] Yepifanov A.A., Kirillov A.I., Rassokhin V.A. Raschet trekhmernogo techeniya v stupenyakh maloraskhodnykh turbin [Calculation of three-dimensional flow in turbine stages of economical]. *St. Petersburg state politechnical universiti journal. Science and education*. 2012. № 1 (142). P. 65–70. (rus.)
- [14] Lapshin K.L. Teoriya optimalnogo proyektirovaniya teplovykh turbomashin [Theory of optimal designs of thermal turbomachinery]. [Elektronnyy resurs]. SPb.: Izd-vo Polotehnich. un-ta, 2017. 136 s. URL: <http://doi.org/10.18720/SPBPU/2s17-205> (rus.)
- [15] Nguyen A.K., Lapshin K.L. Kharakteristiki i struktura potoka turbinnnoy stupeni s otritsatelnyim gradiyentom stepeni reaktivnosti [Characteristics and structure of the flow in a turbine stage with a negative gradient of the degree of reactivity]. *St. Petersburg state politechnical universiti journal*. 2016. № 2 (243). S. 163–173. (rus.)

## THE AUTHORS

NGUYEN An Q. — Peter the Great St. Petersburg polytechnic university

E-mail: [anquang12a1@mail.ru](mailto:anquang12a1@mail.ru)

LAPSHIN Kirill L. — Peter the Great St. Petersburg polytechnic university

E-mail: [kirill.lapshin@gmail.com](mailto:kirill.lapshin@gmail.com)

Received: 10.09.2018