

DOI: 10.18721/JEST.230406.

УДК 621.165.001.2: 621.438.001.2

*А. К. Нгуен, К. Л. Лапшин*

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

## **ВЛИЯНИЕ ТАНГЕНЦИАЛЬНОГО НАКЛОНА РАБОЧИХ ЛОПАТОК НА ПОТЕРИ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ОСЕВОЙ ТУРБИННОЙ СТУПЕНИ**

Исследовано влияние тангенциального наклона рабочих лопаток на характеристики, структуру потока и потери кинетической энергии в осевой турбинной ступени. Выбраны расчетные модели ступеней с тангенциальным наклоном рабочих лопаток и для них выполнены 3D газодинамические расчеты в программном комплексе ANSYS CFX. Представлены графики изменения КПД, степени реактивности и коэффициента суммарных потерь кинетической энергии на переменных по частоте вращения ротора режимах, распределения параметров потока (выходная скорость из ступени и коэффициенты потерь кинетической энергии в направляющем аппарате и рабочем колесе) по высоте лопатки. Выполнено сравнение результатов расчета для ступеней с различным тангенциальным наклоном рабочих лопаток. Дано заключение о влиянии тангенциального наклона рабочих лопаток на характеристики, структуру потока и потери кинетической энергии и о его рациональном применении в осевых турбинных ступенях.

ТУРБИННАЯ СТУПЕНЬ; ТАНГЕНЦИАЛЬНЫЙ НАКЛОН РАБОЧИХ ЛОПАТОК; ПОТЕРИ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ; СТЕПЕНЬ РЕАКТИВНОСТИ; ANSYS CFX.

*Ссылка при цитировании:*

А. К. Нгуен, К. Л. Лапшин. 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: 10.10871/JEST.230406.

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

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

## **THE INFLUENCE OF TANGENTIAL INCLINATION OF ROTOR BLADES ON KINETIC ENERGY LOSSES IN AN AXIAL TURBINE STAGE**

The influence of tangential inclination of rotor blades on the characteristics, flow structure and kinetic energy losses in an axial turbine stage were explored. Calculation models of the stages with tangential inclination of the rotor blades were constructed and 3D-testing gas-dynamic calculations were performed in ANSYS CFX. The graphs of the efficiency index, the degree of reactivity and the coefficient of the total kinetic energy losses at variable rotor frequency were presented. The distributions of the flow parameters (output speed from the turbine stage and the coefficient of kinetic energy losses for the guide vanes and the impellers) were given by the height of the blade. The calculation results between turbine stages with different tangential inclination of the rotor blades were compared. The conclusion about the influences of tangential inclination of the rotor blades and the rational application on the characteristics, flow structure and kinetic energy losses of the axial turbine stages was given.

TURBINE STAGE; TANGENTIAL INCLINATION OF THE ROTOR BLADES; KINETIC ENERGY LOSSES; DEGREE OF REACTIVITY; ANSYS CFX.

## Citation:

A. Q. Nguyen, K. L. Lapshin. The influences of tangential inclination of the rotor blades on the losses of kinetic energy in the axial turbine stage, *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university journal of engineering sciences and technology*, 23(04)(2017)66–73, DOI: 10.10871/JEST.230406.

## Введение

Как известно, тангенциальный наклон направляющих лопаток (ТНЛ) дает возможность эффективно снизить градиент степени реактивности в осевой турбинной ступени [1–9, 15]. Так, например, в [15] представлено сравнение результатов 3D проверочного расчета с помощью аэродинамического пакета ANSYS CFX с экспериментами, полученными на воздушной турбине в лаборатории аэродинамики кафедры турбиностроения Ленинградского политехнического института [1]. В расчетах и опытах исследовалось влияние ТНЛ на характеристики, структуру потока и потери кинетической энергии осевой турбинной ступени с отрицательным градиентом степени реактивности. Положительный опыт сравнения 3D расчетов с экспериментами [15] показал, что программу ANSYS CFX можно рассматривать в качестве виртуального стенда и применять её для исследования характеристик и структуры потока дозвуковых осевых турбинных ступеней.

Тангенциальный наклон рабочих лопаток (ТНРЛ) по соображениям прочности применяется гораздо реже, в основном с целью компенсации изгибных напряжений, действующих на РЛ со стороны потока пара (или газа). Влияние ТНРЛ на характеристики, структуру потока и потери кинетической энергии осевой турбинной ступени практически не изучалось [16], и поэтому его исследование представляется актуальным.

## Цели работы

Цель работы состоит в том, чтобы с помощью аэродинамического пакета ANSYS CFX в качестве виртуального стенда исследовать влияние ТНРЛ на характеристики, структуру потока и потери кинетической энергии в осевой турбинной ступени. По результатам выполненных исследований планируется сформулировать выводы по рациональному применению ТНРЛ в осевой турбинной ступени.

## Постановка задачи исследований

Геометрические параметры исходной ступени взяты из книги [1]. Четыре варианта ступени (рис. 1) средней веерности  $\left(\frac{d_{2c}}{l_2} = 6,34\right)$

имеют одинаковый направляющий аппарат. Угол  $\alpha_{1\text{эф}}$  постоянен вдоль радиуса и равен  $18^\circ 10'$ . Линии центров масс направляющих лопаток ориентированы по радиусу. Рабочие лопатки не закручены, имеют постоянные профили и применены в разных вариантах (рис. 1)

*Вариант I (исходный):* линия центров масс РЛ ориентирована по радиусу.

*Вариант II:* угол наклона РЛ на среднем радиусе (угол между осью  $r$  и линией центра масс РЛ в плоскости  $r-u$ ) равен  $10$  градусам.

*Вариант III:* угол наклона РЛ на среднем радиусе (угол между осью  $r$  и линией центра масс РЛ в плоскости  $r-u$ ) равен  $-10$  градусам.

*Вариант IV:* угол наклона РЛ на среднем радиусе (угол между осью  $r$  и линией центра масс РЛ в плоскости  $r-u$ ) равен  $-10$  градусам; и линия центра масс на обводах проточной части в корневой и периферийной областях касается направлений радиусов.

Остальные геометрические характеристики ступеней следующие:

Радиус корневого сечения $R_1'$	159,1 мм
Длина НЛ $l_1$	58,2 мм
Хорда НЛ $b_1$	16,5 мм
Шаг НЛ $t_{1c}$	11,86 мм
Число НЛ $m_1$	100 шт.
Длина РЛ $l_2$	59,55 мм
Хорда РЛ $b_{2c}$	27,85 мм
Шаг РЛ $t_{2c}$	17,45 мм
Число РЛ $m_2$	68 шт.
Осевой зазор между НЛ и РЛ $\Delta z_1$	8 мм

Выполнялись 3D газодинамические расчеты с учетом рекомендаций, представленных в статьях [11–13]. Для упрощения решения задачи исследовались осевые турбинные ступени без радиального зазора над РК. Построение расчетных моделей выполнено с помощью программ, входящих в пакет ANSYS: Bladgen, TurboGrid и CFX (Turbomachine). Расчетные модели являются

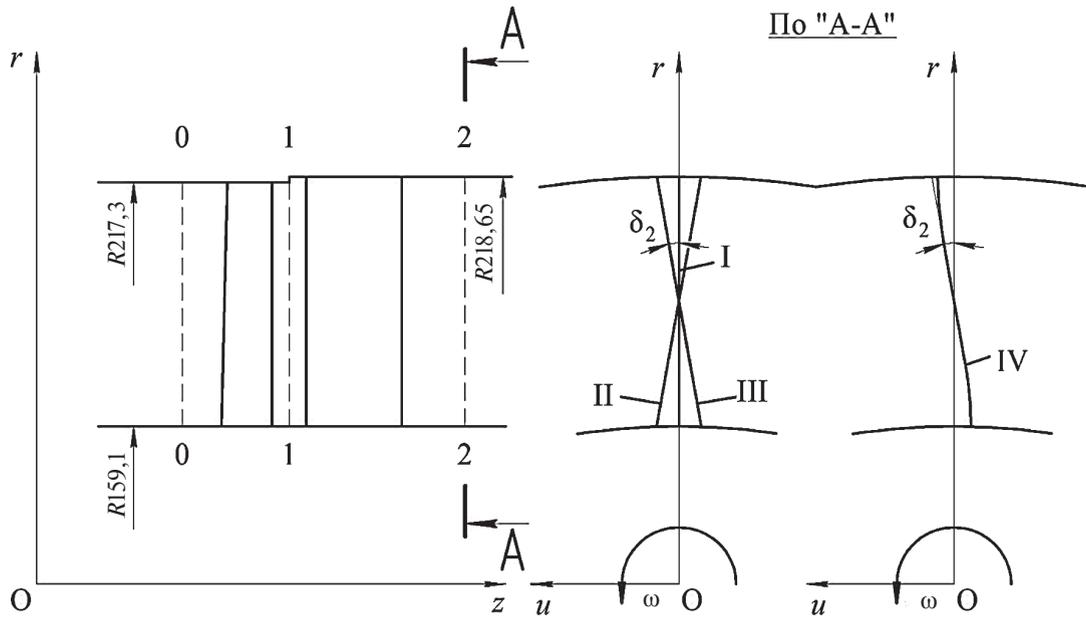


Рис. 1. Схема осевых турбинных ступеней с различными вариантами установки рабочих лопаток  
 Fig. 1. Scheme of axial turbine stages with variants of installation of rotor blades

секторами проточной части, состоящими из трех каналов НЛ и двух каналов РЛ. Вблизи поверхностей, обтекаемых потоком, обеспечено сгущение сетки, что необходимо для корректного расчёта параметров потока в пограничном слое. Диапазон частоты вращения ротора соответствует диапазону изменения параметра  $\frac{u}{C_0}$

от 0,46 до 0,62. Граничные условия следующие:

- Давление торможения потока на входе в ступени  $P_0^* \dots \dots \dots 0,137$  МПа
- Температура торможения потока на входе в ступени  $T_0^* \dots \dots \dots 368$  К
- Давление в потоке на выходе из ступеней  $P_2 \dots \dots \dots 0,103298$  МПа
- Рабочее тело  $\dots \dots \dots$  Air Ideal Gas
- Модель турбулентности  $\dots \dots \dots k-\epsilon$
- Постановка задачи  $\dots \dots \dots$  Stage

При исследовании вариантов турбинных ступеней с помощью аэродинамического пакета ANSYS CFX использован способ решения Stage (стационарная задача), при котором на поверхности сопряжения между направляющим аппаратом и рабочим колесом выполняется осреднение параметров потока в окружном направлении. Применение Stage оправдано тем, что поток газа во всей области течения — дозвуковой, количество НЛ велико, осевой за-

зор между НЛ и РЛ также достаточно велик, поэтому степень неравномерности потока перед рабочими лопатками, вычисленная по известной формуле Г. Ю. Степанова, составляет примерно всего 3%.

### Результаты расчетов

После решения стационарной задачи с помощью аэродинамического пакета ANSYS CFX все полученные в 3D расчётах параметры газа усреднены в контрольных сечениях 0–0, 1–1 и 2–2 (см. рис. 1) по расходу. Затем определялись зависимости окружного КПД, степеней реактивности у корня  $\rho_T'$  и у периферии  $\rho_T''$  и потерь кинетической энергии  $\zeta_1$  в направляющем аппарате и  $\zeta_2$  в рабочем колесе исследуемых вариантов осевых турбинных ступеней с ТНРЛ от различных значений параметра  $\frac{u}{C_0}$ . Для вы-

числения указанных величин использовались стандартные формулы, представленные, например, в [1].

Вычислялись также:

коэффициент потерь кинетической энергии для направляющего аппарата относительно располагаемого изэнтропийного перепада энтальпий ступени  $H_0$

$$\zeta_{\text{НА}} = \frac{C_{1t}^2 - C_1^2}{2H_0}; \quad (1)$$

коэффициент потерь кинетической энергии для рабочего колеса относительно располагаемого изоэнтропийного перепада энтальпий ступени  $H_0$

$$\zeta_{\text{РК}} = \frac{W_{2t}^2 - W_2^2}{2H_0}; \quad (2)$$

коэффициент потерь кинетической энергии с выходной скоростью относительно располагаемого изоэнтропийного перепада энтальпий ступени  $H_0$

$$\zeta_{\text{ВС}} = \frac{C_2^2}{2H_0}; \quad (3)$$

коэффициент суммарных потерь кинетической энергии относительно располагаемого изоэнтропийного перепада энтальпий ступени  $H_0$

$$\zeta_{\Sigma} = \zeta_{\text{НА}} + \zeta_{\text{РК}} + \zeta_{\text{ВС}}. \quad (4)$$

Полученные зависимости КПД, степеней реактивности у корня и у периферии, а также коэффициента суммарных потерь кинетической энергии от параметра  $\frac{u}{C_0}$  представлены на рис. 2–5.

На рис. 2 показаны зависимости КПД исследуемых ступеней от параметра  $\frac{u}{C_0}$ . Видно, что при наличии как отрицательного, так и положительного угла наклона рабочих лопаток КПД исследуемых ступеней заметно уменьшается. Вариант I имеет наибольший КПД при значении  $\left(\frac{u}{C_0}\right)_{\text{opt}} = 0,58$ , а вариант III — наи-

меньший КПД при значении  $\left(\frac{u}{C_0}\right)_{\text{opt}} = 0,54$  (см. рис. 5). Что важно, КПД варианта IV на 0,35% больше КПД варианта III на оптимальном режиме [10]. Это обусловлено уменьшением коэффициента суммарных потерь кинетической энергии ступени варианта IV по сравнению с вариантом III (рис. 5), так как у корня и на периферии рабочая лопатка варианта IV приближается по свойствам к рабочей лопатке варианта I.

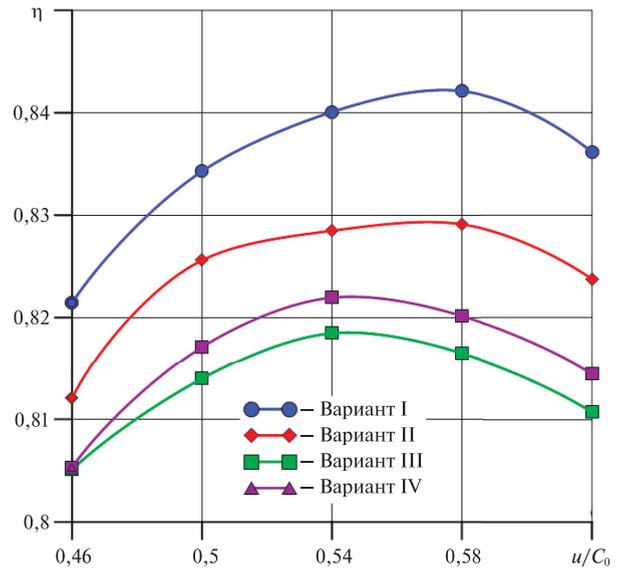


Рис. 2. Зависимости КПД от параметра  $\frac{u}{C_0}$

Fig. 2. Dependences of the efficiency on the parameter  $\frac{u}{C_0}$

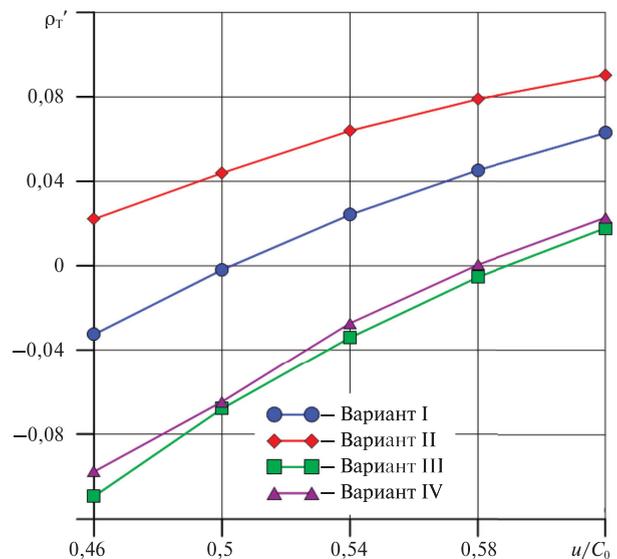


Рис. 3. Зависимости степеней реактивности  $\rho_r'$  у корня от параметра  $\frac{u}{C_0}$

Fig. 3. Dependences of the degree of reactivity  $\rho_r'$  on the parameter  $\frac{u}{C_0}$

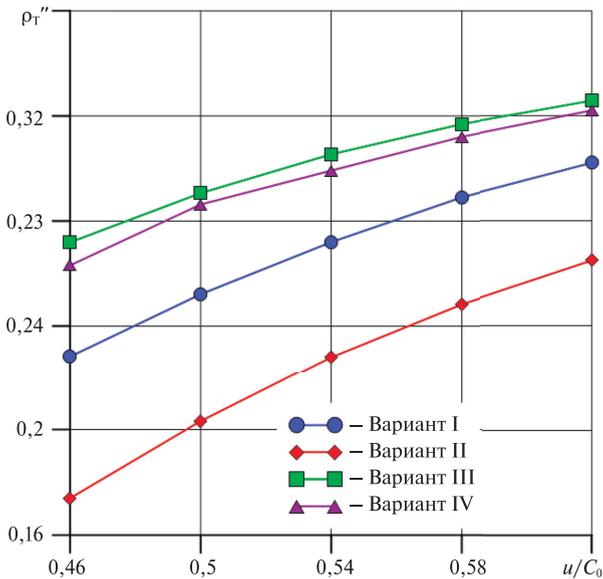


Рис. 4. Зависимости степеней реактивности  $\rho_T''$  у периферии от параметра  $\frac{u}{C_0}$

Fig. 4. Dependences of the degree of reactivity  $\rho_T''$  on the parameter  $\frac{u}{C_0}$

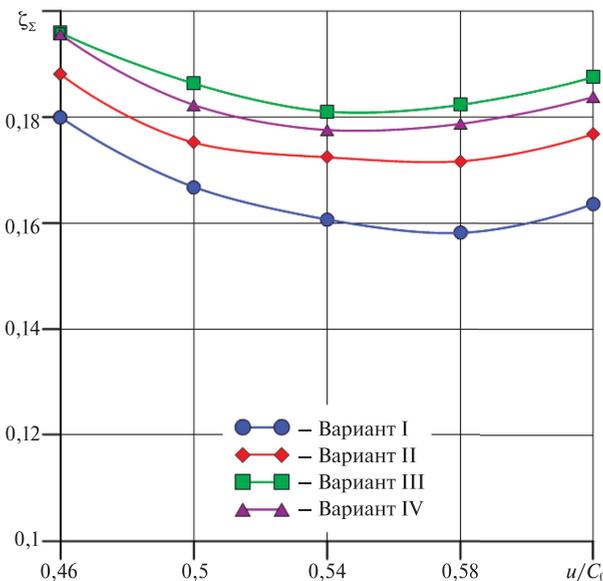


Рис. 5. Зависимости коэффициентов суммарных потерь кинетической энергии  $\zeta_\Sigma$  от параметра  $\frac{u}{C_0}$

Fig. 5. Dependences of coefficients of total losses of kinetic energy  $\zeta_\Sigma$  on the parameter  $\frac{u}{C_0}$

На рис. 3 и 4 показаны зависимости степеней реактивности исследуемых ступеней  $\rho_T'$  у корня и  $\rho_T''$  у периферии от параметра  $\frac{u}{C_0}$ . При

положительном угле наклона рабочих лопаток (вариант II) степень реактивности у корня ступени увеличивается, а у периферии уменьшается, то есть уменьшается градиент степени реактивности по сравнению с исходным вариантом I. Наоборот, при отрицательном угле наклона рабочих лопаток (варианты III и IV) степень реактивности у корня уменьшается и увеличивается у периферии, то есть градиент степени реактивности увеличивается. Таким образом, тангенциальный наклон рабочих лопаток, как и тангенциальный наклон направляющих лопаток, является средством управления градиентом степени реактивности в осевой турбинной ступени.

Далее для более детального исследования влияния ТНРЛ на потери кинетической энергии в осевой турбинной ступени были рассмотрены графики изменения коэффициентов потерь кинетической энергии в направляющем аппарате и в рабочем колесе, а также выходной скорости по высоте проточной части на оптимальных режимах, на которых ступени достигают максимальных КПД. Соответствующие кривые для выходной скорости и коэффициентов потерь кинетической энергии в направляющем аппарате и в рабочем колесе представлены на рис. 6–8.

Следует подчеркнуть, что рабочие лопатки во всех вариантах ступеней не закручены. Поэтому даже в исходном варианте I на оптимальном режиме перед рабочими лопатками, в корневой зоне, неизбежно появятся положительные, а в периферийной зоне отрицательные углы атаки [14]. Эффективный угол  $\beta_{2\text{эф}}$  в рабочих решетках нарастает вдоль радиуса, что приводит к увеличению выходной скорости  $c_2$  вдоль радиуса для всех исследованных вариантов (рис. 6).

Коэффициенты потерь кинетической энергии  $\zeta_1$  для этих вариантов несколько возрастают по сравнению с исходным вариантом I (рис. 7).

Понижение степени реактивности  $\rho_T'$  у корня в вариантах III и IV увеличивает положительные углы атаки, вследствие чего коэффициенты потерь кинетической энергии  $\zeta_2$  увеличиваются в этой зоне по сравнению с вариантами I и II (рис. 8).

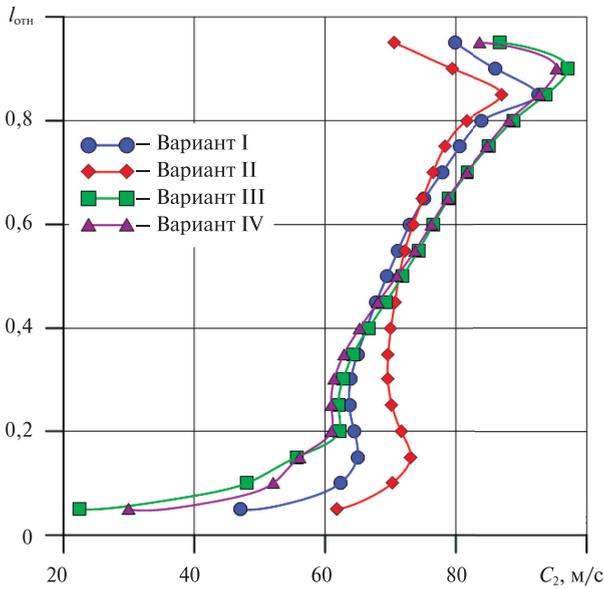


Рис. 6. Распределение выходной скорости по высоте лопатки  
 Fig. 6. Distribution of the speed output by the height of the blades

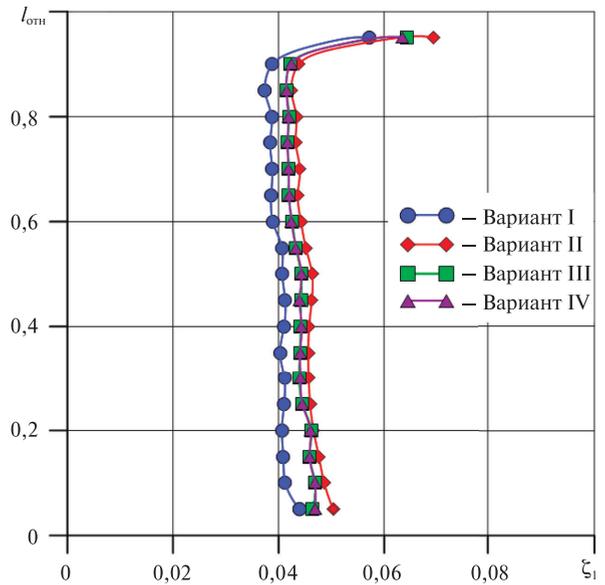


Рис. 7. Распределение коэффициента потерь кинетической энергии для направляющего аппарата по высоте лопатки  
 Fig. 7. Distribution of the coefficient of losses of kinetic energy for the guide vanes by the height of the blades

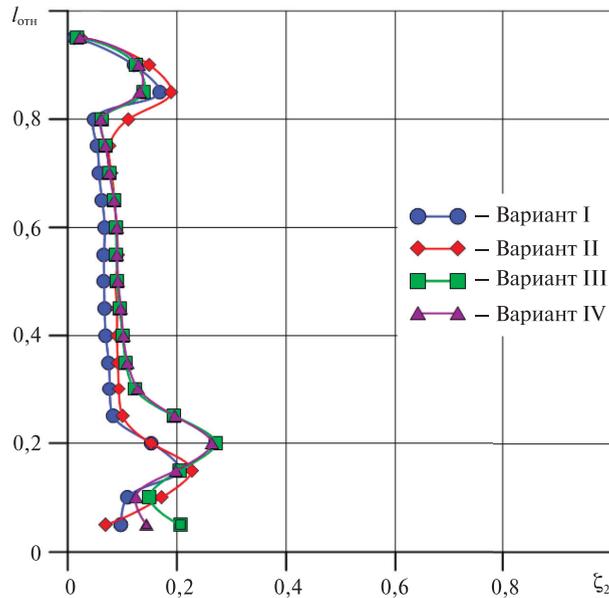


Рис. 8. Распределение коэффициента потерь кинетической энергии для рабочего колеса по высоте лопатки  
 Fig. 8. Distribution of the coefficient of losses of kinetic energy for the impellers by the height of the blades

Коэффициенты потерь кинетической энергии  $\zeta_2$  вариантов III и IV почти совпадают по высоте лопатки, но у корня и на периферии для варианта IV они немного меньше, чем для варианта III. Это различие объясняется тем, что в варианте IV на цилиндрических поверхностях тока сохраняются профили рабочих лопаток варианта III в срединной части, но меняются профили рабочих лопаток в корневой и периферийной областях, которые по конфигурации приближаются к варианту I. В итоге вариант IV развивает более высокий КПД, чем вариант III (см. рис. 2). По аналогии с «интегральными» сопловыми лопатками [9] назовём IV вариантом с «интегральными» рабочими лопатками.

## Выводы

Влияние даже небольшого ТНРЛ на характеристики, структуру потока и потери кинетической энергии осевой турбинной ступени довольно существенно как при положительных углах наклона рабочих лопаток, так и, особенно, при отрицательных углах наклона рабочих лопаток.

С целью компенсации изгибных напряжений, действующих на рабочие лопатки со стороны газа, по соображениям экономичности рационально применять «интегральные» рабочие лопатки.

## 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., ил.
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 обработка ступеней для высокотемпературных газовых турбин // Теплоэнергетика, 1983. № 3. С. 50–55.
6. Лапшин, К. Л. Оптимизация проточных частей осевых тепловых турбин: энциклопедия. М.: Машиностроение, 2015. Т. 4–19, глава 1.4. С. 49–75.
7. Топунов А. М., Тихомиров В. А. Управление потоком в тепловых турбинах. Л., 1979. 151 с.
8. Лапшин К. Л. Оптимизация проточных частей паровых и газовых турбин. СПб., СПбГПУ, 2013. [Эл. ресурс] < URL: <http://dl.unilib.neva.ru/dl/2/3476.pdf> >
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. Осипов А. В., Анисин А. К. Теория и расчет одноступенчатой газовой турбины / Брянск, БГТУ, 2013. 73 с.
11. Смирнов Е. М., Кириллов А. И., Рис В. В. Опыт численного анализа пространственных турбулентных течений в турбомашине // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2004. № 1(35). 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 турбомашине // Справочник. Инженерный журнал. Приложение: «Методы совершенствования энергетических установок». М.: Машиностроение. 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. Основы теории осевых тепловых турбомашин. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2016. 103 с.
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. DOI: 10.5962/JEST.243.7.
16. Нгуен Ан Куанг, Лапшин К. Л. Влияние тангенциального наклона рабочих лопаток на характеристики осевой турбинной ступени // Неделя науки СПбПУ. Материалы научной конференции с международным участием. 14–19 ноября 2016 года. Лучшие доклады. С. 12–15.

## 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

## REFERENCES

- [1] Afasnasyeva N.N., Busurin V.N., Gogolev I.G., Dyakonov R.I. Aerodinamicheskiye kharakteristiki stupeny teplovykh turbin [Aerodynamic characteristics of thermal turbines stages] / Pod obshch. red. V.A. Chernikova. Leningrad: Mashinostroyeniye, Leningr. otd-niye, 1980. 263 p., il. (rus)
- [2] Kirillov I.I., Kirillov A.I. Teoriya turbomashin. Primery i zadachi. [Theory of turbomachinery. Examples and exercises. Textbook for universities]. Leningrad: Mashinostroyeniye (Leningrad. otd-niye), 1974. 320 s. (rus)
- [3] Kirillov I.I. Teoriya turbomashin. [Theory of turbomachinery]. Leningrad: Mashinostroyeniye, 1972. 533 s. (rus)
- [4] Alekseyev O.N., Kirillov A.I., Lapshin K.L., Chernikov V.A. Issledovaniya turbinnyykh stupeny s navalom soplovykh lopatok [The research of turbine stages with the bulk of the nozzle vanes]. *Trudy LPI*. Leningrad. 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 stupeny dlya vysokotemperaturnyykh gazovykh turbin. [The research and treatment stages for high temperature gas turbines]. *Teploenergetika*. 1983. № 3. S. 50–55. (rus)
- [6] Lapshin, K.L. Optimizatsiya protochnyykh chastey osevykh teplovykh turbin [Optimization of flow parts of axial thermal turbines]: entsiklopediya. M.: Mashinostroyeniye, 2015. T. 4–19, glava 1.4. S. 49–75. (rus)
- [7] Topunov A.M., Tikhomirov V.A. Upravleniye potokom v teplovykh turbinakh. [Flow control in thermal turbines]. Leningrad, 1979. 151 s. (rus)
- [8] Lapshin K.L. Optimizatsiya protochnyykh chastey parovykh i gazovykh turbin [Optimization of flow parts of steam and gas turbines] / SPb., SPbGPU, 2013. [El. resurs] (rus) URL: <http://dl.unilib.neva.ru/dl/2/3476.pdf>
- [9] Lapshin K.L. Optimizatsiya protochnyykh chastey parovykh turbin s primeneniyyem «integralnykh» soplovykh lopatok [Optimization of flow parts of steam turbines using “integrated” nozzle vanes]. *NTV SPbGPU*. 2013. № 1(166). S. 61–66. (rus)
- [10] Osipov, A.V., Anisin, A.K. Teoriya i raschet odnotupenchatoy gazovoy turbiny [Theory and calculation of one-stage gas turbines] / Bryansk, BGTU, 2013. 73 s. (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(35). S. 56–70. (rus)
- [12] Kirillov A.I., Ris V.V., Smirnov Ye.M. Opyt resheniya metodicheskikh i prakticheskikh zadach chislennogo modelirovaniya techeniy i teplotobmena 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”]. Moscow: Machine building Publ, 2004. № 10. S. 13–19. (rus)
- [13] Yepifanov A.A., Kirillov A.I., Rassokhin V.A. Raschet trekhmernogo techeniya v stupenyakh maloraskhodnykh turbin. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Nauka i obrazovaniye*. 2012. № (142)1. S. 65–70. (rus)
- [14] Lapshin K.L. Osnovy teorii osevykh teplovykh turbomashin [Basics of theory of axial thermal turbines]. SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2016. 103 s. (rus)
- [15] Nguyen A. K., Lapshin K. L. Kharakteristiki i struktura potoka turbinnoy stupeni s otritsatelnyy gradientom 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(246). S. 163–173. (rus), DOI: 10.5962/JEST.243.7
- [16] Nguyen An Kuang, Lapshin K. L. Vliyaniye tangentsialnogo naklona rabochikh lopatok na kharakteristiki osevoy turbinnoy stupeni [The influences tangential inclination of the rotor blades on the characteristic of the axial turbine stage]. *Nedelya nauki SPbPU. Materialy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem. 14–19 noyabrya 2016 goda. Luchshiy doklady*. [Week of sciences SPbPU. Materials of the scientific conference with international participation. November 14–19, 2016. The best reports] S.12–15. (rus)

## AUTHORS

NGUYEN An Quang — 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

Дата поступления статьи в редакцию: 27 июня 2017 г.