

УДК 621.165.51

Разработка методики расчета паровой турбины средней мощности для АЭС с использованием CFD-кода в программном комплексе NUMECA*

Д.А. Трохин¹, В.А. Зарянкин², А.А. Волженцов³

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»

² Опытное-конструкторское бюро имени А. Люльки — филиал ПАО «ОДК-Уфимское моторостроительное производственное объединение»

³ ПАО «Калужский турбинный завод»

Development of a method for calculating medium-power steam turbines for nuclear power plants using CFD code in the NUMECA software package

D.A. Trokhin¹, V.A. Zaryankin², A.A. Volzentsov³

¹ National Research University Moscow Power Engineering Institute

² Experimental design bureau named after A. Lyulka subsidiary of PJSC UEC-Ufa engine industrial association

³ PJSC Kaluga Turbine Works

Современные атомные электростанции играют основную роль в обеспечении энергетической безопасности. Для повышения их эффективности необходимы инновационные подходы к проектированию и эксплуатации таких основных компонентов, как паровые турбины. Предложена усовершенствованная методика расчета паровой турбины средней мощности для атомной электростанции, основанная на применении инструментов численного моделирования потоков жидкости и газа. С помощью программного комплекса NUMECA и специализированных модулей FINE/Turbo, Autogrid 5 и Autoblade построена геометрическая модель проточной части паровой турбины средней мощности. По уточненной методике расчета паровой турбины проведены контрольные вычисления проточной части паровой турбины средней мощности ТК-35/38-3,4 производства Калужского турбинного завода для атомных теплоэлектроцентралей в конденсационном и теплофикационном режимах работы при оптимальном выборе модели турбулентности. Разработанную методику расчета можно применять на этапах проектирования и модернизации проточной части паровых турбин малой и средней мощности, используемых на атомных теплоэлектроцентралях. Предложенные технические решения значительно упрощают трудозатраты специалистов в области турбостроения по сравнению с таковыми при традиционных методах проектирования.

EDN: FBTSNI, <https://elibrary/fbtsni>

Ключевые слова: паровая турбина, проточная часть, влажность пара, CFD-код, программный комплекс NUMECA, АЭС

Modern nuclear power plants play a key role in ensuring energy security. However, innovative approaches to the design and operation of key components, such as steam turbines, are

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта государственного задания № FSWF-2026-0004.

needed to improve their efficiency. The purpose of this article is to justify an improved method for calculating a medium-power steam turbine for a nuclear power plant based on the use of numerical simulation tools for fluid and gas flows. During the study, a geometric model of the flow part of a medium-power steam turbine was constructed using the NUMECA software package and specialised modules FINE/Turbo, Autogrid 5 and Autoblade. Using the refined steam turbine calculation method, control calculations were performed for flow section of a medium-capacity steam turbine manufactured by the Kaluga Turbine Plant for the Kaluga Nuclear Power Plant — TK-35/38-3.4 at different operating modes (condensation and heat supply) with the optimal choice of turbulence model. The developed calculation method can be applied at the design and modernisation stages of the flow part of low- and medium-power steam turbines used at nuclear combined heat and power plants. The formulated proposals significantly simplify the labour costs of specialists in the field of turbine construction, compared to traditional design methods.

EDN: FBTSNI, <https://elibrary/fbtsni>

Keywords: steam turbine, flow path, steam humidity, CFD code, NUMECA software, NPP

Метод сглаженных частиц, вычислительная гидродинамика (Computational Fluid Dynamics — CFD), метод конечных разностей и другие традиционные методы расчета течения потоков жидкости и газа позволяют моделировать сложные процессы (включая турбулентность и теплопередачу) с учетом взаимодействия потоков и трехмерных эффектов [1]. Программный комплекс (ПК) NUMECA предоставляет инженерам возможность более точно анализировать поведение потоков в турбинах и предсказывать их характеристики. Это значительно повышает точность расчета и снижает необходимость в дорогостоящих экспериментальных исследованиях, заменяя их виртуальными испытаниями [2]. Примеры успешных проектов в энергетическом машиностроении подтверждают эффективность CFD-технологий, применяемых для проектирования и оптимизации турбомашин [3–5].

Ошибки, возникающие при использовании традиционных методов, могут достигать 5 % при расчете коэффициента полезного действия турбины [6], что негативно сказывается на ее проектировании. Например, метод конечных объемов, применяемый в упрощенной форме, не учитывает трехмерные эффекты, влияющие на распределение давления и температуры рабочей среды, что критично для точного анализа работы турбины [7, 8]. В этом контексте важно определить влияние расположения и формы сепарационных щелей на поверхности профиля на эффективность влагоудаления с учетом влажности и скорости течения основного потока. Как отмечает В.В. Попов [9], учет этих факторов может значительно повысить точность расчета и, соот-

ветственно, эффективность проектируемой турбины.

Низкая точность расчета традиционными методами вынуждает проектировщиков проводить дополнительные корректировки, что увеличивает как время, так и затраты на разработку. Ошибки в оценке нагрузок на компоненты турбины могут привести к недооценке или переоценке, что снижает надежность и повышает риск отказов. Известны случаи, когда неточный расчет нагрузок привел к разрушению лопаток турбины на одной из атомных электростанций (АЭС), что вызвало значительные финансовые потери. Этот инцидент подчеркивает необходимость повышения точности расчета для обеспечения безопасности и экономической эффективности эксплуатации турбины.

Для усовершенствования методики расчета паровой турбины средней мощности АЭС представляется целесообразным использовать инструменты численного моделирования течения потоков жидкости и газа.

Цель статьи — разработка научно-технических решений по оценке технико-экономических показателей паровой турбины с допустимым вариантом проточной части в ПК NUMECA с использованием CFD-кода.

Численное моделирование течения жидких и газообразных сред в ПК NUMECA, содержащего специализированные модули FINE/Turbo, Autogrid 5 и Autoblade, позволяет учитывать такие сложные физические процессы, как влажность пара, кавитация и потери на последних ступенях, что является труднодостижимым при использовании традиционных методов.

Исследование включало в себя построение геометрической модели проточной части паро-

вой турбины средней мощности, генерацию расчетной сетки, постановку граничных условий, выбор моделей турбулентности и расчет с помощью решателя на основе уравнений Навье — Стокса.

Результаты. Предлагаемая методика расчета проточной части паровой турбины с использованием CFD-кода включает в себя следующие этапы:

1) построение геометрической модели проточной части паровой турбины средней мощности, точно отражающей ее конструктивные особенности с помощью модуля FINE/Turbo, обеспечивающего высокую точность геометрического представления;

2) генерация расчетной сетки, которая должна быть достаточно детализированной для корректного моделирования потоков;

3) постановка граничных условий, определяющих параметры входных и выходных потоков, а также условия на стенках турбины; расчет процессов тепло- и массообмена, происходящих в турбине;

4) анализ полученных данных, позволяющий выявить особенности работы турбины и оценить эффективность расчетной методики [10]; верификация методики путем сравнения результатов расчета с экспериментальными данными или эксплуатационными параметрами действующих промышленных образцов [11–14].

Для верификации предлагаемой методики расчета паровой турбины средней мощности использованы эксплуатационные данные турбин, применяемых на АЭС, — температура и давление пара, частота вращения ротора, а также значения коэффициента полезного действия, полученные в лабораторных условиях. Указанные параметры выбраны для анализа, так как они наиболее полно отражают рабочие характеристики турбины и позволяют провести детальную оценку точности расчета, выполненного с использованием CFD-кода в ПК NUMECA. Комплексный подход к анализу данных позволяет более точно оценивать эффективность турбин с учетом всех возможных факторов.

Внедрение CFD-анализа на этапе проектирования позволяет сократить цикл разработки турбин на 20...25 % за счет включения прогноза рассматриваемых решений и оптимизации числа проводимых экспериментов, что делает

процесс более быстрым и экономически выгодным. Это особенно актуально в свете современных требований к скорости и эффективности разработки [15]. Применение CFD-анализа на всех этапах проектирования, а также при модернизации отдельных узлов конструкции турбомашин, ускоряет процесс, обеспечивает конкурентоспособность и устойчивое развитие отрасли.

В качестве объекта исследования выступала одновальная паровая турбина ТК-35/38-3,4 производства ПАО «Калужский турбинный завод», работающая на насыщенном паре. Турбина оснащена двумя нерегулируемыми отборами пара, предназначенными для подогрева питательной воды, а также регулируемым теплофикационным отбором пара, обеспечивающим его подачу для нужд теплоснабжения.

Расчет тепловой схемы пароконденсатного цикла пароэнергетического блока с турбиной ТК-35/38-3,4 проведен в трех режимах: конденсационном (с отсутствием доли расхода пара на сетевые подогреватели), теплофикационном (с максимальным пропуском пара на отпуск теплоты, но с минимально возможным в части низкого давления (ЧНД)); теплофикационном с учетом возникающей в проточной части влажности по методике Поварова — Филиппова. По результатам расчета тепловой схемы в трех режимах работы получены технико-экономические показатели, приведенные в табл. 1, где введены следующие обозначения: p , h и x — давление, энтальпия и степень сухости пара перед отсеком соответственно; H_i — использованный теплоперепад отсека; G — расход пара через отсек; p_k , h_k , v_k и x_k — давление, энтальпия, удельный объем и степень сухости пара на выходе из турбины (в точке K) соответственно.

Результаты расчета тепловой схемы по методике Поварова — Филиппова, стали базовыми при численном моделировании в ПК NUMECA.

Разработка и расчет проточной части паровой турбины выполнены с учетом отдельного проектирования трех камер отбора пара: 1) в части высокого давления (ЧВД) для регенеративного подогрева высокого давления; 2) между ЧВД и ЧНД с теплофикационным отбором; 3) в ЧНД для регенеративного подогрева с учетом низкого давления. Это позволило увеличить сходимость решения с существующим промышленным прототипом.

Таблица 1

**Результаты расчета тепловой схемы
в разных режимах работы паровой турбины**

Параметр	Отсек турбины			
	От входа в турбину до отбора № 1	От отбора № 1 до отбора № 2	От отбора № 2 до отбора № 3	От отбора № 3 до выхода из турбины
В конденсационном режиме				
p , МПа	3,550	1,000	0,453	0,102
h , кДж/кг	2935	2714	2592	2405
H_i , кДж/кг	218	119	178	273
G , кг/с	61,0	57,1	51,6	45,9
x	1,000	0,969	0,928	0,880
p_k , МПа	0,00458			
h_k , кДж/кг	2132			
v_k , м ³ /кг	25,25			
x_k	0,825			
В теплофикационном режиме				
p , МПа	3,440	0,8530	0,3570	0,0740
h , кДж/кг	2939	2695	2563	2373
H_i , кДж/кг	240	126	181	253
G , кг/с	61,0	56,3	41,2	37,3
x	1,000	0,963	0,921	0,873
p_k , МПа	0,00442			
h_k , кДж/кг	2121			
v_k , м ³ /кг	25,99			
x_k	0,820			
В теплофикационном режиме с учетом влажности пара				
p , МПа	3,440	0,854	0,358	0,075
h , кДж/кг	2939	2699	2571	2376
H_i , кДж/кг	236	123	187	256
G , кг/с	61,0	56,3	41,2	37,3
x	1,000	0,965	0,924	0,874
p_k , МПа	0,00436			
h_k , кДж/кг	2108			
v_k , м ³ /кг	25,15			
x_k	0,816			

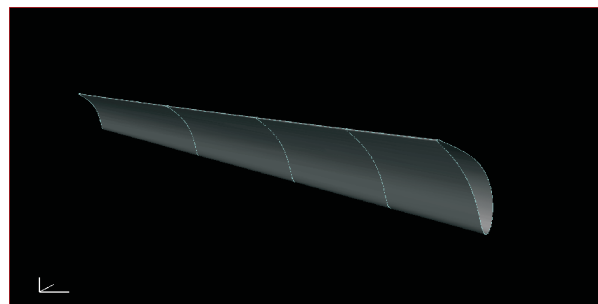


Рис. 1. Модель спрофилированной сопловой лопатки тринадцатой ступени на пяти сечениях

Для профилирования лопаточного аппарата использован модуль Autoblade ПК NUMECA. Для ЧВД (с первой ступени по шестую) выбраны два базовых сечения — у корня и периферии с относительными координатами (0; 1), для ЧНД — три базовых сечения (0; 0,5; 1 — с седьмой по девятую ступень) и пять базовых сечений (0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0 — с десятой по тринадцатую ступень). При профилировании лопаточного аппарата опирались на результаты ранее проведенного расчета аэродинамических параметров по высоте ступени, что послужило основанием для выбора количества сечений (рис. 1).

Для построения сетки и расчетного модуля из полученных 3D-моделей рабочих и сопловых лопаток определялись координаты линии меридиональных обводов для каждой лопатки. При создании внешнего меридионального обвода корневой диаметр первой–десятой ступеней $d_k = 1,050$ м, одиннадцатой, двенадцатой и тринадцатой ступеней $d_k = 1,075; 1,100$ и $1,150$ м соответственно (рис. 2 и 3).

С помощью модуля Autogrid 5 строилась сетка IGG, после чего все ступени турбины объединялись в единую проточную часть. Так как сеточный генератор Autogrid 5 интегрирован с модулем Autoblade, автоматический расчет высот рабочих и сопловых лопаток выполнялся

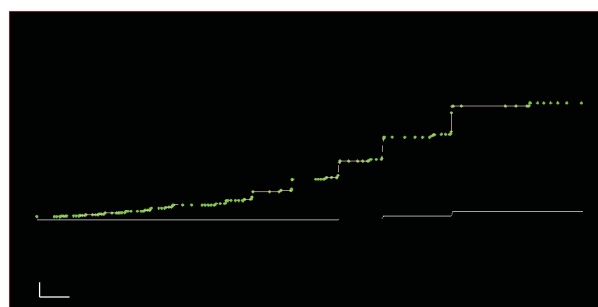


Рис. 2. Модель построения координат точек линии меридионального обвода паровой турбины

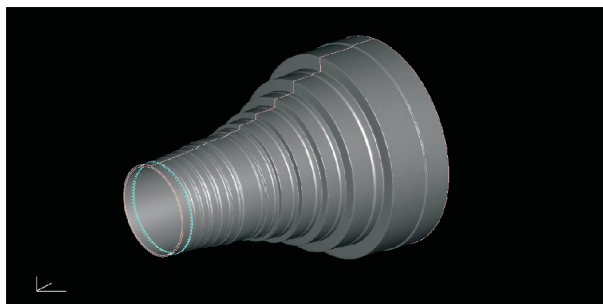


Рис. 3. Трехмерная модель меридионального обвода паровой турбины

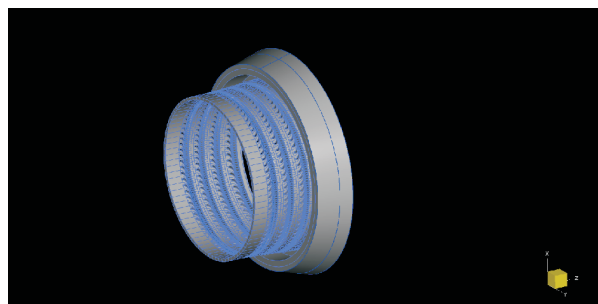


Рис. 4. Трехмерная модель первых четырех ступеней ЧВД с камерой регенеративного подогрева

в соответствии с координатами построенной меридиональной линии [16, 17].

Две камеры отбора пара для регенеративного подогрева и камера теплофикационного отбора создавались непосредственно в модуле Autogrid 5 с помощью инструмента Z-R-effect. Также можно построить камеру отбора с пользовательскими размерами непосредственно в IGG (рис. 4)

Далее в ПК проводилась проверка профилей межлопаточных каналов, геометрических параметров форм и камер отборов пара. В автоматическом режиме формировались сетки, которые впоследствии использовались для расчета обтекания сопловых и рабочих лопаток в проточной части и камерах отбора пара [18]. Предпочтительно, чтобы уровень сетки оставался везде одинаковым (для получения более достоверных результатов). Если проверка показывала положительный результат и не выявляла ошибок, то начинался заключительный (четвертый) этап расчета.

Далее формировалась трехмерная модель, предназначенная для расчета аэродинамических характеристик в трехпозиционном решателе FINE/Turbo Euranus, который использует

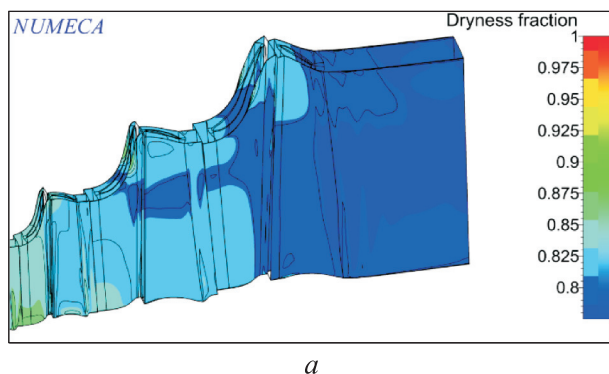
Таблица 2

Граничные условия

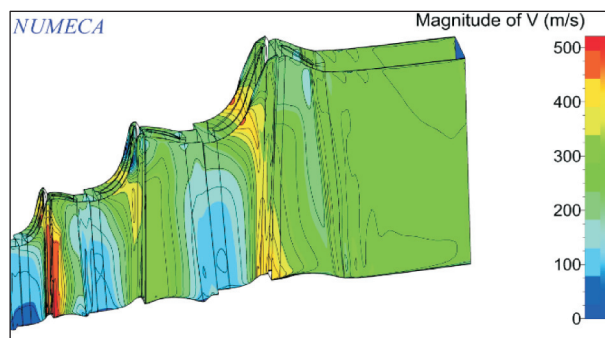
Входной параметр	Значение	Выходной параметр	Значение
p_0 , МПа	3,271	G_1 , кг/с	4,7
t_0 , °C	282,7	G_2 , кг/с	15,1
μ , м ² /с	0,0001	G_3 , кг/с	3,9
$p_{кз}$, кПа	4,36	–	–

уравнение Навье — Стокса [19]. С помощью ранее построенной сетки создавалась расчетная область, в которую вводились граничные условия, параметры моделируемых процессов и настройки решателя.

На четвертом этапе использовался основной модуль FINE/Turbo для загрузки сохраненной геометрической модели в формате igg. После этого создавался проект, в котором задавались соответствующие граничные условия для расчетной сетки и выбиралась модель течения рабочей среды (влажного пара). В качестве исходной модели турбулентности применялась модель Spalart–Allmaras. Входные (давление p_0 , температура t_0 и кинематическая вязкость пара



а



б

Рис. 5 (начало). Распределения степени сухости пара (а), скорости течения потока (б), статического давления пара (в) и числа Маха (з) в проточной части турбины

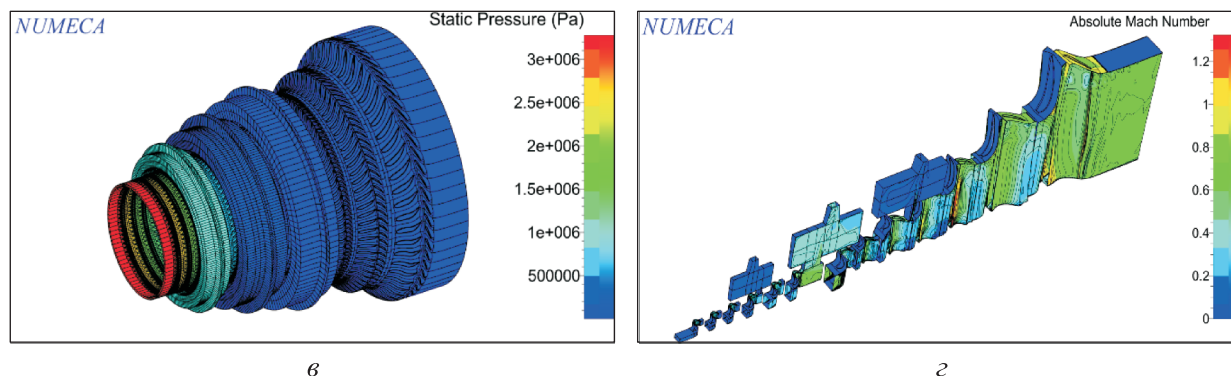


Рис. 5 (окончание). Распределения степени сухости пара (а), скорости течения потока (б), статического давления пара (в) и числа Маха (г) в проточной части турбины

и пара) и выходные (давление пара p_k , расходы пара через первую G_1 , вторую G_2 и третью G_3 камеры отбора) параметры граничных условий приведены в табл. 2.

После постановки граничных условий задавалось количество итераций и запускался решатель потока. Для визуализации проточной части турбины использовался модуль постпроцесса CFView. Результаты моделирования проточной части паровой турбины приведены на рис. 5.

Выводы

1. Рассмотрена и апробирована усовершенствованная методика проектирования паровой турбины с использованием CFD-кода в ПК NUMECA на примере модели ТК-35/38-3,4 малой мощности для атомной теплоэлектроцентрали. Предложенные технические решения значительно упрощают трудозатраты специалистов в области турбостроения по сравнению с таковыми при традиционных методах проектирования с использованием других ПК в области энергетического машиностроения.

2. Разработана и апробирована методика применения ПК NUMECA для проектирования регенеративных и теплофикационных камер

отбора пара вместе с проточной частью турбины. Наличие камер отбора при численном моделировании уточняет полученные результаты и позволяет изучить картину течения потока в переходных участках между ними и ступенями.

3. Разработанная модель дает возможность оценить устойчивость потока к возникновению отрывных режимов течения и определить энергетические потери, возникающие в проточной части цилиндра низкого давления турбины ТК-35/38-3,4, а именно в последней ступени ЧНД, которая имеет наибольший риск эрозионного изнашивания.

4. Модули ПК NUMECA позволяют реализовать 3D-профилирование направляющей и рабочей лопаток в модуле Autoblade. С помощью генератора сеток турбомашин IGG (Autogrid 5) можно построить расчетные сетки ступеней и камер отбора, которые являются необходимым элементом для проведения газодинамических расчетов в трехпозиционном решателе потока FINE/Turbo Euranus, основанном на решении уравнений Навье — Стокса.

5. Дальнейшие исследования по повышению энергоэффективности проточной части турбин будут направлены на рассмотрение актуальных мер по оценке влажности и снижению потерь энергии с применением ПК NUMECA.

Литература

- [1] Юрин В.Е., Шекера В.В. Сравнительное исследование эффективности многофункционального использования пускорезервной котельной на АЭС. *Энергобезопасность и энергосбережение*, 2023, № 5, с. 10–17.
- [2] Li J. Performance characteristics of 1000 MW nuclear power steam turbine excitation system. In: *Design and application of modern synchronous generator excitation systems*. China Electric Power Press, 2019, pp. 601–637, doi: <https://doi.org/10.1002/9781118841006.ch18>

- [3] Аракелян Э.К., Мезин С.В., Андрияшин А.В. и др. Оптимизация работы тепловых электрических станций на базе применения моторного режима. *Вестник МЭИ*, 2024, № 4, с. 169–187, doi: <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2024-4-169-187>
- [4] Москаленко А.В., Тютчев А.М., Ивановский А.А. и др. Результаты расчетно-экспериментального исследования течения влажного пара через надбандажное уплотнение ступени большой верности. *Теплоэнергетика*, 2024, № 11, с. 27–37, doi: <https://doi.org/10.56304/S0040363624700401>
- [5] Peng W., Karimi Sadaghiani O. Thermodynamic modeling and multi-objective optimization of a new system presented for reutilization of the lost heat in combined-cycle power plants. *Energy Technol.*, 2023, vol. 11, no. 8, pp. 23–29, doi: <https://doi.org/10.1002/ente.202300255>
- [6] Gülen S. Can. *Gas and steam turbine power plants*. Cambridge University Press, 2023. 540 p.
- [7] Andrej V. *Comprehensive throughflow method for steam turbine development*. University of Cambridge, 2021. 176 p.
- [8] Аминов Р.З. Применение многофункциональных систем с тепловыми аккумуляторами фазового перехода как путь повышения безопасности и эффективности АЭС. *Теплоэнергетика*, 2022, № 8, с. 5–13, doi: <https://doi.org/10.56304/S004036362208001X>
- [9] Попов В.В. *Результаты расчетно-экспериментального исследования влияния сепарации на характеристики жидкой фазы за сопловой турбинной решеткой*. Автореф. ... дисс. канд. тех. наук. Москва, МЭИ, 2017. 20 с.
- [10] Трохин Д.А. Разработка методики расчета проточной части цилиндра низкого давления теплофикационной турбины с использованием CFD кода в программном комплексе Numeca. *Научные перспективы XXI века. Мат. Межд. (заочной) науч.-практ. конф.* Нефтекамск, Мир науки, 2022, с. 34–44.
- [11] Жинов А.А., Шевелев Д.В. Определение протечек пара через неисправные лабиринтные уплотнения паровой турбины. *Известия МГТУ МАМИ*, 2022, т. 16, № 1, с. 21–28, doi: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-104581>
- [12] Асеев А.А., Афанасьев А.А., Боровков Д.В. и др. Подходы к определению энергетических характеристик парциальных турбин турбонасосных агрегатов ЖРД. *Насосы. Турбины. Системы*, 2023, № 1, с. 34–42.
- [13] Поташев А.В., Поташева Е.В. Применение квазитрехмерной модели течения в турбомашинах для расчета интегральных характеристик. *Компрессорная техника и пневматика*, 2023, № 2, с. 41–43.
- [14] Lin J., Lu S., Zhao Z. et al. Analysis of the operational characteristics and performance comparison of steam screw pressure matcher based on twin-screw expander. *Energy Sci. Eng.*, 2025, vol. 13, no. 2, pp. 626–642, doi: <https://doi.org/10.1002/ese3.2019>
- [15] Лескин С.Т., Слободчук В.И., Шелегов А.С. и др. Предварительная оценка характеристик оборудования цикла Брайтона на сверхкритических параметрах CO₂. *Известия вузов. Ядерная энергетика*, 2023, № 1, с. 19–32, doi: <https://doi.org/10.26583/пре.2023.1.02>
- [16] Проскурин А.Ю. Применение технологий компьютерного моделирования при решении аэродинамических задач. *Международный научно-исследовательский журнал*, 2022, № 6–1, с. 131–136, doi: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.120.6.019>
- [17] Остапюк Я.А., Новикова Ю.Д., Ткаченко А.Ю. и др. Термодинамический расчет рабочего процесса газодинамически развязанных компрессора и турбины. *Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника*, 2024, № 77, с. 37–46.
- [18] Li J., Ying Y., Wu Z. Gas turbine gas-path fault diagnosis in power plant under transient operating condition with variable geometry compressor. *Energy Sci. Eng.*, 2022, vol. 10, no. 9, pp. 3423–3442, doi: <https://doi.org/10.1002/ese3.1229>
- [19] Liu Y., Jia Q., Zhou X. et al. Experimental study on the aerodynamic characteristics of blades at the last stage of a steam turbine at off-design conditions. *Int. J. Aerosp. Eng.*, 2022, vol. 2022, art. 8785963, doi: <https://doi.org/10.1155/2022/8785963>

References

- [1] Yurin V.E., Shekera V.V. Comparative research of efficiency of an auxiliary boiler multifunctional use at a nuclear power plant. *Energobezопасnost i energosberezhenie* [Energy Safety and Energy Economy], 2023, no. 5, pp. 10–17. (In Russ.).

- [2] Li J. Performance characteristics of 1000 MW nuclear power steam turbine excitation system. In: *Design and application of modern synchronous generator excitation systems*. China Electric Power Press, 2019, pp. 601–637, doi: <https://doi.org/10.1002/9781118841006.ch18>
- [3] Arakelyan E.K., Mezin S.V., Andryushin A.V. et al. Optimization of the operation of thermal power plants based on the use of motor mode. *Vestnik MEI*, 2024, no. 4, pp. 169–187, doi: <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2024-4-169-187> (in Russ.).
- [4] Moskalenko A.V., Tyukhtyaev A.M., Ivanovskiy A.A. et al. Results of a computational and experimental study of wet steam flow through the shroud seal of a stage with long blades. *Teploenergetika*, 2024, no. 11, pp. 27–37, doi: <https://doi.org/10.56304/S0040363624700401> (in Russ.). (Eng. version: *Therm. Eng.*, 2024, vol. 71, no. 11, pp. 931–940, doi: <https://doi.org/10.1134/S0040601524700484>)
- [5] Peng W., Karimi Sadaghiani O. Thermodynamic modeling and multi-objective optimization of a new system presented for reutilization of the lost heat in combined-cycle power plants. *Energy Technol.*, 2023, vol. 11, no. 8, pp. 23–29, doi: <https://doi.org/10.1002/ente.202300255>
- [6] Gülen S. Can. Gas and steam turbine power plants. Cambridge University Press, 2023. 540 p.
- [7] Andrej V. *Comprehensive throughflow method for steam turbine development*. University of Cambridge, 2021. 176 p.
- [8] Aminov R.Z. Application of multifunctional systems with latent heat thermal energy storages: a way to improve NPP safety and efficiency. *Teploenergetika*, 2022, no. 8, pp. 5–13, doi: <https://doi.org/10.56304/S004036362208001X> (in Russ.). (Eng. version: *Therm. Eng.*, 2022, vol. 69, no. 8, pp. 555–562, doi: <https://doi.org/10.1134/S0040601522080018>)
- [9] Popov V.V. *Rezultaty raschetno-eksperimentalnogo issledovaniya vliyaniya separatsii na kharakteristiki zhidkoy fazy za soplovoy turbinnoy reshetkoy*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Results of a computational and experimental study of the effect of separation on the characteristics of the liquid phase behind a nozzle turbine cascade. Abs. kand. tech. sci. diss.]. Moscow, MEI Publ., 2017. 20 p. (In Russ.).
- [10] Trokhin D.A. [Development of a calculation method for the low-pressure cylinder flow path of a cogeneration turbine using CFD code in the Numeca software package]. *Nauchnye perspektivy XXI veka. Mat. Mezhd. (zaachnoy) nauch.-prakt. konf.* [Scientific Prospects for the 21st Century. Proc. Int. (Correspondence) Sci.-Pract. Conf.]. Neftekamsk, Mir nauki Publ., 2022, pp. 34–44. (In Russ.).
- [11] Zhinov A.A., Shevelev D.V. Determination of steam leaks through faulty labyrinth seals of a steam turbine. *Izvestiya MGTU MAMI*, 2022, vol. 16, no. 1, pp. 21–28, doi: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-104581> (in Russ.).
- [12] Aseev A.A., Afanasyev A.A., Borovkov D.V. et al. Approaches to a determination of energetic characteristics of partial admission turbines of liquid rocket engines turbopumps. *Nasosy. Turbiny. Sistemy* [Pumps. Turbines. Systems], 2023, no. 1, pp. 34–42. (In Russ.).
- [13] Potashev A.V., Potasheva E.V. Application of a quasi-three-dimensional flow model in turbomachines to calculate integral characteristics. *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika* [Compressors & Pneumatics], 2023, no. 2, pp. 41–43. (In Russ.).
- [14] Lin J., Lu S., Zhao Z. et al. Analysis of the operational characteristics and performance comparison of steam screw pressure matcher based on twin-screw expander. *Energy Sci. Eng.*, 2025, vol. 13, no. 2, pp. 626–642, doi: <https://doi.org/10.1002/ese3.2019>
- [15] Leskin S.T., Slobodchuk V.I., Shelegov A.S. et al. Preliminary assessment of the characteristics of brayton cycle equipment at supercritical CO₂ parameters. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*, 2023, no. 1, c. 19–32, doi: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.1.02> (in Russ.).
- [16] Proskurin A.Yu. Application of computer simulation technologies for the solution of aerodynamic problems. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Research Journal], 2022, no. 6–1, c. 131–136, doi: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.120.6.019> (in Russ.).
- [17] Ostapyuk Ya.A., Novikova Yu.D., Tkachenko A.Yu. et al. Thermodynamic calculation of the working process of gas dynamic decoupled compressor and turbine. *Vestnik PNIPU. Aerokosmicheskaya tekhnika* [PNRPU Aerospace Engineering Bulletin], 2024, no. 77, pp. 37–46. (In Russ.).

- [18] Li J., Ying Y., Wu Z. Gas turbine gas-path fault diagnosis in power plant under transient operating condition with variable geometry compressor. *Energy Sci. Eng.*, 2022, vol. 10, no. 9, pp. 3423–3442, doi: <https://doi.org/10.1002/ese3.1229>
- [19] Liu Y., Jia Q., Zhou X. et al. Experimental study on the aerodynamic characteristics of blades at the last stage of a steam turbine at off-design conditions. *Int. J. Aerosp. Eng.*, 2022, vol. 2022, art. 8785963, doi: <https://doi.org/10.1155/2022/8785963>

Статья поступила в редакцию 03.11.2025

Информация об авторах

ТРОХИН Дмитрий Александрович — старший преподаватель кафедры «Паровых и газовых турбин». Национальный исследовательский университет «МЭИ» (111250, Москва, Российская Федерация, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1, e-mail: TrokhinDA@mpei.ru).

ЗАРЯНКИН Владислав Аркадьевич — кандидат технических наук, ведущий конструктор. Опытнo-конструкторское бюро имени А. Люльки — филиал ПАО «ОДК-Уфимский моторостроительного производственного объединения» (129301, Москва, Российская Федерация, ул. Касаткина, д. 13, стр. 8, e-mail: Zaryankinva@mail.ru).

ВОЛЖЕНЦОВ Андрей Альбертович — начальник сектора тепловых и газодинамических расчетов Специального конструкторского бюро. ПАО «Калужский турбинный завод» (248021, Калуга, Российская Федерация, ул. Московская, д. 241, e-mail: Volzhencov_AA@paoktz.ru).

Information about the authors

TROKHIN Dmitry Alexandrovich — Senior Lecturer, Steam and Gas Turbines Department. National Research University Moscow Power Engineering Institute (111250, Moscow, Russian Federation, Krasnokazarmennaya St., Bldg. 14, Block 1, e-mail: TrokhinDA@mpei.ru).

ZARYANKIN Vladislav Arkadevich — Candidate of Science (Eng.), Leading Designer. Experimental design bureau named after A. Lyulka subsidiary of PJSC «UEC-Ufa engine industrial association» (129301, Moscow, Russian Federation, Kasatkina St., Bldg. 13, Block 8, e-mail: Zaryankinva@mail.ru).

VOLZHETCOV Andrey Albertovich — Head of the Thermal and Gas Dynamic Calculations Sector, Special Design Bureau. PJSC Kaluga Turbine Works (248021, Kaluga, Russian Federation, Moskovskaya St., Bldg. 241, e-mail: Volzhencov_AA@paoktz.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Трохин Д.А., Зарянкин В.А., Волженцов А.А. Разработка методики расчета паровой турбины средней мощности для АЭС с использованием CFD-кода в программном комплексе NUMECA. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 7, с. 105–113.

Please cite this article in English as:

Trokhin D.A., Zaryankin V.A., Volzentsov A.A. Development of a method for calculating medium-power steam turbines for nuclear power plants using CFD code in the NUMECA software package. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 7, pp. 105–113.