

УДК 621.165

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-104581>

Оригинальное исследование



Определение протечек пара через неисправные лабиринтные уплотнения паровой турбины

А.А. Жинов, Д.В. Шевелев

Калужский филиал «Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана», Калуга, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. При расчете осевого усилия, действующего на упорный подшипник паровой турбины, при расчете размеров думмиса, при расчете эффективности ступеней турбины необходимо определение величины протечек пара через ее диафрагменные и концевые уплотнения. Существующие методики позволяют рассчитать протечки только через исправные, неповрежденные лабиринтные уплотнения нескольких типовых конструкций. Однако в процессе эксплуатации паровых турбин по причине нерасчетных осевых и радиальных смещений ротора лабиринтные уплотнения нередко повреждаются: деформируются, сминаются или выламываются.

Цель исследования – разработать методику расчета протечек с помощью прямого CFD-моделирования в исправных и поврежденных уплотнениях при типовых их неисправностях, верифицировать результаты моделирования сравнением с известными методиками и экспериментальными данными, определить критические протечки пара через неисправные лабиринтные уплотнения турбины.

Материалы и методы. Предложена и верифицирована методика расчета расхода пара через исправные и неисправные лабиринтные уплотнения паровой турбины с использованием возможностей современных CFD-методов. Описана расчетная область моделирования переднего концевого уплотнения турбины, особенности задания граничных условий, адаптивной расчетной сетки, использованной численной математической модели.

Результаты. Приведены результаты численного исследования протечек пара через исправные и поврежденные лабиринтные концевые уплотнения турбины: с погнутыми гребнями в уплотнениях, при частичном или полном отсутствии гребней. Проведено моделирование работы переднего концевого уплотнения турбины при нескольких характерных неисправностях. Показано, что частичное повреждение гребней переднего концевого уплотнения турбины, которое часто встречается при эксплуатации, приводит к существенному росту утечки пара. Установлено, что при значительном повреждении гребней рост утечки пара может привести к исчерпанию пропускной способности регулятора давления пара в уплотнении, что приводит к нарушению работы системы разгрузки упорного подшипника турбины.

Заключение. Предложенная методика и полученные результаты могут быть использованы для расчета протечек пара через исправные и неисправные диафрагменные и концевые лабиринтные уплотнения турбин, при расчете величины осевого усилия, действующего на упорный подшипник турбины на переменных режимах ее работы, методика полезна при оценке эффективности работы системы разгрузки упорного подшипника.

Ключевые слова: паровая турбина; лабиринтное уплотнение; концевое уплотнение; думмис; осевое усилие; упорный подшипник; численное моделирование.

Для цитирования:

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>

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-104581>

Original study article

Determination of steam leaks through faulty labyrinth seals of a steam turbine

Andrey A. Jinov, Denis V. Shevelev

Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University, Kaluga, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: When calculating the axial force acting on the thrust bearing of a steam turbine, when calculating the dimensions of the unloading piston, when calculating the efficiency of the turbine stages, it is necessary to determine the amount of steam leakage through its diaphragm and end seals. Existing methods make it possible to calculate leaks only through serviceable, undamaged labyrinth seals of several standard designs. However, during the operation of steam turbines, due to off-design axial and radial displacements of the rotor, labyrinth seals are often damaged - deformed, crushed or broken.

AIMS: The purpose of the study is to develop a method for calculating leaks using direct CFD modeling in serviceable and damaged seals with typical failures, verify the simulation results by comparison with known methods and experimental data, and determine critical steam leaks through faulty labyrinth turbine seals.

MATERIALS AND METHODS: A method for calculating the steam flow rate through serviceable and faulty labyrinth seals of a steam turbine using the capabilities of modern CFD methods is proposed and verified. The computational domain of modeling the front-end seal of the turbine, the features of setting the boundary conditions, the adaptive computational grid, and the numerical mathematical model used are described.

RESULTS: The results of a numerical study of steam leakage through serviceable and damaged labyrinth end seals of the turbine are presented: with bent ridges in the seals, with partial or complete absence of ridges. The operation of the front-end seal of the turbine was simulated with several typical failures. It is shown that partial damage to the ridges of the front-end seal of the turbine, which is often encountered during operation, leads to a significant increase in steam leakage. It has been established that with significant damage to the ridges, an increase in steam leakage can lead to the exhaustion of the capacity of the steam pressure regulator in the seal, which leads to a malfunction of the turbine thrust bearing unloading system.

CONCLUSIONS: The proposed technique and the results obtained can be used to calculate steam leakage through serviceable and faulty diaphragm and end labyrinth seals of turbines, when calculating the value of the axial force acting on the turbine thrust bearing in variable operating modes, the technique is useful in assessing the efficiency of the thrust bearing unloading system.

Keywords: *labyrinth seal; end seals; steam turbine; axial force; numerical simulation.*

Cite as:

Jinov AA, Shevelev DV. Determination of steam leaks through faulty labyrinth seals of a steam turbine. *Izvestiya MG TU «MAMI»*. 2022;16(1):21–28. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-104581>

Received: 08.03.2022

Accepted: 30.03.2022

Published: 15.04.2022

ВВЕДЕНИЕ

При расчете осевого усилия, действующего на упорный подшипник турбины, при расчете думмиса, при расчете эффективности ступеней турбины необходимо определение величины протечек через лабиринтные уплотнения, применяемые в диафрагменных и концевых уплотнениях паровых турбин. Эти протечки в основном и определяют перепады давления на диски ступеней турбины, работу системы отсоса пара из концевых уплотнений, значительно влияют на экономичность турбины.

Методика определения протечек пара через лабиринтные концевые и диафрагменные уплотнения турбины, построенная на базе *PTM* [1], позволяет рассчитать протечки только на исправные, неповрежденные уплотнения нескольких типовых конструкций. Кроме того, эта методика предусматривает возможность расчета только для фиксированного (обычно симметричного) положения гребней (усиков) уплотнения относительно проточек ротора [2, 3, 4, 5].

В процессе эксплуатации паровых турбин лабиринтные уплотнения нередко повреждаются. Тонкие «усики» таких уплотнений могут погнуться, частично или полностью разрушиться. Причем такие повреждения, как правило, не приводят к аварийным остановам турбины и могут диагностироваться только по косвенным признакам: кратковременному повышению уровня вибрации ротора, увеличению осевого смещения ротора, изменению осевого усилия на упорном подшипнике, росту расхода пара на регуляторах уплотнений и т. п. Достоверно определить степень повреждения лабиринтных уплотнений в турбине можно, как правило, только при вскрытии корпуса турбины, что происходит при эксплуатации очень редко и требует длительного простоя оборудования и дорогостоящего обслуживания.

Для частично неисправных лабиринтных уплотнений (с отсутствующими или деформированными усиками) методика расчета протечек, основанная на *PTM* [1], не может быть использована.

Цель исследования заключается в разработке методики расчета протечек, основанной на прямом *CFD*-моделировании течения пара в уплотнениях при различных их неисправностях.

Моделирование проводилось на примере переднего концевое уплотнения паровой турбины средней мощности, при этом решались следующие задачи.

1. Верификация методики моделирования работы исправного переднего концевое уплотнения методом численного эксперимента, путем сравнения найденного расхода пара через исправное уплотнение с результатом, полученным расчетом по методике *PTM* [1].
2. Определение расхода пара через переднее концевое уплотнение турбины при различных вариантах повреждения уплотнительных усиков в лабиринтном уплотнении.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Провести прямое численное 3D-моделирование работы переднего концевое уплотнения на сегодняшний день практически невозможно. Причина этого – большая разница характерных линейных размеров конструкции, например, для рассмотренного далее уплотнения: осевая протяженность уплотнения – порядка 700 мм, его диаметр – 550 мм, а размеры щели у усиков и их толщины – ~ 0,4...0,5 мм при количестве усиков более 80. Прямое численное 3D-моделирование всей проточной части такого уплотнения требует чрезвычайно большого

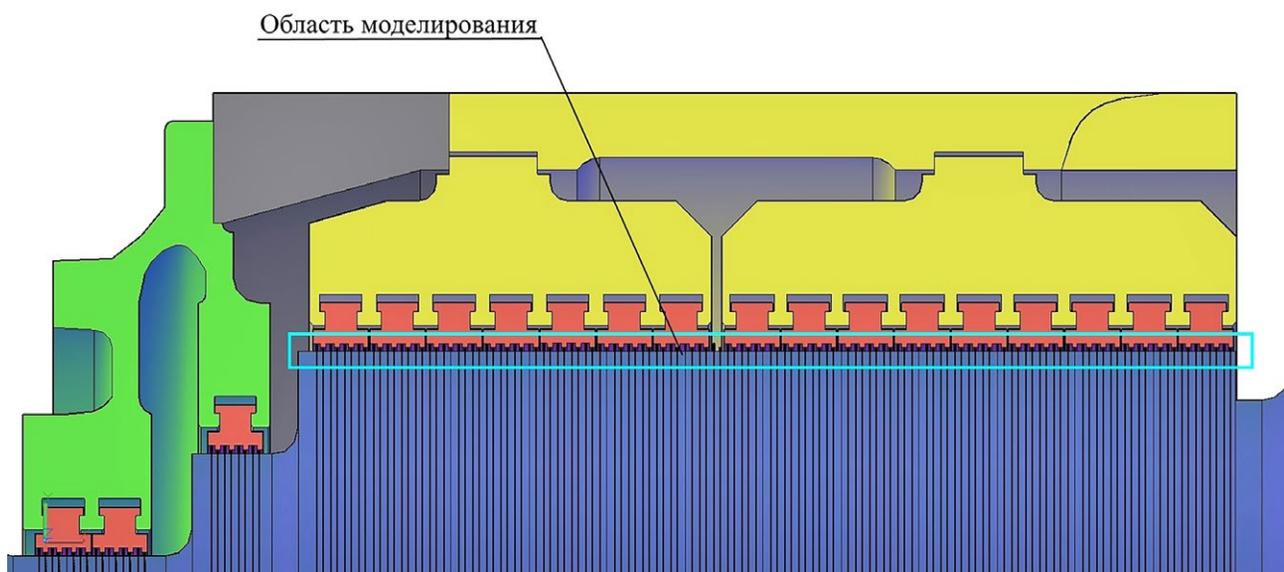


Рис. 1. Расчетная область при моделировании работы переднего концевое уплотнения паровой турбины.

Fig. 1. Computational area in modeling the operation of the front end seal of a steam turbine.

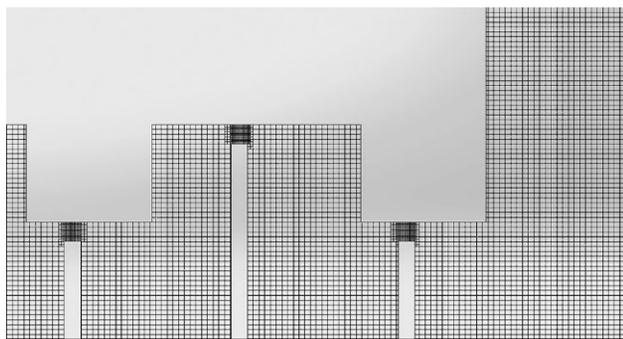


Рис. 2. Фрагмент расчетной сетки модели переднего концевого уплотнения.

Fig. 2. Fragment of the computational grid of the model of the front end seal.

количества расчетных ячеек и огромных затрат машинного времени.

В рассматриваемом случае численное моделирование делает возможным осесимметричная конструкция переднего концевого уплотнения и малая относительная величина уплотнительных усиков (отношение высоты усика к диаметру уплотнения). Это позволяет свести задачу численного моделирования к квазидвумерной.

Элемент переднего концевого уплотнения, входящий в рассмотренную расчетную CFD модель, представлен на рис. 1.

Граничные условия для численного моделирования определялись из расчета параметров пара на характерных режимах работы турбины и регулятора давления пара в камере уплотнения.

В объеме расчетной квазидвумерной CFD модели переднего концевого уплотнения была построена расчетная сетка. Базовая размерность расчетной сетки – 1000*30*1 ячеек.

Для повышения точности расчета была произведена ее адаптация – локальное измельчение в критически важных участках расчетной области, в частности, в камерах между усиками и в зазорах под усиками. Густота расчетной сетки при моделировании выбиралась исходя из условия достижения сходимости по величине утечки пара с точностью до 1%.

На рис. 2 представлен фрагмент расчетной сетки расчетной области модели.

Численная математическая модель течения сжимаемого вязкого газа (водяного пара) построена на классических уравнениях сохранения массы, импульса и энергии. В качестве модели турбулентности применялась $k-\varepsilon$ модель.

Уравнения в Декартовых координатах:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0,$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) + \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R),$$

$$\frac{\partial \rho u_i h^*}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}(u_j(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R)) - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho \varepsilon,$$

где u – скорость потока; p – статическое давление газа; ρ – плотность газа; $i, j = 1, 2, 3$ – номера осей

координат (x, y, z); $\tau_{ij} = \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ – тензор касательных

напряжений для осей i, j ; τ_{ij}^R – тензор напряжений Рей-

нольдса для осей i, j ; $\mu_t = C_{\mu} \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$ – турбулентная вяз-

кость в $k-\varepsilon$ модели турбулентности; $h^* = h + \frac{u^2}{2}$ – эн-

тальпия потока пара по параметрам торможения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для верификации использованной методики проведены расчеты расхода пара на исправное переднее концевое уплотнение турбины на номинальном режиме двумя способами: по методике на базе PTM [1] и путем прямого CFD-моделирования течения пара в уплотнении при заданных параметрах пара.

Результаты расчета полей скоростей, выполненные с помощью CFD-моделирования, представлены на рис. 3. Здесь и далее для уменьшения объема иллюстраций на рисунках показаны только те участки уплотнения, в которых наблюдаются существенные изменения параметров потока.

Таблица 1. Утечка пара через исправное переднее концевое уплотнение

Table 1. Steam leakage through a serviceable front end seal

Параметр/секция	Переднее концевое уплотнение	
	Первая секция	Вторая секция
CFD расчет, утечка пара, кг/с	0,4677	0,0971
Расчет по PTM, утечка пара, кг/с	0,4640	0,1020

Для примера, в табл. 1 представлены результаты расчета протечек пара через первую и вторую секции рассмотренного исправного переднего концевго уплотнения.

Величина утечек пара через секции исправного переднего концевго уплотнения, полученная путем численного *CFD*-моделирования, хорошо согласуется с аналогичным расчетом, выполненным по методике *PTM*. Результаты расчетов отличаются менее чем на 3%.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что используемая методика *CFD*-моделирования течения в лабиринтных уплотнениях рассмотренного вида достоверна и может быть использована для моделирования течения

и в неисправных уплотнениях (с погнутыми или отсутствующими усиками) при различных режимах эксплуатации уплотнения.

На практике при эксплуатации паровых турбин лабиринтные уплотнения часто повреждаются.

С помощью предлагаемой методики моделировалась работа переднего концевго уплотнения турбины при следующих характерных неисправностях:

- 1) все усики уплотнения целые, но наклонены по ходу пара на 14° ;
- 2) длинные усики уплотнения отсутствуют, короткие деформированы на 45° по ходу пара;
- 3) усики в уплотнении полностью отсутствуют.

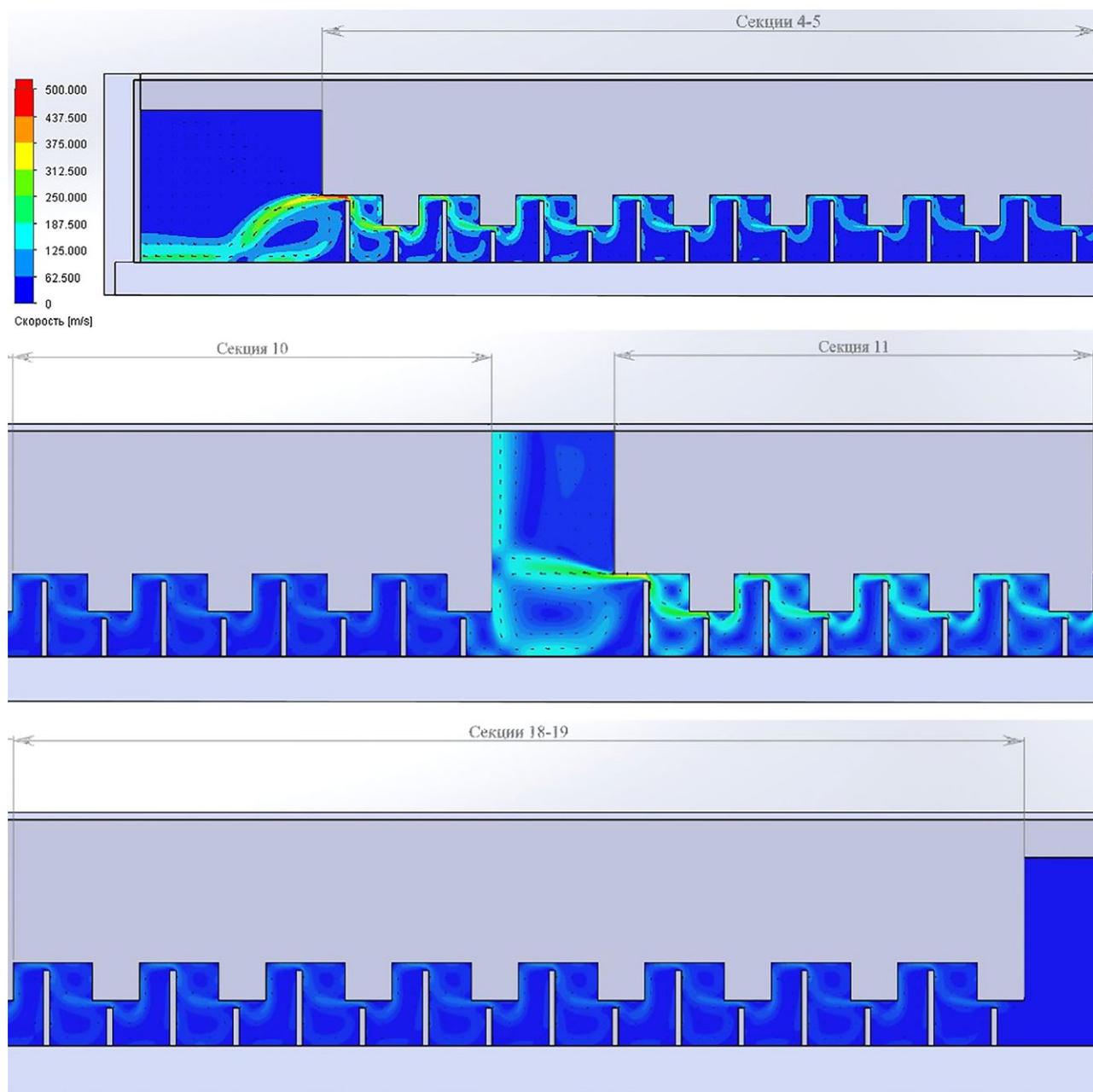


Рис. 3. Распределение скорости пара через секции переднего концевго уплотнения при исправных усиках уплотнения.
Fig. 3. Steam velocity distribution through the front end seal sections when the seal ridges are in good condition.

Для примера на рис. 4 представлены результаты моделирования течения в крайней секции переднего концевое уплотнения при различных повреждениях усиков уплотнения и номинальных параметрах пара.

Значения расхода пара через переднее концевое уплотнение при различных степенях его повреждения приведены в табл. 2.

Незначительные повреждения усиков (наклон на 14° по ходу пара) увеличивают расход пара через уплотнение, но его значение не превышает максимальную пропускную способность регулятора пара уплотнений.

Значительные повреждения усиков переднего концевое уплотнения может привести к значительному росту протечки, ухудшению экономичности турбины

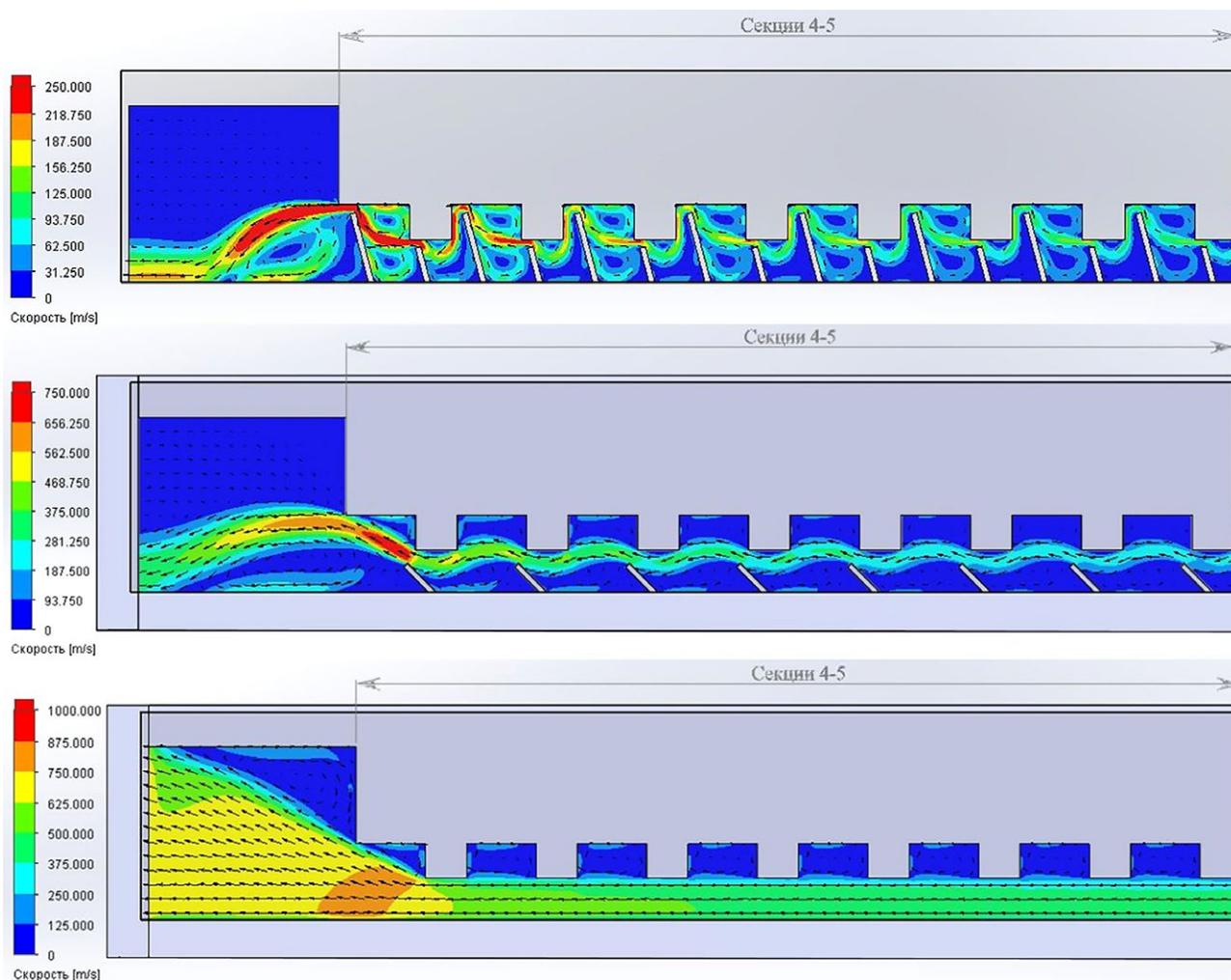


Рис. 4. Распределение скорости пара через крайнюю секцию переднего концевое уплотнения при неисправных усиках уплотнения.

Fig. 4. Distribution of steam velocity through the front end seal outermost section with defective seal ridges.

Таблица 2. Утечка пара через переднее концевое уплотнение

Table 2. Steam leaking through the front end seal

№ режима	Режим работы переднего концевое уплотнения	CFD-моделирование		Расчет по РТМ	
		G_1 , кг/с	$G_2 - G_3$, кг/с	G_1 , кг/с	$G_2 - G_3$, кг/с
1	Неповрежденные усика	0,4677	0,097	0,464	0,102
2	Все усика наклонены по ходу пара на 14°	0,6117	0,10794	–	–
3	Длинные усика отсутствуют, короткие деформированы на 45° по ходу пара	2,5906	0,5037	–	–
4	Усика отсутствуют	16,61	3,48	16,35	3,34

и исчерпанию пропускной способности регулятора давления пара в уплотнении, что приведет к нарушению работы системы разгрузки упорного подшипника турбины. Например, для рассмотренного переднего уплотнения турбины регулятор давления пара может обеспечить расход ($G_2 - G_3$) около 0,3 кг/с, что ниже, чем требуется для режимов № 3, 4.

ВЫВОДЫ

1. Предложена и верифицирована методика расчета протечек пара через неисправные лабиринтные уплотнения паровой турбины при различной степени их повреждения.
2. Получены величины протечек пара через неисправное переднее концевое уплотнение турбины при различной степени повреждения его усиков.
3. Повреждения усиков переднего концевого уплотнения могут привести к значительному росту протечки через уплотнение и исчерпанию пропускной способности регулятора давления пара в уплотнении, что приведет в свою очередь к нарушению работы системы разгрузки опорного подшипника турбины.
4. Предлагаемая методика и полученные результаты могут быть использованы для расчета протечек пара через неисправные лабиринтные уплотнения паровой турбины и при расчете осевого усилия, действующего на упорный подшипник турбины на переменных режимах работы турбины.

ЛИТЕРАТУРА

1. РТМ 108.020.33-86 Уплотнения лабиринтные стационарных паровых и газовых турбин и компрессоров. Проектирование и расчет. Москва: НПО ЦКТИ, 1988.
2. Жинов А.А., Шевелев Д.В., Гридчин Н.В. Исследование влияния осевого смещения ротора паровой турбины на величину протечки пара через диафрагменное уплотнение ступени // Современные наукоемкие технологии. 2020. № 10. С. 32–37. doi: 10.17513/snt.38251

REFERENCES

1. *RTM 108.020.33-86 Uplotneniya labirintnye statsionarnykh parovykh i gazovykh turbin i kompres-sorov. Proektirovanie i raschet.* Moscow: NPO TsKTI; 1988. (In Russ).
2. Zhinov AA, Shevelev DV, Gridchin NV. Investigation of Effect of Axial Displacement of Steam Turbine Rotor on Value of Steam Leakage through Diaphragm Seal of Stage. *Modern High Technologies.* 2020;(10):32-37. (In Russ). doi: 10.17513/snt.38251

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Д.В. Шевелев — поиск публикаций по теме статьи, написание текста рукописи, создание изображений; А.А. Жинов — редактирование текста рукописи, утверждение финальной версии. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. D.V. Shevelev — search for publications, writing the text of the manuscript, creating images; A.A. Zhinov — editing the text of the manuscript, approval of the final version. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

3. Костюк А.Г., Фролов В.В., Булкин А.Е., Трухний А.Д. Паровые и газовые турбины для электростанций: учебник. Москва: МЭИ, 2016.
4. Гольдберг А.А., Иоффе Л.С., Коган П.В., и др. Паровые турбины и турбоустановки Уральского турбинного завода для ПГУ. Екатеринбург: ООО «Издательство УМЦ УПИ», 2015.
5. Ильичев В.Ю., Юрик Е.А., Ибрагимов С.В. Разработка методики определения осевых усилий, возникающих в лабиринтных уплотнениях паровых турбин // СтройМного. 2018. № 1. С. 3.

3. Kostyuk AG, Frolov VV, Bulkin AE, Trukhniy AD. *Steam and gas turbines for power plants: a textbook.* Moscow: MPEI; 2016. (In Russ).
4. Goldberg AA, Ioffe LS, Kogan PV, et al. *Steam turbines and turbine plants of the Ural Turbine Plant for CCGT.* Yekaterinburg: UMC UPI Publishing House LLC; 2015.
5. Ilyichev VY, Yurik EA, Ibragimov SV. Development of a technique of determination of the axial forces arising in labyrinth consolidations of steam turbines // StroyMnogo. 2018;(1):3. (In Russ).

ОБ АВТОРАХ

***Шевелев Денис Владимирович,**

канд. техн. наук, доцент
кафедры «Тепловые двигатели и гидромашин» (МКЗ);
адрес: 248000, г. Калуга, ул. Баженова, 2;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7104-3249>;
eLibrary SPIN: 2076-0373;
e-mail: denis.v.shevelev@bmstu.ru

Жинов Андрей Александрович,

канд. техн. наук, доцент;
заведующий кафедрой «Тепловые двигатели
и гидромашин» (МКЗ);
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6409-4777>;
eLibrary SPIN: 1078-4808;
e-mail: azhinov@bmstu.ru

*Автор для переписки

AUTHORS' INFO

***Denis V. Shevelev,**

Cand. Sci. (Engin.), Associate Professor
of the «Heat engines and hydraulic machines» Department;
address: 2 Bazhenova Street, Kaluga, 248000, Russia;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7104-3249>;
eLibrary SPIN: 2076-0373;
e-mail: denis.v.shevelev@bmstu.ru

Andrey A. Zhinov,

Cand. Sci. (Engin.), Associate Professor;
Head of the «Heat engines
and hydraulic machines» Department;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6409-4777>;
eLibrary SPIN: 1078-4808;
e-mail: azhinov@bmstu.ru

*Corresponding author