

Транспортное и энергетическое машиностроение

УДК 621.165

DOI 10.18698/0536-1044-2017-3-22-30

Прямоугольно-ячеистые уплотнения для паровых турбин*

В.Г. Грибин, С.С. Дмитриев, Б.Н. Петрунин, А.А. Гусев

ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ», 111250, Москва, Российская Федерация, Красноказарменная ул., д. 14

Rectangular-Cellular Seals for Steam Turbines

V.G. Gribin, S.S. Dmitriev, B.N. Petrunin, A.A. Gusev

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education National Research University, 111250, Moscow, Russian Federation, Krasnokazarmennaya St., Bldg. 14



e-mail: GribinVG@mpei.ru, DmitriyevSS@mpei.ru, antoha.gusev@gmail.com

i В настоящее время для уменьшения протечек в паровых турбинах активно применяются уплотнения с так называемыми сотовыми вставками, в которых вследствие их конструктивных особенностей можно устанавливать уменьшенные (до 0,5 мм) радиальные зазоры. Однако стремление к достижению большей экономичности способно привести к противоречию с требованиями по надежности. Кроме того, сотовые уплотнения имеют высокую стоимость. Альтернативным решением является применение прямоугольно-ячеистых уплотнений, конструкция и технология изготовления которых разработаны в НИУ «МЭИ». В статье представлены результаты сравнительных экспериментальных исследований расходных и силовых характеристик трех типов уплотнений: прямоугольно-ячеистых, сотовых и стандартных с гладкими статорными частями. Показано, что новые уплотнения НИУ «МЭИ» по сравнению с сотовыми при почти аналогичных расходных характеристиках имеют существенно меньший уровень неконсервативных сил, способных вызывать паровую низкочастотную вибрацию. При этом стоимость изготовления прямоугольно-ячеистых уплотнений по технологии Опытного завода МЭИ в 6–8 раз меньше, чем у традиционных сотовых уплотнений.

Ключевые слова: прямоугольно-ячеистые уплотнения, сотовые вставки, прямоугольная ячейка, коэффициент расхода, неконсервативная аэродинамическая сила, низкочастотная вибрация.

i Nowadays, to reduce leakage in steam turbines, seals with inserts that are commonly known as honeycomb inserts are widely used. Their design features allow setting reduced radial clearances (down to 0.5 mm). However, the pursuit of greater efficiency could conflict with reliability requirements. In addition, honeycomb seals are expensive. An alternative solution to the problem is rectangular-cellular seals designed and manufactured by the National Research University Moscow Power Engineering Institute (NRU MPEI). This paper presents the results of comparative experimental studies of flow and power characteristics for three

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ грант № 16-19-10484.

types of seals: rectangular-cellular seals, honeycomb seals, and standard seals with smooth stator parts. The new NRU MPEI seals show similar flow rate characteristics when compared with honeycomb seals and have significantly lower levels of non-conservative forces, capable of causing vapor low-frequency vibration. At the same time, the cost of manufacturing rectangular-cellular seals using the MPEI Pilot-Production Plant technology is 6–8 times lower than that of traditional honeycomb seals.

Keywords: rectangular-cellular seals, honeycomb inserts, rectangular cell, flow coefficient, non-conservative aerodynamic force, low-frequency vibration.

При выборе типов уплотнений для паровых турбин в первую очередь необходимо учитывать их расходные характеристики, соответствующие основному назначению уплотнений — снижению протечек, — и динамические характеристики, определяемые уровнем неконсервативных аэродинамических сил, способных вызывать автоколебания роторов турбин. Кроме того, следует учитывать такие эксплуатационные характеристики уплотнений, как сохранность и ремонтпригодность, а также стоимость.

В настоящее время в новых конструкциях паровых турбин, а также при ремонте и модернизации действующих паротурбинных установок широко применяют уплотнения с сотовыми статорными частями [1] (рис. 1).

На основе опыта применения сотовых уплотнений в паровых турбинах установлено [2], что они имеют большую сохранность гребней при неизбежном возникновении задеваний в уплотнениях. В связи с этим в сотовых уплотнениях можно устанавливать меньшие ради-

альные зазоры, чем в традиционных с гладкими статорными частями. Эта особенность связана с допустимостью при эксплуатации врезания гребней в сотовые статорные вставки без опасных последствий.

Так, для традиционных периферийных уплотнений цилиндров высокого давления паровых турбин с гладкими статорными частями считаются допустимыми минимальные радиальные зазоры 1,2...1,5 мм, а для сотовых уплотнений — около 0,5 мм. Уменьшение радиального зазора обеспечивает снижение утечки пара и повышение экономичности проточной части.

Однако у широкого применения сотовых статорных вставок в паровых турбинах есть как сторонники [1, 2], так и противники [3]. И у тех, и других имеются достаточно убедительные аргументы в защиту своей позиции. В связи с этим следует особо отметить, что по стоимости сотовые уплотнения являются менее привлекательными. Существующие конструкции техно-

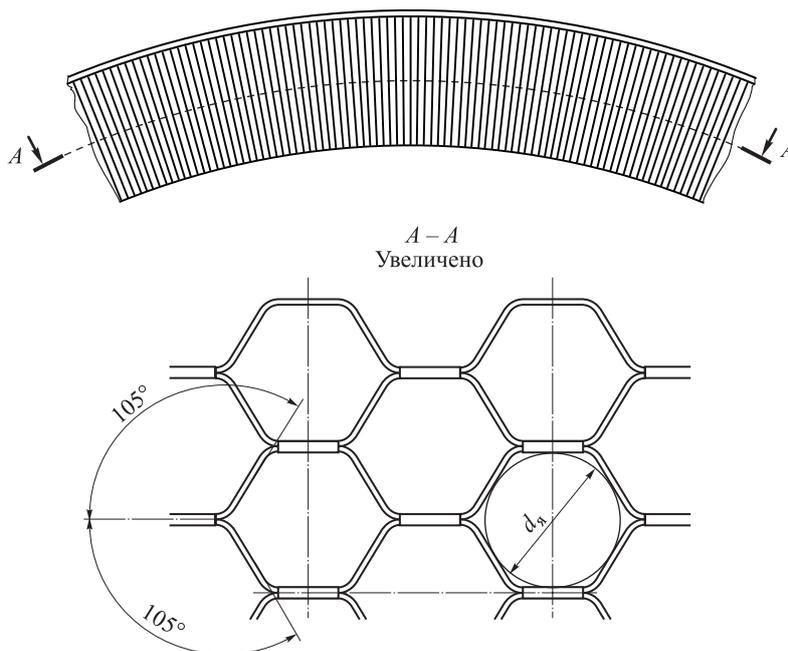


Рис. 1. Схема статора сотового уплотнения

логически чрезвычайно сложны и, как следствие, дороги. Ранее такие конструкции использовались во всем мире для авиационных газотурбинных двигателей и лишь недавно их стали применять в отечественном паротурбостроении [4].

На кафедре паровых и газовых турбин НИУ «МЭИ» под руководством профессора А.Г. Костюка на стенде «Динамическая модель уплотнения» («ДМУ») были проведены сравнительные

исследования расходных и динамических характеристик уплотнений с гладкими и сотовыми статорными частями [5]. С точки зрения надежности особый интерес представляли измерения неконсервативных аэродинамических сил, способных вызывать автоколебания и низкочастотную вибрацию роторов в области малых радиальных зазоров.

До применения сотовых уплотнений область малых значений радиальных зазоров δ для

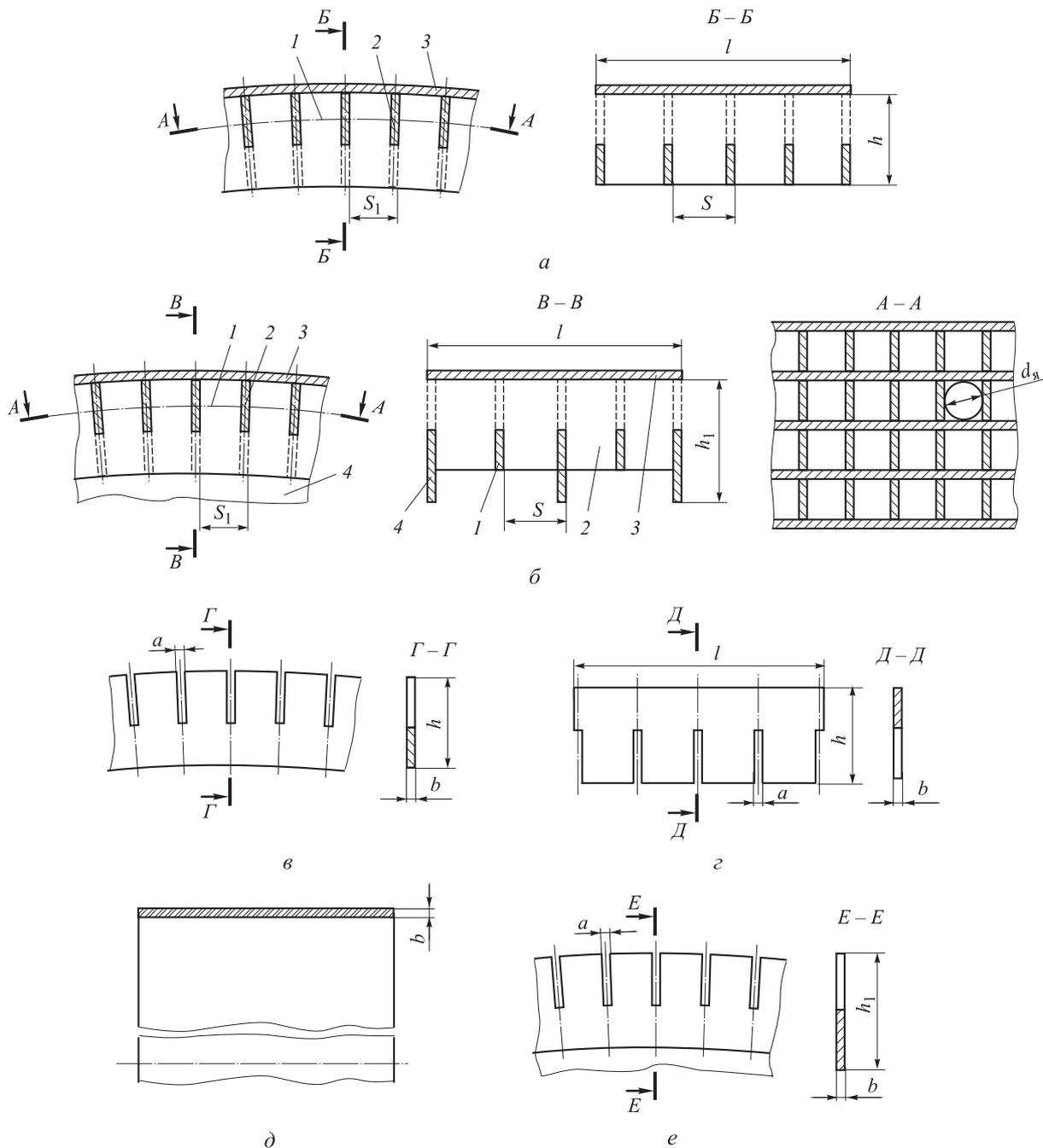


Рис. 2. Первый (а) и второй (б) варианты прямоугольно-ячеистой конструкции статорной части уплотнения, состоящей из деталей 1 (в), 2 (з), 3 (д) и 4 (е)

крупных энергетических турбин интереса не представляла. В работе [5] отмечена новая важная особенность изменения жесткостей неконсервативных сил в зависимости от радиального зазора δ как для сотовых, так и для традиционных уплотнений, а именно наличие максимума в зоне сравнительно малых значений $\delta = 0,5 \dots 0,7$ мм.

Сотовые вставки для проведения экспериментов на стенде «ДМУ» в НИУ «МЭИ» были изготовлены специалистами ООО «НПП АРМС». Диаметр вписанной окружности d_n исследованных вставок составлял 0,9 мм (см. рис. 1). В развитие данной работы предполагалось продолжить экспериментальные исследования сотовых уплотнений с ячейками, где диаметры вписанных окружностей имели бы большие значения, однако вследствие дороговизны изготовления таких вставок эксперименты были приостановлены.

На этом этапе существенный вклад в проектирование и изготовление новых статорных частей уплотнений внесли конструкторы и технологи Опытного завода МЭИ (ОПЗ МЭИ). Совместно с ними специалисты кафедры паровых и газовых турбин разработали более простую и надежную технологию производства таких конструкций. В результате появилась идея создания прямоугольно-ячеистых уплотнений [6], модели которых были изготовлены на ОПЗ МЭИ и испытаны на стенде «ДМУ» кафедры.

Цель работы — исследование расходных и динамических характеристик уплотнений с прямоугольно-ячеистой статорной частью, разработанных НИУ «МЭИ», и уплотнений с классическими сотовыми и гладкими статорными частями.

На рис. 2 показаны элементы двух вариантов уплотнений с прямоугольно-ячеистой статорной частью, имеющей наружный диаметр $d_n = 306$ мм и ширину l . По конфигурации прямоугольно-ячеистые уплотнения аналогичны сотовым, только ячейки (соты) в них являются прямоугольными или квадратными. Прямоугольно-ячеистые уплотнения могут быть выполнены с различными значениями шагов (по оси и радиусу) и углов наклона боковых стенок ячеек. Их можно использовать как в проточных уплотнениях (рис. 2, а), собранных из колец (рис. 2, в) одинаковой ширины h с соответствующей глубиной h ячейки, так и в уплотнениях с полным гашением скорости (рис. 2, б),

обеспечиваемым чередованием колец шириной h (см. рис. 2, в) и h_1 (рис. 2, е).

Статорная часть состоит из комбинации четырех деталей (см. рис. 2, в–е), которые, согласно технологии ОПЗ МЭИ, могут быть изготовлены из листа практически любой марки стали (например, X18H10T). Между собой элементы статорной части соединены точечной сваркой.

Ширина пазов a на 0,1 мм больше толщины листа b . Как показали испытания, негерметичность соединений практически не ухудшает эксплуатационные характеристики уплотнений. При этом толщину листа b в соответствии с разработанной технологией следует выбирать в пределах $0,5 \text{ мм} \leq b \leq 1,5 \text{ мм}$, которые не являются жесткими, и при необходимости их можно расширить. Модели уплотнений для проведения экспериментов на кафедре паровых и газовых турбин МЭИ изготавливались из стального листа толщиной $b = 0,6$ мм.

Технология ОПЗ МЭИ позволяет выдерживать все размеры, указанные на рис. 2, а также диаметры, радиальные и осевые зазоры в диапазонах, принятых в турбостроении. Шаг S можно выполнить переменным по длине, а шаг S_1 — по окружности уплотнения. Первая испытанная конструкция прямоугольно-ячеистых уплотнений состояла из ячеек, где $S = S_1 = 4,4$ мм и $d_n = 3,8$ мм.

На рис. 3 показаны прямоугольно-ячеистые статорные вставки, изготовленные ОПЗ МЭИ, и сотовая вставка с шестиугольной ячейкой ($d_n = 0,9$ мм) производства ООО «НПП АРМС».

Эксперименты, проведенные на стенде «ДМУ», позволили сравнить по расходным и силовым характеристикам уплотнения с сотовыми вставками, изготовленные ООО «НПП

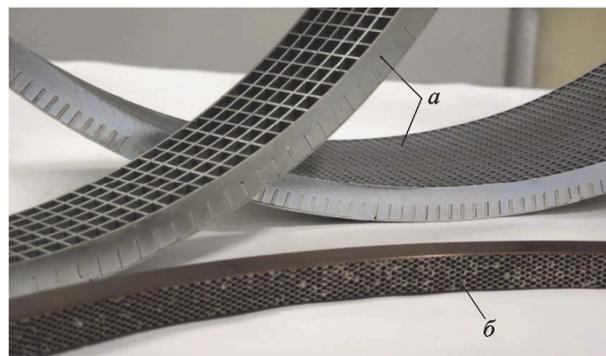


Рис. 3. Внешний вид:
а — разных прямоугольно-ячеистых статорных вставок;
б — сотовой вставки с шестиугольной ячейкой ($d_n = 0,9$ мм)

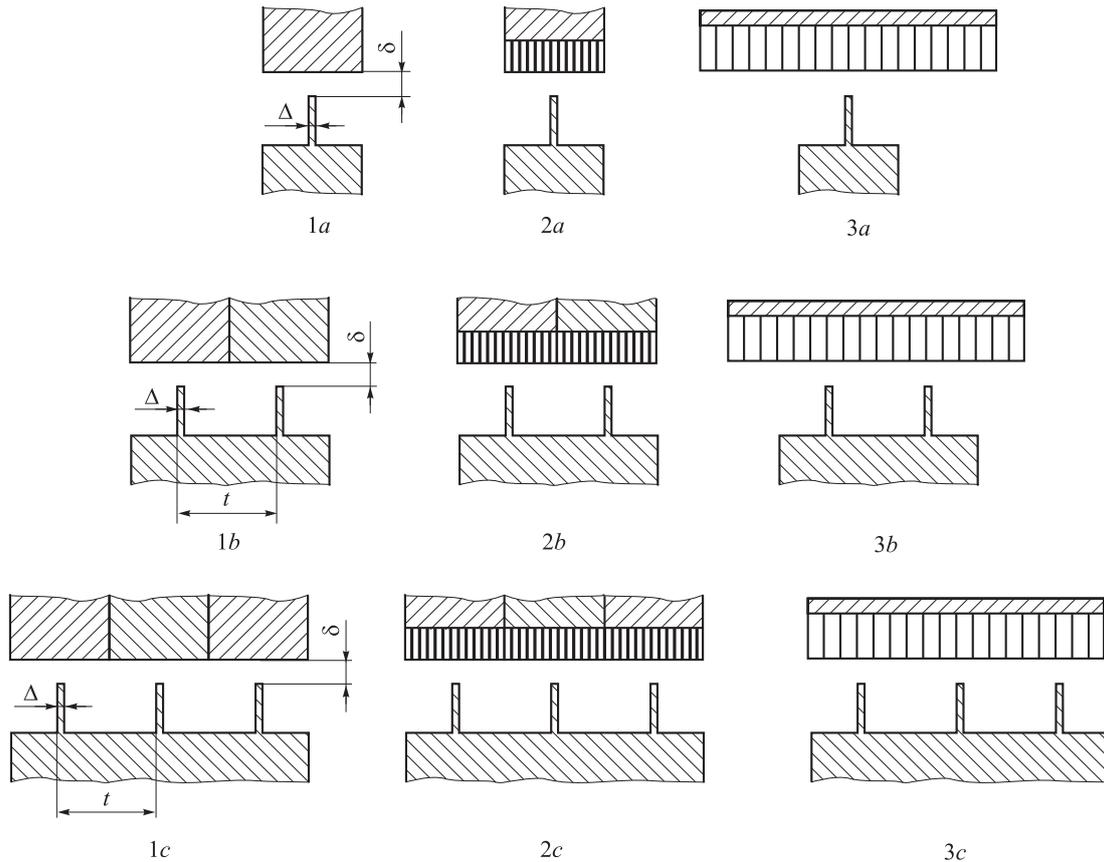


Рис. 4. Конфигурации исследованных моделей уплотнений:

1a–1c — гладкий статор; 2a–2c — статор с сотовой ячейкой ($d_n = 0,9$ мм) производства ООО «НПП АРМС»;
3a–3c — статор с квадратной ячейкой ($d_n = 3,8$ мм), разработанный НИУ «МЭИ»

АРМС», и уплотнения с прямоугольно-ячеистыми статорными вставками, разработанные НИУ «МЭИ».

Конфигурации исследованных моделей уплотнений представлены на рис. 4, а результаты сравнительных экспериментальных исследований — на рис. 5 и 6. Коэффициент расхода

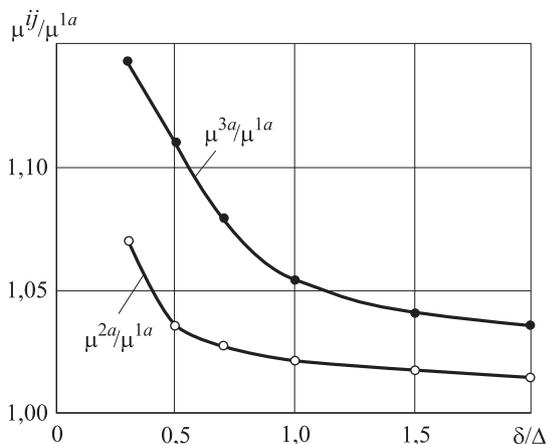


Рис. 5. Зависимость относительного коэффициента расхода одногребенчатых уплотнений от относительного радиального зазора δ/Δ

μ^{ij} и жесткость неконсервативной возмущающей аэродинамической силы D_H^{ij} определяли по методикам, приведенным в работах [7] и [8] соответственно. Верхние индексы « ij » у коэффициентов расхода и жесткостей сил соответствуют обозначениям уплотнений, показанным на рис. 4 ($i = 1, 2, 3; j = a, b, c$), где Δ — толщина гребня, равная во всех экспериментах 1 мм. Относительные коэффициенты расхода для сотовых и прямоугольно-ячеистых вставок определяли по отношению к коэффициентам расхода аналогичных уплотнений с гладкими статорными частями.

Как видно из рис. 5, значения отношения коэффициентов расхода μ^{2a}/μ^{1a} и μ^{3a}/μ^{1a} близки и различаются на 7 % при $\delta/\Delta = 0,3$ и на 2 % при $\delta/\Delta = 2,0$. Однако для верхней кривой (μ^{3a}/μ^{1a}) диаметр вписанной в ячейку окружности ($d_n = 3,8$ мм) более чем в 4 раза превосходит этот параметр ($d_n = 0,9$ мм) для нижней кривой (μ^{2a}/μ^{1a}).

Аналогичные результаты были получены для двух- (μ^{2b}/μ^{1b} и μ^{3b}/μ^{1b}) и трехгребенчатых уплотнений (μ^{2c}/μ^{1c} и μ^{3c}/μ^{1c}). Наибольшая раз-

ница между расходными параметрами, наблюдавшаяся в области малых относительных зазоров ($\delta/\Delta \sim 0,3$), составила 3...7 %. В области больших относительных зазоров ($\delta/\Delta \sim 2,0$) коэффициенты расхода для всех сравниваемых уплотнений оказались практически одинаковыми и не отличались от таковых для аналогов с гладкими статорными вставками.

Таким образом, установлено, что в исследованном диапазоне относительных зазоров δ/Δ расходные характеристики сотовых и прямоугольно-ячеистых конструкций имеют очень незначительное различие.

Совершенствование технологии, применяемой на ОПЗ МЭИ, в том числе внедрение системы качества, позволило изготовить ячеистое уплотнение с прямоугольной ячейкой, где $d_n = 2,4$ мм, что делает такую конструкцию по расходным характеристикам почти полностью идентичной сотовой.

Как показано на рис. 6, и для двух-, и для трехгребенчатых уплотнений в области $\delta/\Delta \geq 1,0$ жесткости неконсервативных сил для уплотнений с гладкой, сотовой и прямоугольно-ячеистой поверхностями практически одинаковы. В области малых относительных зазоров при $\delta/\Delta \sim 0,5$ для всех исследованных типов уплотнений зафиксирован максимум значения жесткости неконсервативной аэродинамической силы. При этом наибольшее значение D_n^{jj} соответствует традиционным уплотнениям с гладкими стенками.

Из рис. 6 следует, что жесткости неконсервативной аэродинамической силы для прямоугольно-ячеистых уплотнений D_n^{3j} во всем диапазоне $0,3 \leq \delta/\Delta \leq 1,5$ ниже, чем у со-

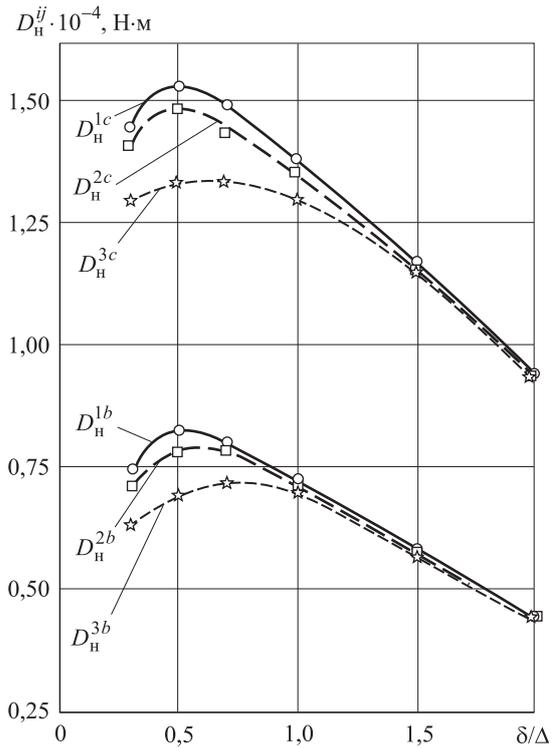


Рис. 6. Зависимость жесткостей неконсервативных аэродинамических сил для двух- и трехгребенчатых уплотнений от относительного радиального зазора δ/Δ

вых D_n^{2j} , а в области максимума значения D_n^{3j} меньше D_n^{2j} на 12 %.

Представленная на рис. 2 конструкция статорной части уплотнения не исчерпывает возможных разновидностей конфигураций прямоугольно-ячеистых уплотнений, способных решать задачу снижения неконсервативной возмущающей аэродинамической силы. На рис. 7 изображена статорная часть уплотнения

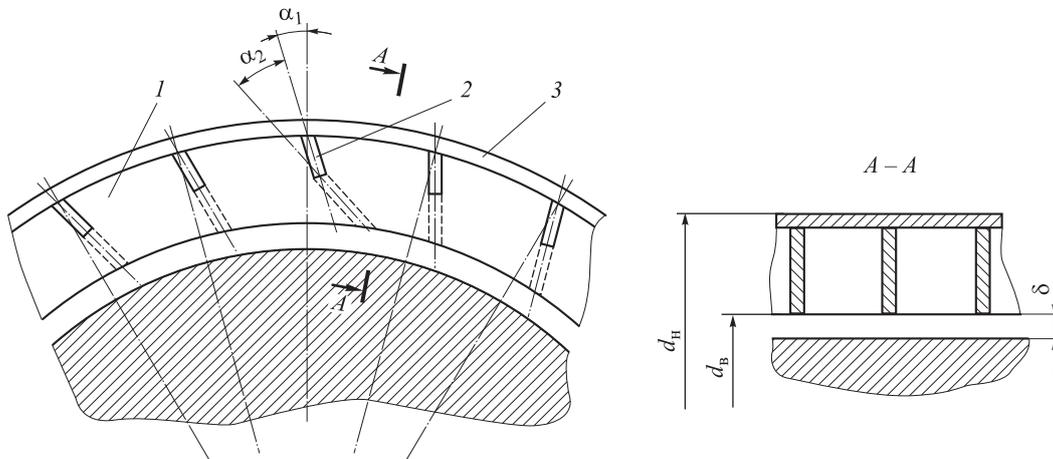


Рис. 7. Ячеистая конструкция с наклонными пластинами:
1-3 — детали (см. рис. 2)

с наружным d_n и внутренним d_v диаметрами, где деталь 2 способна образовывать различные формы ячеек. При этом углы α_1 и α_2 могут быть заданы в широких пределах, а угол α_2 к тому же будет изменяться при задевании ротора о статор, тем самым уменьшая усилие взаимного контакта.

На кафедре паровых и газовых турбин МЭИ проведено исследование конструкции, в которой углы $\alpha_1 = \alpha_2 = 45^\circ$, а статорная часть изготовлена из стального листа толщиной $b = 0,6$ мм. Результаты экспериментов показали, что по экономичности и виброустойчивости приведенная на рис. 7 конструкция ничем не уступает той, что изображена на рис. 2, представляющей собой по сути ее частный случай при $\alpha_1 = \alpha_2 = 0^\circ$.

Другая разновидность прямоугольно-ячеистой статорной конструкции показана на рис. 8, где между гребешками роторной части надбандажного уплотнения расположены отогнутые на угол α пластины (части стального листа).

При модернизации паровых турбин замена действующих уплотнений на изготовленные по технологии НИУ «МЭИ» является эффективной, простой и, главное, малозатратной мерой повышения их виброустойчивости. По оценке экономистов НИУ «МЭИ», стоимость прямо-

угольно-ячеистой статорной части уплотнения, выполненной по такой технологии, в 6–8 раз меньше, чем у аналогичной по размерам традиционной сотовой конструкции.

Очевидно, что использование предлагаемых прямоугольно-ячеистых статорных частей в сочетании с многогребенчатыми роторами превращает конструкции в хорошо известные разношаговые многогребенчатые уплотнения [9].

Разработанная в НИУ «МЭИ» технология позволяет достаточно просто формировать разнообразные конфигурации уплотнений. Например, для повышения экономичности предлагается конструкция, изображенная на рис. 9, где лепестковые гребешки отогнуты навстречу потоку на необходимый угол, что, как известно, снижает коэффициент расхода. Кроме того, такая статорная часть позволяет устанавливать меньшие зазоры δ , поскольку при задевании ротора о статор лепестки будут легко пружинить.

Важной особенностью всех этих конструкций является отсутствие токарных операций. Вследствие простоты и дешевизны прямоугольно-ячеистых статорных элементов их можно рекомендовать к применению в качестве сменных частей уплотнений при выполнении ремонтных

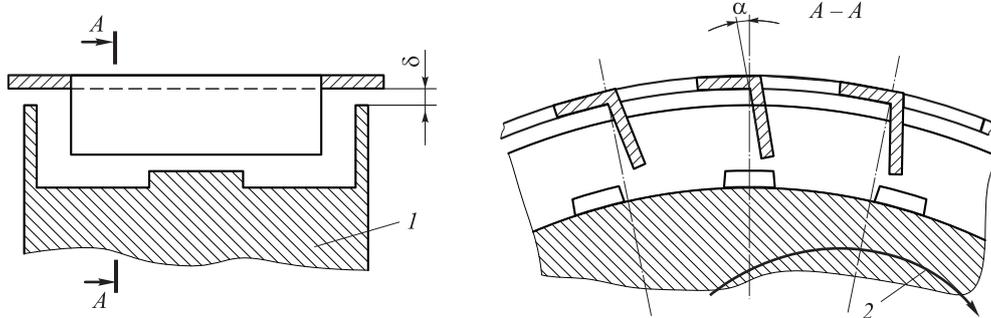


Рис. 8. Вставка надбандажного уплотнения для повышения виброустойчивости: 1 — ротор; 2 — направление вращения

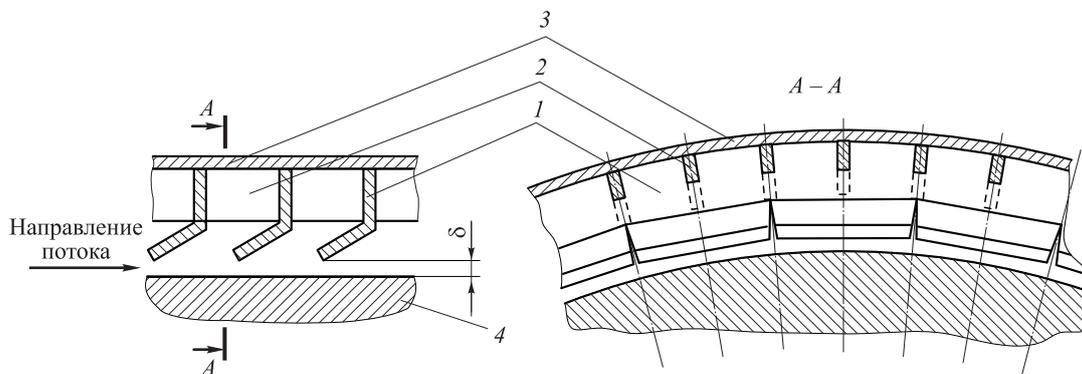


Рис. 9. Ячеистая вставка для повышения экономичности уплотнения: 1–3 — детали (см. рис. 2); 4 — ротор

работ и модернизации турбин. Предлагаемые статорные конструкции предназначены для использования в концевых, диафрагменных и надбандажных уплотнениях турбомашин в среде высокотемпературного перегретого пара, влажного пара, а также в газовой среде.

Статорные части можно выполнять в виде сегментов, с горизонтальным разъемом либо без такового и устанавливать в расточках корпуса или в соответствующих стандартных обоймах.

Выводы

1. Экспериментальные стенды, созданные на кафедре паровых и газовых турбин НИУ «МЭИ», могут быть применены для отработки любых конструкций уплотнений паровых турбин.

2. Результаты испытаний на стенде «ДМУ» показали возможность использования рассмотренного типа уплотнений для повышения экономичности и виброустойчивости турбоагрегатов при их реконструкциях и ремонтах.

Литература

- [1] Салихов А.А., Юшка М.П., Ушинин С.В. Применение сотовых уплотнений на турбинах. *Электрические станции*, 2005, № 6, с. 22–26.
- [2] Ушинин С.В. Опыт внедрения сотовых уплотнений в паровых турбинах. *Электрические станции*, 2009, № 10, с. 8–14.
- [3] Жуков С.В., Кистойчев А.В., Шапошников К.В., Урьев Е.В. Анализ использования сотовых уплотнений в конструкциях паровых турбин. *Электрические станции*, 2013, № 2, с. 27–31.
- [4] Буглаев В.Т., Перевезенцев В.Т., Перевезенцев С.В., Даниленко Д.В., Карташов А.Л., Клинецов А.А. *Сотовые уплотнения в турбомашинках*. Брянск, БГТУ, 2006. 186 с.
- [5] Костюк А.Г., Грибин В.Г., Петрунин Б.Н., Лисянский А.С., Горлицын К.В., Ушинин С.В. Практический опыт внедрения сотовых надбандажных уплотнений на турбоагрегатах мощностью 60÷800 МВт. *Повышение надежности и эффективности эксплуатации электрических станций и энергетических систем. Труды II Всерос. науч.-практ. конф.*, Москва, НИУ «МЭИ», 2012, с. 192–196.
- [6] Грибин В.Г., Лемешков С.В., Дмитриев С.С., Петрунин Б.Н., Наумов В.В. *Уплотнение паровой турбины*. Пат. 138107 РФ, 2014, бюл. № 6.
- [7] Костюк А.Г., Фролов В.В., Булкин А.Е., Трухний А.Д. *Паровые и газовые турбины для электростанций*. Москва, Издательский дом МЭИ, 2008. 556 с.
- [8] Костюк А.Г. *Динамика и прочность турбомашин*. Москва, Издательский дом МЭИ, 2007. 474 с.
- [9] Костюк А.Г., Петрунин Б.Н. Сравнительные расходные и динамические характеристики радиальных и радиально-осевых лабиринтных уплотнений турбомашин. *Вестник МЭИ*, 1999, № 1, с. 45–47.

References

- [1] Salikhov A.A., Iushka M.P., Ushinin S.V. Primenenie sotovykh uplotnenii na turbinakh [The use of honeycomb seals for turbine applications]. *Elektricheskie stantsii* [Power Technology and Engineering]. 2005, no. 6, pp. 22–26.
- [2] Ushinin S.V. Opyt vnedreniia sotovykh uplotnenii v parovykh turbinakh [The experience on introduction of comb seals in steam turbines]. *Elektricheskie stantsii* [Power Technology and Engineering]. 2009, no. 10, pp. 8–14.
- [3] Zhukov S.V., Kistoichev A.V., Shaposhnikov K.V., Ur'ev E.V. Analiz ispol'zovaniia sotovykh uplotnenii v konstruktssiakh parovykh turbin [Analysis of the constructions and problems study associated with use of honeycomb seals in steam turbines]. *Elektricheskie stantsii* [Power Technology and Engineering]. 2013, no. 2, pp. 27–31.
- [4] Buglaev V.T., Perevezentsev V.T., Perevezentsev S.V., Danilenko D.V., Kartashov A.L., Klintsov A.A. *Sotovyie uplotneniia v turbomashinakh* [Honeycomb seals in turbomachinery]. Briansk, BSTU publ., 2006. 186 p.
- [5] Kostiuk A.G., Gribin V.G., Petrunin B.N., Lisianskii A.S., Gorlitsyn K.V., Ushinin S.V. Prakticheskii opyt vnedreniia sotovykh nadbandazhnykh uplotnenii na turboagregatakh moshchnost'iu 60÷800 MVt [Practical experience of introduction of honey-comb over-

bandaged packings for the turbine units with a capacity of 60÷800 MW]. *Trudy 2 Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Povyshenie nadezhnosti i effektivnosti ekspluatatsii elektricheskikh stantsii i energeticheskikh sistem»* [Proceedings of 2 all-Russian scientific-practical conference «Increasing reliability and efficiency of power plants and energy systems»]. Moscow, NIU MEI publ., 2012, pp. 192–196.

- [6] Gribin V.G., Lemeshkov S.V., Dmitriev S.S., Petrunin B.N., Naumov V.V. *Uplotnenie parovoi turbiny* [Seal steam turbine]. Patent RF no. 138107, 2014.
- [7] Kostyuk A.G., Frolov V.V., Bulkin A.E., Trukhnii A.D. *Parovye i gazovye turbiny dlia elektrostantsii* [Steam and gas turbines for power plants]. Moscow, MEI publ., 2008. 556 p.
- [8] Kostyuk A.G. *Dinamika i prochnost' turbomashin* [Dynamics and strength of turbomachines]. Moscow, MEI publ., 2007. 474 p.
- [9] Kostyuk A.G., Petrunin B.N. *Sravnitel'nye raskhodnye i dinamicheskie kharakteristiki radial'nykh i radial'no-osevykh labirintnykh uplotnenii turbomashin* [Comparative expenditure and dynamic characteristics of radial and radial-axial labyrinth seals of turbomachines]. *Vestnik MEI* [MPEI Vestnik]. 1999, no. 1, pp. 45–47.

Статья поступила в редакцию 14.12.2016

Информация об авторах

ГРИБИН Владимир Георгиевич (Москва) — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Паровые и газовые турбины». ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ» (111250, Москва, Российская Федерация, Красноказарменная ул., д. 14, e-mail: GribinVG@mpei.ru).

ДМИТРИЕВ Сергей Сергеевич (Москва) — кандидат технических наук, доцент, заведующий НИО «Паровые и газовые турбины». ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ» (111250, Москва, Российская Федерация, Красноказарменная ул., д. 14, e-mail: DmitriyevSS@mpei.ru).

ПЕТРУНИН Борис Николаевич (Москва) — кандидат технических наук, ведущий инженер кафедры «Паровые и газовые турбины». ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ» (111250, Москва, Российская Федерация, Красноказарменная ул., д. 14).

ГУСЕВ Антон Андреевич (Москва) — аспирант кафедры «Паровые и газовые турбины». ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ» (111250, Москва, Российская Федерация, Красноказарменная ул., д. 14, e-mail: antoha.gusev@gmail.com).

Information about the authors

GRIBIN Vladimir Georgievich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Department of Steam and Gas Turbines. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education National Research University (111250, Moscow, Russian Federation, Krasnokazarmennaya St., Bldg. 14, e-mail: GribinVG@mpei.ru).

DMITRIEV Sergey Sergeevich (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Head of Research Unit, Department of Steam and Gas Turbines. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education National Research University (111250, Moscow, Russian Federation, Krasnokazarmennaya St., Bldg. 14, e-mail: DmitriyevSS@mpei.ru).

PETRUNIN Boris Nikolaevich (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Leading Engineer, Department of Steam and Gas Turbines. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education National Research University (111250, Moscow, Russian Federation, Krasnokazarmennaya St., Bldg. 14).

GUSEV Anton Andreevich (Moscow) — Postgraduate, Department of Steam and Gas Turbines. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education National Research University (111250, Moscow, Russian Federation, Krasnokazarmennaya St., Bldg. 14, e-mail: antoha.gusev@gmail.com).