

## УНИФИЦИРОВАННЫЕ СОТОВЫЕ УПЛОТНЕНИЯ В ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

УДК 62-762+621.6

П.В. Крылов, к.т.н., ПАО «Газпром» (Санкт-Петербург, РФ)

С.В. Перевезенцев, к.т.н., ПАО «Газпром»

В.Т. Перевезенцев, к.т.н., Брянский государственный технический университет (Брянск, РФ)

М.А. Шилин, к.т.н., Брянский государственный технический университет, max05t@mail.ru

Газоперекачивающие агрегаты относятся к основному оборудованию компрессорных станций, поэтому вопросы усовершенствования их отдельных элементов, в том числе сотовых уплотнений, представляют актуальную и практически важную задачу.

В статье рассмотрены проблемы практического опыта внедрения унифицированных сотовых уплотнений в проточной части газовых турбин отечественного и зарубежного производства. Обсуждаются возможности модернизации уплотнений с анализом особенностей элементов проточной части различного конструктивного исполнения. Приведены результаты экспериментальных и численных исследований течения газа в сотовых уплотнениях с целью оптимизации их конструкции и эффективности с учетом целесообразного минимума номенклатуры частей уплотнений и их надежности.

Показаны необходимость унификации отдельных узлов газоперекачивающих агрегатов и преимущества сотовых уплотнений в качестве альтернативы методу газотермического напыления. Освещен опыт создания уплотнений в Брянском государственном техническом университете, их унификация за счет оптимизации конструкции и способа монтажа. Освещены вопросы технологии изготовления унифицированных сотовых уплотнений, их монтажа и замены при ремонте с обеспечением ремонтпригодности и продления жизненного цикла. Сделан вывод о целесообразности оптимизации и унификации уплотнений с целью получения экономического эффекта и повышения надежности газоперекачивающих агрегатов в период проектирования, изготовления, эксплуатации и ремонта.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** СОТОВЫЕ УПЛОТНЕНИЯ, ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИЙ АГРЕГАТ, УНИФИКАЦИЯ, ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ, ОПТИМИЗАЦИЯ, РЕМОНТОПРИГОДНОСТЬ, ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЕ.

Создание и внедрение в газовой отрасли конкурентоспособного унифицированного инновационного оборудования, изготовленного в рамках концепции импортозамещения, повышения эффективности и надежности эксплуатации газоперекачивающих агрегатов (ГПА), представляет для ПАО «Газпром» одну из актуальных задач в свете стратегии перспективного развития энергетического машиностроения.

Среди основных перспективных направлений научных исследований для решения задач технологического развития и импортозамещения в отрасли следует перечислить: обеспечение надежной эксплуатации и созда-

ние нового газоперекачивающего оборудования; обеспечение агрегатов необходимыми запасными частями и комплектующими для проведения ремонтов; разработку дорожных карт поиска, создания и внедрения современных технологий; развитие научных исследований по обеспечению надежности, совершенствованию газовой динамики и теплообменных процессов в двигателях ГПА и др. [1].

В статье представлены результаты работы по выявлению ремонтируемой импортной продукции, анализ среднегодовой потребности в импортном оборудовании и разработаны мероприятия по замещению его отечественными аналогами, опре-

делению сроков их реализации с учетом ремонтпригодности и возможностей Инженерного центра ООО «Газпромцентрремонт», ООО «Брянский завод «Турборемонт», научно-исследовательской лаборатории кафедры «Турбиностроение» Брянского государственного технологического университета (БГТУ).

### МОДЕРНИЗАЦИЯ И УНИФИКАЦИЯ

Номенклатура ГПА отечественного и зарубежного производства, которые находятся в эксплуатации и ремонте и могут быть оснащены сотовыми уплотнениями в процессе модернизации и ремонта, представлена в таблице [2]. В данном списке, несмотря на ограниченную

**Krylov P.V.**, Candidate of Sciences (Engineering), Gazprom PJSC (Saint Petersburg, Russian Federation)

**Perevezentsev S.V.**, Candidate of Sciences (Engineering), Gazprom PJSC

**Perevezentsev V.T.**, Candidate of Sciences (Engineering), Bryansk State Technical University (Bryansk, Russian Federation)

**Shilin M.A.**, Candidate of Sciences (Engineering), Bryansk State Technical University, max05t@mail.ru

### Unified honeycomb seals in gas turbine engines

Gas compressor units are related to the main equipment of compressor stations, therefore, the issues of improving their individual components, including honeycomb seals, are of current and practical importance.

The article discusses the problems of practical experience in the implementation of unified honeycomb seals in the flow part of gas turbines of domestic and foreign production. The possibilities of the modernization of seals with the analysis of the features of the elements of the flow part of various designs are discussed. The results of experimental and numerical studies of gas flow in the honeycomb seals with the aim of optimizing their design and efficiency, taking into account the appropriate minimum of the range of seals' parts and their reliability, are presented.

The necessity of unification of individual units of gas compressor units and the advantages of honeycomb seals as an alternative to the method of gas-thermal spraying are shown. The experience of creating seals in the Bryansk State Technical University, their unification by optimizing the design and method of installation, is noted.

The issues of manufacturing technology of unified honeycomb seals, their installation and replacement during repair with ensuring maintainability and extending the life cycle are discussed. It is expedient to optimize and unify the seals in order to obtain an economic effect and increase the reliability of gas compressor units during the design, manufacture, operation and repair periods.

**KEYWORDS:** HONEYCOMB SEALS, GAS COMPRESSOR UNIT, UNIFICATION, INTRODUCTION EXPERIENCE, OPTIMIZATION, REPAIRABILITY, IMPORT SUBSTITUTION.

Номенклатура и число ГПА отечественного и зарубежного производства, находящихся в эксплуатации и ремонте, по данным на 2017 г.

Nomenclature and the number of domestic and foreign gas compressor units in operation and maintenance, according to data on 2017

Тип агрегата Unit type	Число ГПА, шт. Number of the gas compressor units, units
ГТ-750-6 GT-750-6	95
ГТК-10-4 GTK-10-4	633
ГТН-16 GTN-16	72
PGT-10	24
ГТД-4РМ GTD-4RM	26
ГТК-10И GTK-10I	120
ГТК-25И GTK-25I	33
ДГ-90 ГПА-Ц-16С DG-90 GPA-Ts-16S	166
ДН-80 ГПА-25 DN-80 GPA-25	27
ГПА-Ц-6,3 GPA-Ts-6,3	318
LM2500 Коберра LM2500 Coberra	35

выборку, число ГПА превышает 1500 шт., при этом число узлов уплотнений в каждом агрегате составляет около 8–10 шт. (без учета нагнетателей).

В настоящее время особое значение приобретает дальнейшая унификация отдельных узлов турбин, компрессоров, нагнетателей, а также решение вопросов их внедрения при проектировании, производстве, монтаже и ремонте ГПА, в том числе и сотовых уплотнений в проточной части и уплотнений по валу двигателей [2].

Известные преимущества сотовых уплотнений [3] позволяют рассматривать их в качестве альтернативы способу восстановления и уменьшения монтажного зазора методами газотермического напыления поверхностей гладких сегментов обоймы. На рис. 1 представлено мозаичное растрескивание промежуточной обоймы турбины высокого давления (ТВД) в случае задевания торцами рабочих лопаток. На рис. 2 показан сегмент обоймы соплового аппарата второй ступени агрегата PGT-10 компании Nuovo Pignone. Приведенные примеры демонстрируют, что применяемые на-



Рис. 1. Мозаичное растрескивание промежуточной обоймы ТВД в случае задевания торцами рабочих лопаток  
Fig. 1. Mosaic cracking of the intermediate box of the high pressure turbine in case of impact by the ends of the blades



Рис. 2. Сегмент обоймы соплового аппарата второй ступени агрегата PGT-10 компании Nuovo Pignone  
Fig. 2. Segment of box of the nozzle diaphragm of the second stage of the PGT-10 unit of Nuovo Pignone

пыления и покрытия не позволяют добиться полноценного качества прилегания покрытия и избежать появления трещин и отслоений в процессе эксплуатации и ремонта.

Наряду с подшипниками газотурбинных установок уплотнения – наиболее повреждаемые части агрегатов. Ремонт и замена уплотнений требуют относительно ограниченных затрат при условии их максимальной унификации с обеспечением высокой ремонтпригодности [2]. При этом используемая в настоящее время в газовой отрасли номенклатура ГПА весьма обширна, а изношенному оборудованию, в том числе импортному и исчерпавшему свой парковый ресурс, требуется модернизация.

#### РАЗРАБОТКИ БГТУ

Примеры конструктивного выполнения уплотнений в турбинах ГПА отечественного и зарубежного производства, стационарных и конвертированных, с сотовыми или лабиринтовыми уплотнениями, с гребнями и без, а также многие другие подробно рассмотрены в работе [3].

На рис. 3 показан пример практического применения сотовых уплотнений в турбине агрегата ГТ-750-6, которые были разработаны на кафедре «Турбиностроение» БГТУ, изготовлены специалистами предприятия «Рыбинские моторы», прошли испытания на КС «Воскресенск» и показали достаточную эффективность.

Успешный опыт эксплуатации позволил предложить усовершенствованные конструкции уплотнений турбин ГТК-10-4, ГТН-16. С использованием разработок отечественной авиапромышленности, например ГТД-4РМ, можно рекомендовать конструкции сотовых уплотнений для большинства зарубежных ГПА (РГТ-10, ГТК-25И, ГТК-10И, ДГ-90, Коберра и др.). Поверхности колец под уплотнениями перечисленных агрегатов имеют цилиндрическую форму, что позволяет применить относительно простую унифицированную конструкцию сотовых вставок.

Для агрегатов ГТ-750-6 (рис. 3), находящихся в эксплуатации на КС «Воскресенск», в конце 1990-х гг.

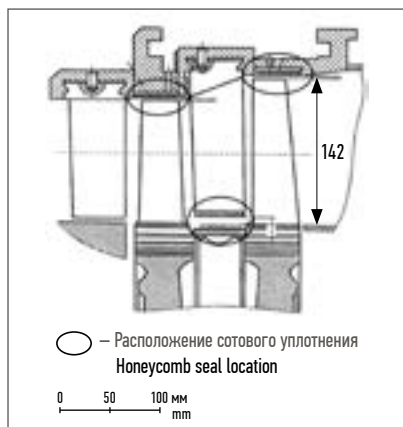


Рис. 3. Проточная часть ГТ-750-6 [6]  
Fig. 3. Flow part of GT-750-6 [6]

были разработаны, смонтированы и прошли испытательный период сотовые уплотнения ТВД, которые показали свою эффективность и надежность [3].

Эффективность унификации при проектировании новых изделий, ремонте, импортозамещении во многом связана с использованием оптимальных конструкций, передовых технологий, разработкой перспективных решений, дальнейшего совершенствования ГПА [2].

В БГТУ спроектированы унифицированные сотовые уплотнения проточных частей агрегатов ГТК-10, ГТН-16, проведены модельные испытания уплотнений с целью оптимизации конструкции и параметров сотовой структуры, определения сравнительных расходных и теплогидравлических характеристик. Испытания проводились на аэродинамических установках, их конструкция и методика исследований приведены в работах [3–5].

Унификация уплотнения возможна по двум параметрам. Во-первых, используется конструкция в виде плоской ленты с сотовой поверхностью на подложке незначительной толщины для обеспечения гибкости. Во-вторых, возможен способ монтажа сотовых вставок, при котором плоская лента приобретает цилиндрическую форму практически любого радиуса за счет протягивания (проталкивания) ее в кольцевой

паз, выполненный в корпусе уплотнения (обойме) (рис. 4).

В случае унификации будет сокращена номенклатура и уменьшена разнотипность составных частей уплотнения, что приведет к единообразию способов их изготовления, сборки и ремонта.

#### СОЗДАНИЕ И СБОРКА

Создание сотовых вставок – трудоемкий высокотехнологический процесс, включающий высокотемпературную пайку и придание им определенной формы. Сборка вставок осуществляется путем набора в обойме с различными размерами пазов и разной величиной – от диаметра вала турбины до периферийных размеров рабочих лопаток.

Предполагаемая унификация исключает предварительный изгиб сотовых вставок, а также токарные или шлифовальные операции с высокими допусками на размеры. Протягивание в пазах деформирует тонкие подложки с учетом необходимого зазора для перемещения вставок в радиальном направлении в случае контакта с вращающимися частями ротора турбины. Вставки фиксируются в рабочем положении упругими пружинами, установленными в корпусе обоймы [6].

Практическая унификация процесса монтажа сотовых вставок опробована на модели приспособления в широком диапазоне величин диаметров посадочных мест вставок  $d$  от 190 до 1500 мм. На иллюстрациях представлены схема (рис. 4а) и фото (рис. 4б) приспособления для монтажа реальной вставки турбины агрегата типа «Дон» (модернизированный ГПА типа ГТ-750-6), а также схемы цилиндрических вставок различного диаметра (рис. 5).

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Следует отметить, что сотовые уплотнения в газовых турбинах авиационных двигателей применялись с начала 1960-х гг.

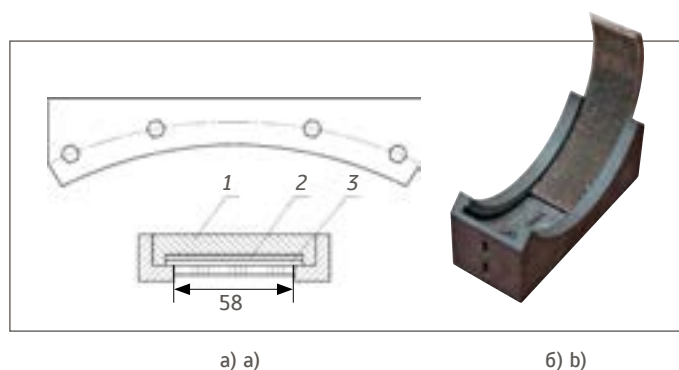


Рис. 4. Приспособление для придания сотам вставкам изогнутой формы: а) схема, где 1 – корпус; 2 – прокладка; 3 – вставка; б) внешний вид

Fig. 4. Device for curving honeycomb inserts: a) scheme, where 1 – case; 2 – gasket; 3 – insert; б) external view

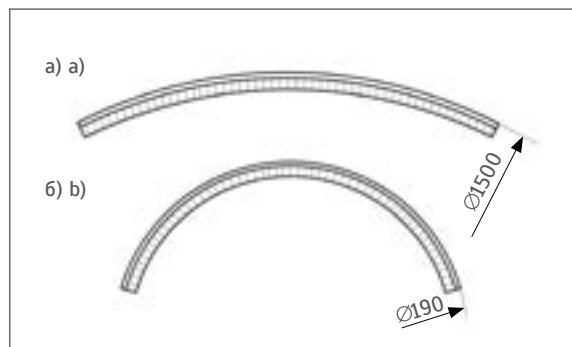


Рис. 5. Сотовые вставки различных диаметров: а) вставка Ø1500 мм; б) вставка Ø190 мм

Fig. 5. Honeycomb inserts of various diameters: а) insert of Ø1500 mm; б) insert of Ø190 mm

Но некоторые газодинамические эффекты при течении газа в каналах с сотовой поверхностью не находили научного обоснования.

На кафедре «Турбиностроение» БГТУ в середине 1980-х гг. по предложению И.И. Кириллова начались работы, направленные на оптимизацию конструктивных параметров сотовой структуры уплотнений, изучение взаимного влияния на расходные характеристики и газодинамику течения: диаметра ячеек  $d_{я}$ , мм; глубины (высоты) ячеек  $h_{я}$ , мм; зазора в уплотнении  $\delta$ , мм; длины поверхности уплотнения  $l$ , мм; наличия или отсутствия гребней (гладкие уплотнения); сравнение с другими видами уплотнений.

Результаты экспериментов позволили обосновать оптимальные соотношения размеров, сформулировать условия практического применения сотовых уплотнений не только в газовых турбинах, но и в паровых, в частности в турбинах атомных электрических станций (АЭС) [7]. Сотовые уплотнения внедрены и успешно эксплуатируются на турбинах Смоленской и Воронежской АЭС. Промышленное применение и практический опыт дали толчок для дальнейшего совершенствования перспективных уплотнений [7–9].

Проведенные сравнительные испытания различных видов уплотнений показаны на рис. 6 (плоская статическая модель) и подробно рассмотрены в рабо-

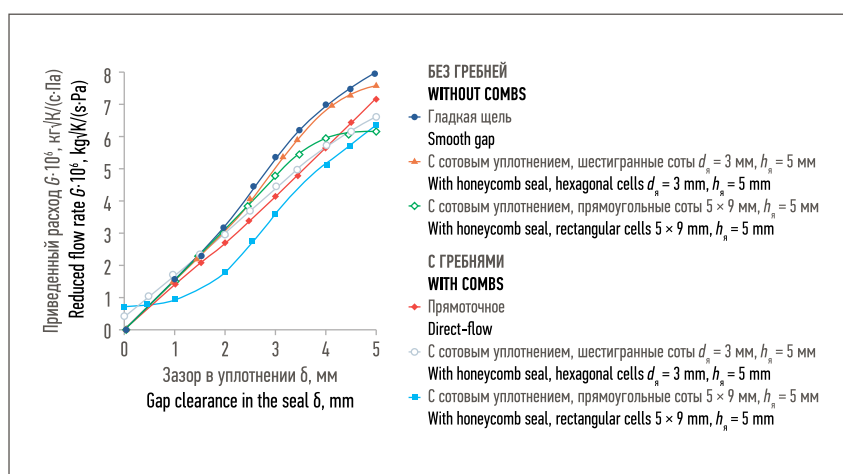


Рис. 6. Результаты экспериментальных исследований расходных характеристик уплотнений различной конструкции

Fig. 6. Results of experimental studies of the flow characteristics of seals of various designs

тах [3–5, 10]. Результаты экспериментальных исследований расходных характеристик уплотнений подтверждаются численным моделированием в ANSYS [11].

Существенно различаются расходные характеристики сотовых уплотнений с гребнями и сотовых гладких уплотнений для двух областей по величине зазора  $\delta$ . При малых зазорах с  $\delta < 1,0\text{--}1,5 \text{ мм}$  сотовые уплотнения с гребнями позволяют значительно уменьшить зазор, допуская врезание гребней в сотовую структуру без разрушения и потери надежности. При зазорах с  $\delta > 2 \text{ мм}$  допускается применение сотовых уплотнений при условии оптимизации их конструктивных параметров. Например, зарегистрирован яв-

ный минимум расхода утечки при соотношении  $h_{я}/d_{я} = 0,2\text{--}0,3$  (рис. 7) [3].

Необходимы дальнейшие исследования поверхностей вставок с прямоугольными сотами (см. рис. 6), открывающие перспективы их практического использования при значительном упрощении конструкции и уменьшении стоимости изготовления в 6–8 раз [9] по сравнению с шестигранными сотами.

Для высоконапорных, быстроходных турбин с гибким валом необходимо исследование влияния неконсервативных сил в уплотнениях с минимальными зазорами [7–9, 12, 13].

В настоящий момент номенклатура лабиринтных (сотовых)



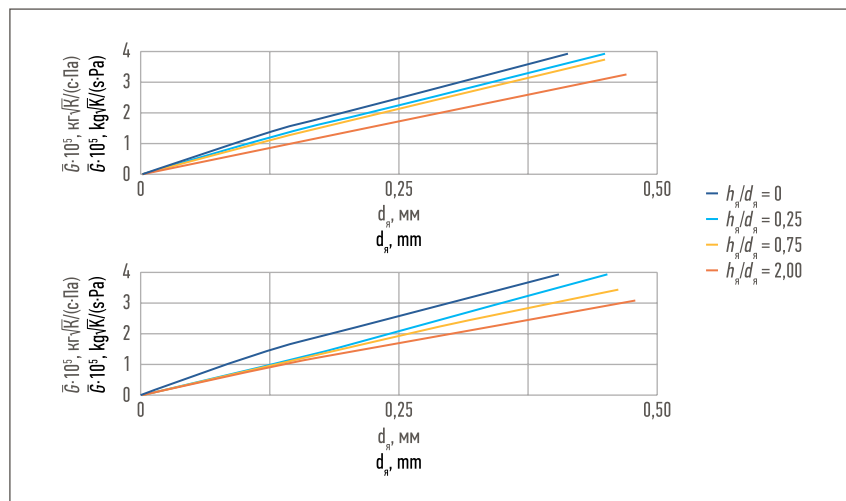


Рис. 7. Зависимость приведенного расхода от относительной величины радиального зазора: а) уплотнение без гребней; б) уплотнение с гребнями  
Fig. 7. Dependence of the reduced flow rate on the relative size of the radial gap: a) seal without combs; b) seal with combs

уплотнений турбин и компрессоров газотурбинных двигателей устанавливается стандартом ОСТ 1 12605–76 [14], предлагающим варианты конструктивных параметров сотовой структуры. Допускается составлять сотовые вставки из отдельных элементов и их наборов.

#### ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ

Материал сотовой вставки – лента из стали 12Х18Н10Т-М для деталей, работающих до температуры 600 °С, и лента из сплава ХН78Т для деталей с температурой свыше 600 °С.

Высокие температуры в современных газотурбинных двигателях и возможность засорения сот продуктами сгорания предполагают охлаждение и очистку сотовых вставок, пружин, периферии проточной части, включая корпусные детали и концевые части рабочих лопаток, продувкой охлаждающего воздуха через отверстия в сотах.

На рис. 8 представлена сотовая вставка турбины агрегата LM2500 Коберра, требующая замены из-за разрушения сотовой структуры в результате касания лопаток (или воздействия инородных тел). Также на представленном образце

заметны следы обгорания и засорения сотовой структуры продуктами сгорания (см. рис. 8).

Сотовая структура позволяет организовать относительно простой и эффективный способ подачи охлаждающего воздуха через сотовые вставки в проточную часть высокотемпературной турбины аналогично пористому охлаждению.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Опыт проектирования, исследований и внедрения сотовых уплотнений позволяет сделать вывод об их эффективности, ремонтопригодности, надежности и перспективности в отечественных и зарубежных ГПА.

Практическое использование сотовых уплотнений зависит от степени решения следующих проблем.



Рис. 8. Сотовая вставка турбины агрегата LM2500 Коберра  
Fig. 8. Honeycomb insert of a turbine of the LM2500 Coberra unit

С целью унификации необходимо использовать опыт проектных и научно-исследовательских работ по определению расходных характеристик, оптимизации конструктивных параметров и формы сотовой структуры для гладких уплотнений и уплотнений с гребнями, а также опыт внедрения сотовых уплотнений в паровых и газовых турбинах. Следует учитывать величину назначенного монтажного зазора и динамику его изменения в процессе эксплуатации. Необходимы обязательные испытания на динамических (вращающихся) моделях с определением динамических характеристик (жесткости уплотнений, резонансных явлений в ячейках сот).

Опыт использования сотовых уплотнений в паровых турбинах показал их эффективность, значительный экономический эффект, а также надежность в эксплуатации и ремонтопригодность.

#### ПРИМЕРЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

В 2011 г. сотовые надбандажные уплотнения были установлены на блоке К-800-240-5 Пермской ГРЭС. При этом монтажные радиальные зазоры были уменьшены в среднем с 2,5 до 0,8–1,0 мм. Увеличение относительного внутреннего КПД цилиндра высокого давления (ЦВД) составило 0,6 %, что эквивалентно увеличению мощности цилиндра на 1,9 МВт [8].

По расчетам ЗАО «УТЗ» и ОАО «ВТИ», установка сотовых надбандажных уплотнений в ЦВД турбины Т-250/300-240 ТЭЦ-21 (ОАО «Мосэнерго») повысила относительный внутренний КПД цилиндра на 0,7–1,0 %. Установка концевых сотовых уплотнений в ЦСД-2 и цилиндр низкого давления (ЦНД), кроме улучшения маневренности турбоагрегата и сокращения времени пусковых операций, увеличивает КПД блока на 0,17 % на конденсационном режиме без негативного влияния на виброустойчивость [8].

В разработке, испытаниях и внедрении сотовых уплотнений в турбинах АЭС принимали участие сотрудники кафедры «Турбиностроение» БГТУ. Оснащение турбин сотовыми уплотнениями энергоблоков № 1 и 2 Смоленской АЭС (2012–2013 гг.) обеспечило прирост мощности: 1,5 МВт на турбогенераторе ТГ-1; 0,9 МВт на турбогенераторе ТГ-3. При сроке эксплуатации в 10–12 лет это соответствует экономии денежных средств в 100–140 млн руб.

Аналогичные результаты получены при внедрении сотовых уплотнений на турбогенераторе ТГ-14 Нововоронежской АЭС (2014 г.). Прирост мощности составил 0,7 МВт с ожидаемым экономическим эффектом в 130 млн руб. в период эксплуатации.

Имеется также положительный опыт проектирования, исследования сотовых уплотнений в турбине двигателя ГТ-750-6, в результате которого они были внедрены на ГПА КС «Воскресенск», повышен

КПД ТВД на 1 % с соответствующим экономическим эффектом [3].

Предварительные расчеты показывают, что унификация уплотнений при широкой номенклатуре ГПА с учетом сокращения расходов при проектировании, изготовлении, монтаже и ремонте дает значительный экономический эффект и повышает надежность газотурбинных двигателей, в частности приводных двигателей для ГПА. ■

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Крылов П.В. Импортозамещение в газовой отрасли // Энергетическая безопасность и развитие ТЭК [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docplayer.ru/77747390-Pavel-valerevich-krylov.html> (дата обращения: 23.11.2018).
2. Крылов П.В., Перевезенцев С.В., Перевезенцев В.Т., Шилин М.А. Актуальность задачи унификации и оптимизации уплотнений в газотурбинных двигателях // Газовая промышленность. 2017. № 11. С. 56–61.
3. Буглаев В.Т., Перевезенцев В.Т., Перевезенцев С.В. и др. Сотовые уплотнения в турбомашине. Брянск: БГТУ, 2006. 192 с.
4. Буглаев В.Т., Перевезенцев В.Т., Шилин М.А. Экспериментальные исследования гидравлических сопротивлений в канале с сотовой структурой // Вестник БГТУ. 2012. № 3. С. 84–89.
5. Буглаев В.Т., Перевезенцев В.Т., Шилин М.А., Шкодин В.М. Экспериментальное исследование теплообмена в канале с сотовой структурой // Вестник БГТУ. 2013. № 1. С. 72–79.
6. Патент на полезную модель № 2017119976. Унифицированное сотовое уплотнение турбомшины [Электронный ресурс]. Режим доступа: ограниченный.
7. Перевезенцев В.Т., Шилин М.А. Итоги и перспективы внедрения сотовых уплотнений в турбинах АЭС // Совершенствование конструкции элементов турбоустановок. Брянск: БГТУ, 2010. С. 63–69.
8. Костюк А.Г., Грибин В.Г., Петрунин Б.Н. и др. Практический опыт внедрения сотовых надбандажных уплотнений на турбоагрегатах мощностью 60–800 МВт // Труды II Всероссийской научно-практической конференции «Повышение надежности и эффективности эксплуатации электрических станций и энергетических систем». М.: МЭИ, 2012. С. 192–196.
9. Грибин В.Г., Дмитриев С.С., Петрунин Б.Н., Гусев А.А. Прямоугольно-ячеистые уплотнения для паровых турбин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2017. № 3. С. 22–29.
10. Методика 76–87. Расчет газодинамической эффективности лабиринтных уплотнений газотурбинных двигателей в статических условиях [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.1bm.ru/techdocs/kgs/ost/235/info/46376/> (дата обращения: 23.11.2018).
11. ANSYS. 3D Design [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.ansys.com/products/3d-design> (дата обращения: 23.11.2018).
12. Жуков С.В., Кисточев А.В., Шапошников К.В., Урьев Е.В. Анализ использования сотовых уплотнений в конструкциях паровых турбин // Электрические станции. 2013. № 2. С. 27–31.
13. Марцинковский В.А. Шелевые уплотнения. Теория и практика. Сумы: Издательство СумГУ, 2005. 416 с.
14. OST 1 12605–76. Уплотнения лабиринтные газовые и воздушные. Конструкция и размеры [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.1bm.ru/techdocs/kgs/ost/241/info/24012/> (дата обращения: 23.11.2018).

#### REFERENCES

1. Krylov P.V. Import Substitution in the Gas Industry. Energy Security and Development of the Fuel and Energy Complex [Electronic source]. Access mode: <https://docplayer.ru/77747390-Pavel-valerevich-krylov.html> (access date: November 23, 2018). (In Russian)
2. Krylov P.V., Perevezentsev S.V., Perevezentsev V.T., Shilin M.A. Urgency of the Problem of Unifying and Optimizing Seals in the Gas Turbine Engines. 'Gazovaya promyshlennost' = Gas Industry, 2017, No. 11, P. 56–61. (In Russian)
3. Buglaev V.T., Perevezentsev V.T., Perevezentsev S.V., et al. Honeycomb Seals in Turbomachines. Bryansk: Bryansk State Technical University, 2006, 192 p. (In Russian)
4. Buglaev V.T., Perevezentsev V.T., Shilin M.A. Experimental Studies of Hydraulic Resistance in the Channel with a Honeycomb Structure. Vestnik BGTU = Bulletin of the Bryansk State Technical University, 2012, No. 3, P. 84–89. (In Russian)
5. Buglaev V.T., Perevezentsev V.T., Shilin M.A., Shkodin V.M. Experimental Research of Heat Transfer in the Channel with Honeycomb Structure. Vestnik BGTU = Bulletin of the Bryansk State Technical University, 2013, No. 1, P. 72–79. (In Russian)
6. Patent for Utility Model No. 2017119976. Unified Honeycomb Seal Turbomachine [Electronic source]. Access mode: limited.
7. Perevezentsev V.T., Shilin M.A. Results and Prospects of the Introduction of Honeycomb Seals in the Turbines of Nuclear Power Plants. Improving the Design of Elements of Turbine Plants. Bryansk, Bryansk State Technical University, 2010, P. 63–69. (In Russian)
8. Kostyuk A.G., Gribin V.G., Petrunin B.N., et al. Practical Experience in the Implementation of Honeycomb Over-Strip Seals in the Turbine Generating Units with a Capacity of 60–800 MW. Proceedings of the 2nd All-Russian Scientific and Practical Conference "Improving the Reliability and Efficiency of Operation of Power Plants and Energy Systems". Moscow, Moscow Power Engineering Institute, 2012, P. 192–196. (In Russian)
9. Gribin V.G., Dmitriev S.S., Petrunin B.N., Gusev A.A. Rectangular-Cellular Seals for Steam Turbines. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie = News of Universities. Engineering, 2017, No. 3, P. 22–29. (In Russian)
10. Methods 76–87. Calculation of the Gas-Dynamic Efficiency of Labyrinth Seals of Gas Turbine Engines in Static Conditions [Electronic source]. Access mode: <http://www.1bm.ru/techdocs/kgs/ost/235/info/46376/> (access date: November 23, 2018). (In Russian)
11. ANSYS. 3D Design [Electronic source]. Access mode: <https://www.ansys.com/products/3d-design> (access date: November 23, 2018).
12. Zhukov S.V., Kistoychev A.V., Shaposhnikov K.V., Uriev E.V. Analysis of the Constructions and Problems Study Associated with Use of Honeycomb Seals in Steam Turbines. Elektricheskie stantsii = Power stations, 2013, No. 2, P. 27–31. (In Russian)
13. Martsinkovskiy V.A. Slot Seals. Theory and Practice. Sumy, Publishing House of the Sumy State University, 2005, 416 p. (In Russian)
14. Industrial Standard OST 1 12605–76. Labyrinth Gas and Air Seals. Design and Dimensions [Electronic source]. Access mode: <http://www.1bm.ru/techdocs/kgs/ost/241/info/24012/> (access date: November 23, 2018).