

АКТУАЛЬНОСТЬ ЗАДАЧИ УНИФИКАЦИИ И ОПТИМИЗАЦИИ УПЛОТНЕНИЙ В ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

УДК 62-762+621.6

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

С.В. Перевезенцев, ПАО «Газпром»

В.Т. Перевезенцев, Брянский государственный технический университет (БГТУ) (Брянск, РФ)

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

В статье рассматриваются проблемы унификации и оптимизации уплотнений в проточной части отечественных и зарубежных газоперекачивающих агрегатов различных типоразмеров.

Унификация отдельных узлов и деталей опирается на научно обоснованный метод отбора и регламентации оптимальной и ограниченной номенклатуры газоперекачивающих агрегатов, который в дальнейшем может быть применен к расширенному списку агрегатов, охватывающему в том числе газоперекачивающие агрегаты по Программе импортозамещения.

На примере внутриразмерной унификации базовой модели в рамках рассмотрения одного типоразмера может быть спрогнозирована межразмерная (межвидовая, межпроектная) унификация изделий различных типов.

В статье проанализированы элементы методики унификации и способы совершенствования сотовых уплотнений с использованием практического опыта исследований и внедрения их в различных турбомашинах.

Вопрос модернизации сотовых уплотнений рассматривается в комплексе, обеспечивающем надежность, экономичность, ресурс и ремонтпригодность. В статье также отражено, что значимыми проблемами унификации сотовых уплотнений являются подбор материалов и современная технология изготовления.

Наконец, в целях оптимального проектирования разрабатывается методика расчета утечек в уплотнении, прочностных характеристик, в особенности устойчивости сотовой структуры при возможном касании деталей ротора, динамических воздействиях на элементы вращающегося ротора.

С проблемой прочности тесно связаны задачи выбора толщины стенки сотовой структуры.

В частности, в целях облегчения условий врезания толщина ленты, из которой выполняются соты, равна 0,05 мм. Для более крупных ячеек при воздействии повышенных температур толщина стенки может достигать 0,2–0,3 мм.

Кроме того, в современных газотурбинных установках температура газа может составлять 1200–1300 °С и более, в связи с чем возникает проблема охлаждения сотовой структуры, подбора материала сотоблоков, качества сотовой поверхности.

Таким образом, подбор критериев оптимизации при унификации элементов конструкции газоперекачивающих агрегатов представляется важной комплексной проблемой.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: УНИФИКАЦИЯ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ (ГПА), КОНСТРУКЦИЯ УПЛОТНЕНИЙ, СОТОВЫЕ УПЛОТНЕНИЯ, СНИЖЕНИЕ ЗАТРАТ, ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЕ.

Большую роль в обеспечении эффективного и безопасного функционирования, а также дальнейшего расширения Единой системы газоснабжения играет оптимизация комплекса проектных работ, производства основного и вспомогательного оборудования,

ремонта и технического обслуживания и т. д. В то же время в ПАО «Газпром» особое внимание уделяется вопросу сокращения затрат.

Одним из направлений работы, нацеленной на сокращение затрат на изготовление, эксплу-

атацию и ремонт газоперекачивающих агрегатов (ГПА), является унификация их отдельных узлов, позволяющая наряду с повышением экономичности и надежности ГПА:

- повысить качество проектных работ;

Krylov P.V., Gazprom PJSC (Saint Petersburg, Russian Federation)

Perevezentsev S.V., Gazprom PJSC

Perevezentsev V.T., Bryansk State Technical University (BSTU) (Bryansk, Russian Federation)

Shilin M.A., Bryansk State Technical University, max05t@mail.ru

Urgency of the problem of unifying and optimizing seals in the gas turbine engines

The article reviews the problems of unifying and optimizing seals in the flow part of domestic and foreign gas compressor units of various nominal sizes.

The unification of certain joints and components is based on a scientifically founded method of selection and regulation of the optimal and limited nomenclature of gas compressor units. Later, this method can be applied to the extended units' list including gas compressor units as part of the Import Substitution Program.

On the example of the intradimensional unification of a basic model reviewing one nominal size, the interdimensional (intertype, interproject) unification of units of various types can be predicted.

The article analyses the elements of the unification method and the means of improving honeycomb seals with the use of practical experience of their study and implementation in various turbomachines.

The problem of the modernization of honeycomb seals is reviewed in a set ensuring reliability and economical efficiency, resource and repair capability. The article also specifies that the selection of materials and the modern production technology are significant problems of the unification of honeycomb seals.

Ultimately, for the purpose of design optimization, one is developing a method for the calculation of losses in seals, strength characteristics, in particular, the stability of the honeycomb structure in cases of possible contact with rotor components and dynamic effects on the elements of a rotating rotor.

Selection of the wall thickness of the honeycomb structure are closely related to the problem of strength. In particular, for the purpose of easing the entry-to-cut conditions, the thickness of the honeycombs' band is 0.05 mm. The wall thickness can reach up to 0.2–0.3 mm for larger honeycombs at higher temperatures.

Furthermore, the gas temperature can be up to 1,200–1,300 °C and more in the modern gas turbine units, that leads to a problem of cooling the honeycomb structure, selecting the material of honeycomb blocks and the quality of the honeycomb surface.

The selection of the optimization criteria during the unification of the design elements of the gas compressor units is therefore an important systemic problem.

KEY WORDS: UNIFICATION OF GAS COMPRESSOR UNITS, SEAL DESIGN, HONEYCOMB SEALS, COST SAVING, IMPORT SUBSTITUTION.

- сократить сроки создания и освоения промышленного производства новых изделий;

- снизить трудоемкость изготовления;

- сократить номенклатуру и металлоемкость запасных частей, уменьшить стоимость ремонта ГПА.

Особую значимость при этом приобретает единообразие составных частей ГПА, поскольку сами составные части могут унифицироваться независимо одна от другой.

Для решения этой задачи необходимо на основе функционального анализа оценить возможность унификации узлов, используемых в разных агрегатах.

В процессе унификации выбирают детали, обеспечивающие рациональность номенклатуры, оценивают их значимость для совершенствования конструкции, надежности и экономичности ГПА

с точки зрения материалов и ремонтпригодности, перспективности модернизации, ресурса и т. д.

К числу перспективных направлений повышения эффективности газотурбинных двигателей относятся совершенствование и унификация уплотнений в турбинах, компрессорах и нагнетателях.

Считается, что инвестиции в разработку уплотнений в несколько раз эффективнее вложений в пересмотр конструкции, даже без учета повышения ремонтпригодности и сокращения затрат на ремонт и техническое обслуживание.

В настоящее время широкое распространение получили сотовые уплотнения в проточной части и по валу в газовых турбинах, компрессорах, нагнетателях и насосах. Работы по обоснованию конструкции и эффективности их применения начались в 1960-х гг. [1] и продолжаются по сей день.

Анализ конструкций и результатов исследований газодинамики и теплообмена сотовых уплотнений, используемых в газовых турбинах, выявил следующие особенности [2]:

- сотовая конструкция обеспечивает наибольшую прочность уплотнения при минимальных затратах материалов;

- поверхность контакта при касании вращающихся частей турбомашин со статором значительно меньше, чем при задевании сплошной поверхности;

- при касании за счет истирания и интенсивного отвода тепла сотовой поверхностью не повреждаются уплотнительные гребни, торцы лопаток, а также не происходит разогрев места контакта;

- сотовые уплотнения позволяют уменьшить величину зазоров и при этом снизить уровень аэродинамических сил, действующих на ротор;

- величина утечки в сотовых уплотнениях в значительной степени зависит от геометрических характеристик структуры сот и режимных параметров потока;

- при увеличении радиальных зазоров в процессе эксплуатации ступеней с сотовыми уплотнениями обнаруживается меньшая их чувствительность к изменению величины зазора;

- сотовые ячейки представляют собой односторонне замкнутые объемы, течение в которых подвержено воздействию пульсационных явлений нестационарного потока с возможным возникновением резонансных явлений.

Одной из существенных проблем, связанных с возможностью применения сотовых уплотнений, является качество сотовой поверхности, технология изготовления которой достаточно сложна и требует высокотемпературной пайки жаропрочными припоями в вакууме.

Отметим некоторые дополнительные факторы в работе сотовых уплотнений по сравнению с лабиринтными уплотнениями:

- 1) при перетекании газа в осевом и окружном направлениях сотовая поверхность создает дополнительное сопротивление, несколько снижая потери в радиальном зазоре турбины;

- 2) при уменьшении толщины стенок сот до менее 0,1 мм прочность конструкции уплотнения снижается, и при касании происходит смятие сот, а не истирание, и повреждение ячеистой структуры;

- 3) при перемещении рабочих лопаток относительно сот давление газа в ячейках периодически меняется из-за разности давлений на выпуклой и вогнутой частях лопатки. Таким образом, в ячейках происходит пульсация давления с частотой $f = \frac{nZ}{60}$ Гц, где n – число оборотов ротора в минуту, Z – число рабочих лопаток. При повышении давления в ячейках происходит заполнение их газом из межлопаточных каналов ра-

Сравнение геометрических размеров сотовых уплотнений
Comparison of the geometric parameters of honeycomb seals

Предприятие-изготовитель, фирма, страна Manufacturing enterprise, firm, country	b, мм (mm)	h, мм (mm)	d ₀ , мм (mm)
422 ЦД (Казанский компрессорный завод, РФ) 422 TsD (Kazan Compressor Plant, RF)	0,1	3,3–3,6	3,6
ЦК СВД (ВНИИ «Компрессормаш», РФ) Extra-High-Pressure Circulating Valve (All-Soviet Research Institute “Kompressormash”, RF)	0,15 0,2 0,3	3,5	3,4
Burnley Engineering Products (Великобритания – UK)	0,5	6	7
Amoco Texas Refining Co (США – USA)	0,0762	4,8 3,2	3,2
Dresser Clark (США – USA)	1,25 1,00 0,75	3,0	3,7

бочего колеса. При последующем понижении давления в ячейках поток вытекает из них в радиальном направлении. В связи с этим количество газа, пульсирующего в ячейках сотового уплотнения, как бы исключается из общего расхода потока, определяющего полезную работу турбины. Это явление ведет к увеличению потерь от радиального зазора и соответствующему понижению коэффициента полезного действия (КПД) ступени. Кроме того, пульсирующий газ, смешиваясь с основным потоком, значительно деформирует поля параметров потока в периферийных сечениях;

- 4) дополнительные потери могут возникать при обтекании ячеистой поверхности периферийного кольца из-за срыва потока на перегородках сот. Эти потери зависят от многих факторов: размера сотовых ячеек, режимных параметров (скорости на периферии), числа ячеек по ширине кольца, толщины стенок сот и т. п. При этом генератором пульсаций может служить частота прохождения ячейки торцом лопатки либо частота срыва вихрей с перегородок ячеек (частота Струхала).

Оценка дополнительных потерь, связанных с шероховатостью сотовой поверхности, в значительной степени затруднена из-за сравнительно большого числа конструктивных и режимных

факторов, влияющих на характер течения потока вблизи стенки. Согласно результатам экспериментальных исследований [3] величина интенсификации гидравлического сопротивления в канале с сотовой структурой может достигать $\psi\lambda = 6,46$. Однако ряд исследований свидетельствует о том, что потери в канале с сотовой стенкой для некоторых типоразмеров ячеек при определенных величинах зазора могут быть даже меньше, чем в канале с гладкими стенками. Полагаем, что это объясняется наличием в ячейках вихревого движения потока, являющегося своего рода «подшипником качения» для потока в канале, а также служащего препятствием для образования пограничного слоя на соответствующей стенке канала.

Таким образом, ставятся задачи оптимизации конструкции сотовых уплотнений и выбора конструктивных параметров сотовых ячеек с учетом теплогидравлических характеристик и особенностей организации воздушного охлаждения. Уплотнения сотового типа в настоящее время производятся следующими предприятиями-изготовителями и ремонтными организациями: ООО «СП «Деага Делавал Пауэр Невский» (ООО «Невский»), ОАО «Уралтурбо», ООО «Брянский завод «Турборемонт» и др. В ком-

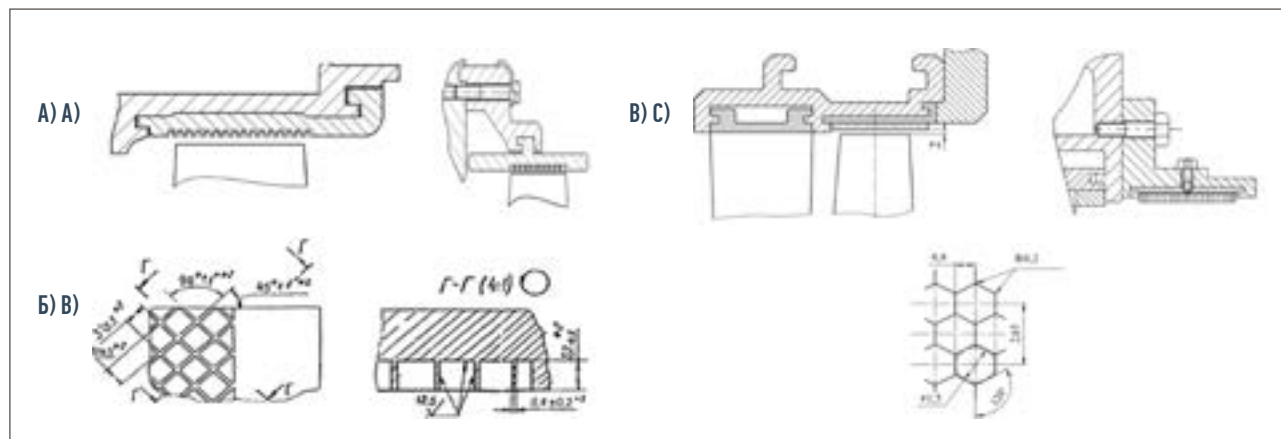


Рис. 1. Конструкции уплотнений:

а) конструкция уплотнений производства ООО «Невский»; б) сотовая структура уплотнений производства ООО «Невский»; в) конструкция уплотнений производства ОАО «Уралтурбо»

Fig. 1. Seal designs:

a) seal design by Nevsky LLC; b) honeycomb structure of a seal by Nevsky LLC; c) seal design by Uralturbo OJSC

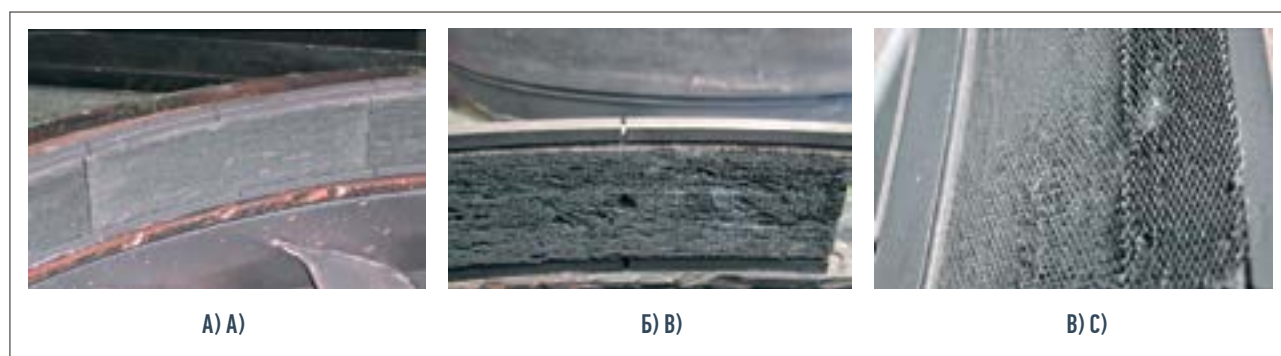


Рис. 2. Дефекты сотовой поверхности, выявленные в процессе эксплуатации:

а) задиры из-за касания лопатками сотовой структуры уплотнения; б) дефекты из-за попадания окалины в область зазора; в) разрушение сотовой структуры

Fig. 2. Defects of the honeycomb surface identified during operational process:

a) scratches caused by blades' contact with the honeycomb structure of a seal; b) defects caused by a scale falling into the clearance area; c) honeycomb structure destruction

прессоростроении применяются сотовые уплотнения, изготавливаемые на Казанском компрессорном заводе, а также выпускаемые фирмами Dresser Clark (США), Cooper Bessemer (Канада), Creusot-loire (Франция), Nuovo Pignone (Италия). Сравнение геометрических характеристик приведено в таблице.

Примеры конструкции сотовых уплотнений, предлагаемых отечественными производителями, представлены на рис. 1.

В процессе эксплуатации выявлены дефекты сотовой поверхности (рис. 2). Разрушение сотовых ячеек может быть вызвано наличием в потоке металлических частиц или окалины, а также за-

деванием торцами лопаток элементов обоймы уплотнения.

Отметим, что сотовая структура, полученная электроискровым методом ООО «Невский», достаточно жесткая. Толщина стенок ячеек – $0,3 \pm 0,1$ мм. Поэтому задевание торцом лопатки элементов уплотнения может привести к повреждению лопатки. Кроме того, размеры и форма ячейки не являются оптимальными (для радиального зазора $\delta = 2...3$ мм) при наличии на торце лопатки утонения. Сотовые ячейки ОАО «Уралтурбо» выполнены из фольги толщиной 0,05 мм и при задевании не вызывают повреждения торца лопатки,

подвергаясь только смятию или истиранию.

Стоит также отметить, что конструкции уплотнений (рис. 1) не допускают демпфирования сотовых вставок при касании лопатками элементов уплотнения, так как вставки жестко связаны с обоймой турбины. Температурный режим, в котором работают сотовые вставки, также следует учитывать при проектировании элементов уплотнения и расчете величин радиальных зазоров.

Анализ конструкции и газодинамических режимов работы уплотнений позволяет предложить следующие мероприятия по их совершенствованию.

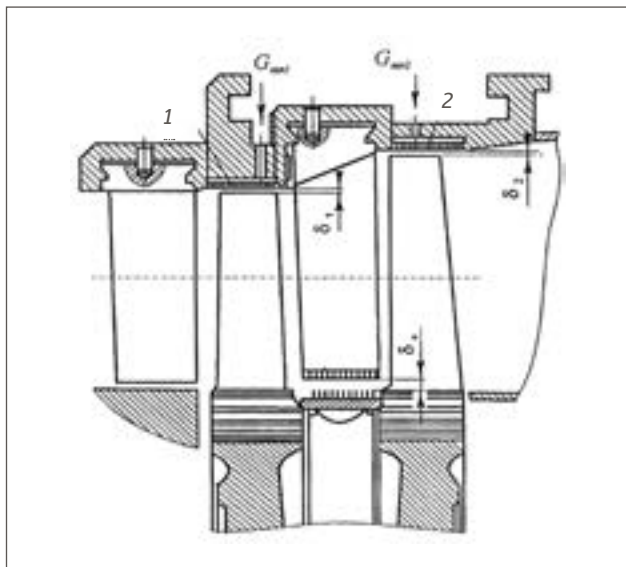


Рис. 3. Схема проточной части модернизированной ТВД ГПА-750-6:
1 – сотовые уплотнения 1-й ступени; 2 – сотовые уплотнения 2-й ступени
Fig. 3. Diagram of the flow part of the modernized high-pressure turbine GPA-750-6:
1 – honeycomb seals of the 1st stage; 2 – honeycomb seals of the 2nd stage

Прежде всего, следует учитывать опыт внедрения сотовых уплотнений в проточной части турбин высокого давления (ТВД) ГТ-750-6 на компрессорной станции (КС) «Воскресенск» специалистами БГТУ при участии ПТП «Липецкгазэнергоремонт» и ОАО «Рыбинские моторы» на агрегате ГТ-750-6 (№ 7).

Сотовые вставки, изготовленные на авиастроительном предприятии «Рыбинские моторы», были установлены в обойме ТВД над рабочими лопатками 1-й и 2-й ступеней (рис. 3) с радиальными зазорами, уменьшенными приблизительно на 1 мм по сравнению с зазором до начала ремонта.

В результате испытаний агрегата отмечено увеличение относительного КПД $\Delta\eta_e = 2\%$. Эффективный абсолютный КПД до модернизации $\eta_e = 0,292$, а после модернизации $\eta_e = 0,298$. Сотовые ячей-

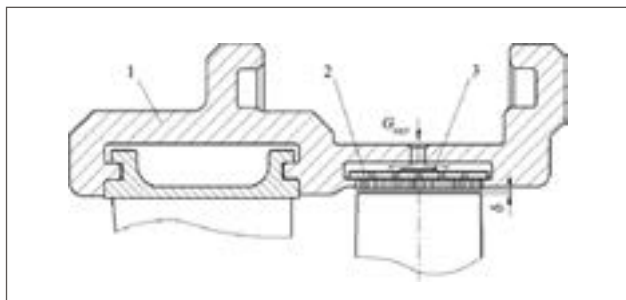


Рис. 4. Модернизированное периферийное уплотнение рабочего колеса:
1 – обойма; 2 – сотовая вставка; 3 – плоская пружина
Fig. 4. Modernized peripheral seal of the rotor wheel:
1 – vane carrier; 2 – honeycomb insert; 3 – flat spring

ки имели конструктивные размеры, соизмеримые с аналогичными размерами сот, применяемыми ОАО «Уралтурбо». При разборке после наработки более 6 тыс. ч дефектов уплотнений не обнаружено.

Статистика изменения величины радиальных зазоров в процессе эксплуатации требует модернизации конструкции уплотнений в целях стабилизации зазоров и повышения надежности при задевании уплотнений рабочими лопатками. Для этого предлагается конструкция с сотовыми вставками, закрепленная пайкой твердым припоем на пластине-подложке. Конструкция сотовых вставок унифицирована. Сотовые вставки 2 располагаются в пазах обоймы 1 (рис. 4) и могут перемещаться в радиальном направлении при касании лопаток. Вставки удерживаются в прижатом положении плоскими пружинами 3. В камеры над вставками подается охлаждающий воздух, который, во-первых, стабилизирует температуру обоймы и вставок, а во-вторых, поддерживает упругие свойства пружины. Затем через небольшие отверстия в пластине-подложке воздух попадает на периферию проточной части, создавая защитную пленку на периферии обоймы и торцах лопаток, подверженных термическому воздействию газового потока. Как уже указывалось, при прохождении торцов рабочих лопаток относительно сотовых ячеек в пространстве последних возникают пульсации охлаждающего воздуха, которые интенсифицируют теплообмен, что способствует охлаждению сотовых вставок.

Вставки набираются в пазах и при ремонте достаточно просто могут быть заменены при обнаружении дефектов. Отметим также, что сотовые вставки имеют небольшую массу и поэтому довольно податливы в случае контакта с рабочими лопатками или различными включениями в газовом потоке.

Значение величины радиальных зазоров может быть значительно уменьшено (до 30 %) в зависимости от конструкции проточной части для различных агрегатов.

В БГТУ на кафедре «Тепловые двигатели» более 20 лет ведутся работы по разработке, теоретическим и экспериментальным исследованиям сотовых уплотнений и их применению в газовых и паровых турбинах. Некоторые результаты работ отражены в монографии [4].

В результате научно-технического сотрудничества между БГТУ и ООО «Газпром трансгаз Москва» с участием предприятий авиационной промышленности сотовые уплотнения изготовлены, внедрены и прошли испытания на турбоагрегате ГТ-750-6 КС «Воскресенск».

Исследования, проводящиеся на кафедре «Тепловые двигатели» БГТУ, создание экспериментальных стендов и измерительной аппаратуры позволили усовершенствовать конструкцию уплотнений, в частности оптимизировать сотовую структуру.

Получены патенты на конструкцию, оптимизацию и совершенствование ремонта сотовых уплотнений [5, 6].

Так, в 2000-х гг. совместно с ОАО «Самарагазэнергосервис» и брянским заводом «Турборемонт» были разработаны конструкция и технология, изготовлены и внедрены сотовые уплотнения в паровых турбинах на Смоленской и Воронежской АЭС. В результате этой работы получен значительный экономический эффект с повышением надежности и эффективности ремонтных работ. ОАО «Концерн Энергоатом» принято решение о проведении работ на предприятиях отрасли по использованию сотовых уплотнений и унификации их конструкции.

В настоящее время в рамках сотрудничества с ООО «Газпром трансгаз Москва» разработаны предложения по совершенствованию и унификации уплотнений в проточной части ГПА типа ГТН-16 и ГТН-25. Предлагаемые технические решения касаются разработки сотовых уплотнений в проточной части и по валу турбокомпрессора в целях уменьшения радиальных зазоров, повышения их надежности, экономичности и ремонтпригодности.

ВЫВОДЫ

В настоящее время в ПАО «Газпром» эксплуатируется более 4,2 тыс. ГПА суммарной мощностью более 47 млн кВт. При этом ПАО «Газпром» ведет масштабную работу по развитию российской газотранспортной системы, что сопровождается закупкой значительного числа газоперекачивающих агрегатов.

Структура парка ГПА отличается большим разнообразием типоразмеров оборудования, а также количества изготовителей и, как следствие, широким спектром применяемых технических и проектных решений. Производители, в том числе российские, выпускают ГПА, которые даже при одинаковой мощности существенно различаются по таким техническим параметрам, как масса, габариты, компоновка основных узлов. Более того, каждый производитель имеет собственную концепцию агрегата, которая отличается от оборудования конкурентов по компоновке, внешним габаритно-присоединительным размерам, массе.

Такое разнообразие конструктивных решений приводит к сложностям при проектировании

и строительстве КС, в частности к невозможности начала проектирования без выдачи изготовителями исходных данных на ГПА, что приводит к удорожанию строительства и увеличению сроков ввода ГПА в эксплуатацию [7].

Большую часть парка составляют агрегаты, выпускаемые с использованием технологий авиационной промышленности. При их проектировании используются отраслевые стандарты и методы расчета лабиринтных уплотнений. Например, конструкция проточной части лабиринтных уплотнений определена по ОСТ 1 12605-76.

Таким образом, целесообразность унификации как одного из основных видов стандартизации имеет большое значение, в том числе для реализации Программы импортозамещения с применением современных технологий.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на модельные испытания различных конструкций сотовых уплотнений, обоснования унификации элементов уплотнения, технологии изготовления, подбора материалов, совершенствования методов ремонта унифицированных сотовых уплотнений для определенного ряда ГПА. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Речкоблит А.Я. Исследование эффективности применения сотовых уплотнений радиального зазора в газовых турбинах: Технический отчет № 6103. М.: ЦИАМ, 1968. 56 с.
2. Перевезенцев В.Т., Шилин М.А. Совершенствование конструкции уплотнения зазоров в проточной части газоперекачивающего аппарата ГТК-10-4 // Вестник Брянского гос. техн. ун-та. 2015. № 1 (45). С. 35-40.
3. Буглаев В.Т., Перевезенцев В.Т., Шилин М.А. и др. Экспериментальные исследования теплообмена в канале с сотовой структурой // Вестник Брянского гос. техн. ун-та. 2013. № 1. С. 72-79.
4. Буглаев В.Т., Перевезенцев В.Т., Перевезенцев С.В. и др. Сотовые уплотнения в турбомашинах. Брянск: БГТУ, 2006. 192 с.
5. Патент № 2355892 F01D 11/02. Сотовое уплотнение и способ его применения при замене уплотнений с гребнями по валу турбоустановок / В.Т. Буглаев, В.Т. Перевезенцев, В.В. Сметанко и др. Брянск, 2009.
6. Патент на полезную модель № 128900 F01D 11/02. Сотовые уплотнения турбомшины / В.Т. Перевезенцев, М.А. Шилин. Брянск, 2013.
7. Зорькина О.В., Ерохин С.К. Унификация агрегатного оборудования ГПА на базе стационарных газотурбинных установок мощностью 16, 25 и 32 МВт // Газовая промышленность. 2014. № 9. С. 72-75.

REFERENCES

1. Rechkooblit A.Ya. Research of the Efficiency of Using Honeycomb Seals of the Radial Clearance in Gas Turbines. Technical Report No. 6103. Moscow, Central Institute of Aviation Motors, 1968, 56 p. (In Russian)
2. Perevezentsev V.T., Shilin M.A. Improving the Seal Design of Clearances in the Flow Part of the Gas Compressor Unit ГТК-10-4. Vestnik Bryanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta = Bulletin of Bryansk State Technical University, 2015, No. 1 (45), P. 35-40. (In Russian)
3. Buglaev V.T., Perevezentsev V.T., Shilin M.A., et al. Experimental Study of Heat Exchange in a Channel with the Honeycomb Structure. Vestnik Bryanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta = Bulletin of Bryansk State Technical University, 2013, No. 1, P. 72-79. (In Russian)
4. 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)
5. Patent No. 2355892 F01D 11/02. The Honeycomb Seal and Method of its Application when Replacing Seals with Shaft Combs at Turbine Plants. Authors: V.T. Buglaev, V.T. Perevezentsev, V.V. Smetanko, et al. Bryansk, 2009. (In Russian)
6. Utility Patent No. 128900 F01D 11/02. Honeycomb Seals of a Turbomachine. Authors: V.T. Perevezentsev, M.A. Shilin. Bryansk, 2013. (In Russian)
7. Zor'kina O.V., Erokhin S.K. Unification of the Modular Equipment of Gascompressor Units Powered by Stationary Gas Turbine Units with a Capacity of 16, 25 and 32 MW. Gazovaya Promyshlennost' = Gas Industry, 2014, No. 9, P. 72-75. (In Russian)