ТЕПЛОВЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Охлаждаемые лопатки турбины энергетической газотурбинной установки ГТЭ-65

Опыт внедрения сотовых уплотнений в паровых турбинах

Оценка влияния длительной эксплуатации на свойства металла барабанов котлов высокого давления

Подъём дымовых газов ТЭС при отсутствии ветра

ЭНЕРГОСИСТЕМЫ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ

Особенности расчётов режимов электрических сетей при перспективном развитии объединённой энергосистемы

О необходимости создания информационно-измерительной системы центров управления сетей региональных сетевых компаний

Оптимизация выполнения ремонтов и технического обслуживания воздушных линий с использованием анализа Парето

Пути снижения электропотребления крупного города

Автоматизация проектирования вторичных цепей электрических станций и подстанций

ОБОРУДОВАНИЕ СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ

Опыт эксплуатации асинхронизированных турбогенераторов на электростанциях России

О контроле изоляции корпусов подшипников турбоагрегата и масляной плёнки

РАБОТЫ МОЛОДЫХ СПЕЦИАЛИСТОВ

Методика численного расчёта параметров коронного разряда в электрических фильтрах

ХРОНИКА

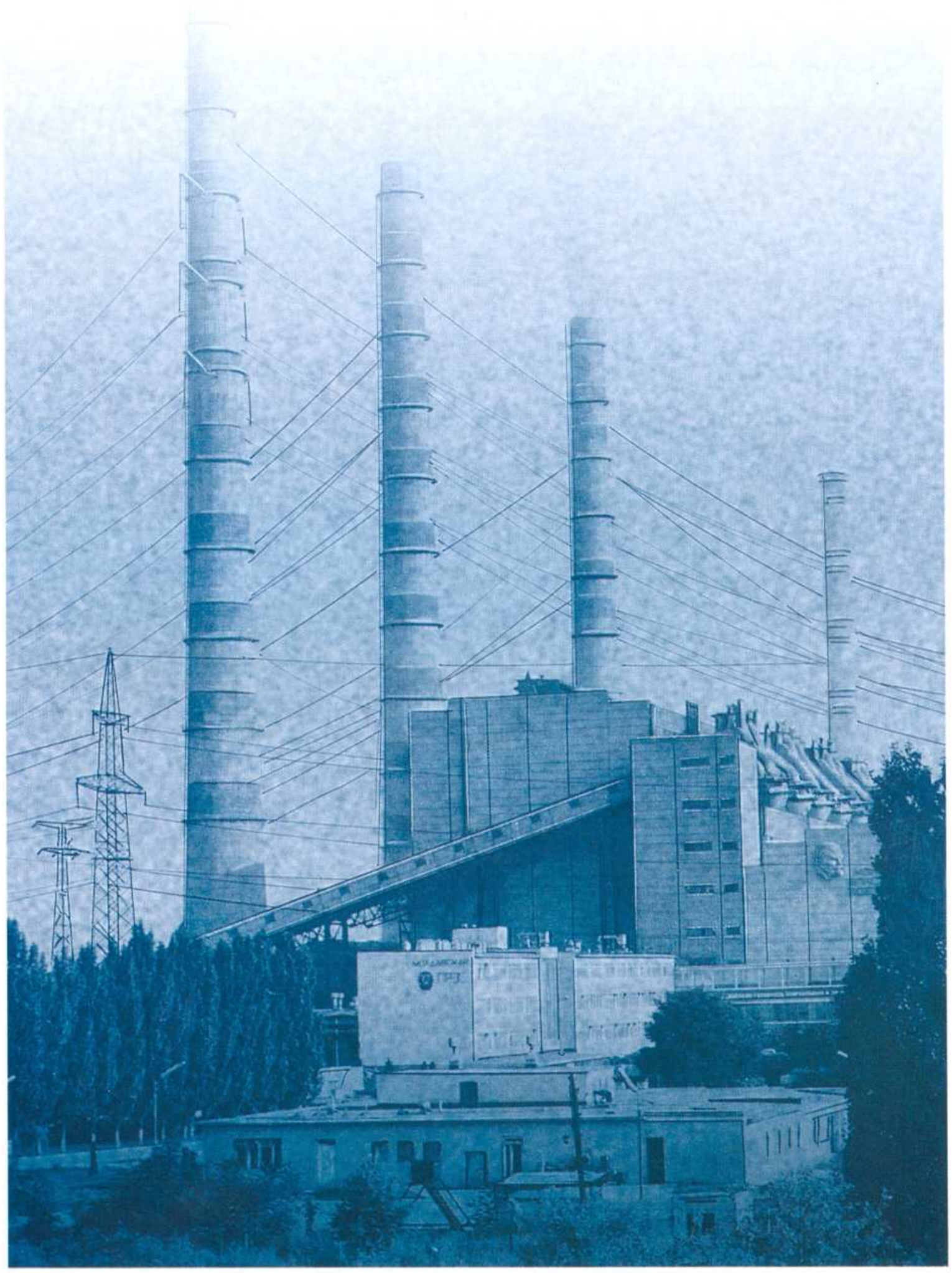
Новости Системного оператора

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

ISSN 0201-4564

2009 10



ЭНЕРГОПРОГРЕСС

Опыт внедрения сотовых уплотнений в паровых турбинах

Ушинин С. В.

• **НПП "АРМС"**

Проанализирован опыт внедрения сотовых уплотнений в проточные части паровых турбин мощностью 60 – 660 МВт. Рассмотрены конструктивные особенности исполнения и установки сотовых надбандажных и концевых уплотнений. Определён перечень необходимых работ при доработке проточной части ЦВД и ЦНД с целью установки данных типов уплотнений. Приведены практические примеры работы сотовых уплотнений в проточных частях паровых турбин при эксплуатации.

Ключевые слова: сотовые надбандажные и концевые уплотнения, паровые турбины, обойма, козырёк диафрагмы, модернизация, проточная часть.

Использование высокотехнологичных, энергоэффективных и в то же время малозатратных, быстроокупаемых технических решений актуально как при создании новых конструкций паровых турбин, так и при их модернизации.

Одним из наиболее перспективных путей продолжают оставаться работы, направленные на совершенствование проточных частей паровых турбин за счёт применения сотовых уплотнений.

Установка сотовых уплотнений позволяет одновременно решить две задачи:

повысить экономичность проточной части;

обеспечить надёжность и безопасность эксплуатации турбоагрегата в целом.

Первая задача решается за счёт уменьшения радиальных зазоров между усиками бандажа ротора и уплотняющей поверхностью (сотовыми вставками), что сокращает паразитные перетечки пара.

Решение второй задачи обеспечивается конструкцией уплотняющей поверхности, т.е. использованием сот, допускающих контакт между ротором и статором турбины без каких-либо серьёзных последствий для работоспособности турбоагрегата.

Сказанное справедливо как для надбандажных, так и для концевых сотовых уплотнений.

Эффективность применения ***надбандажных сотовых уплотнений*** доказана опытом эксплуатации более чем 90 турбоагрегатов различной мощности от 25 до 300 МВт, оснащённых данным типом уплотнений, а также многочисленными положительными результатами тепловых испытаний, проведённых ОАО "Фирма ОРГРЭС" с участием технического персонала электростанций.

Надбандажные и концевые сотовые уплотнения начали устанавливаться на паровые турбины с 1994 г. и по состоянию на 2009 г. успешно эксплуатируются на турбинах ПТ-30-90/10, Т-50-130/13, Р-40-130, Т-100-130, Р-100-130 и Т-250/300-240 производства ЗАО "Уральский турбинный завод" (г. Екатеринбург); Р-50/60-130, ПТ-60-130/13, ПТ-80/100-130/13, Т-180/210-130, К-200-130, К-300-240 производства ОАО "Силовые машины" (г. Санкт-Петербург); 3Р3, ТК-120, WPT-25, 13К-235, 13UP-55 производства фирмы "Альстом" (г. Эльблонг, Польша) в различных энергосистемах России, Белоруссии, Польши, Литвы.

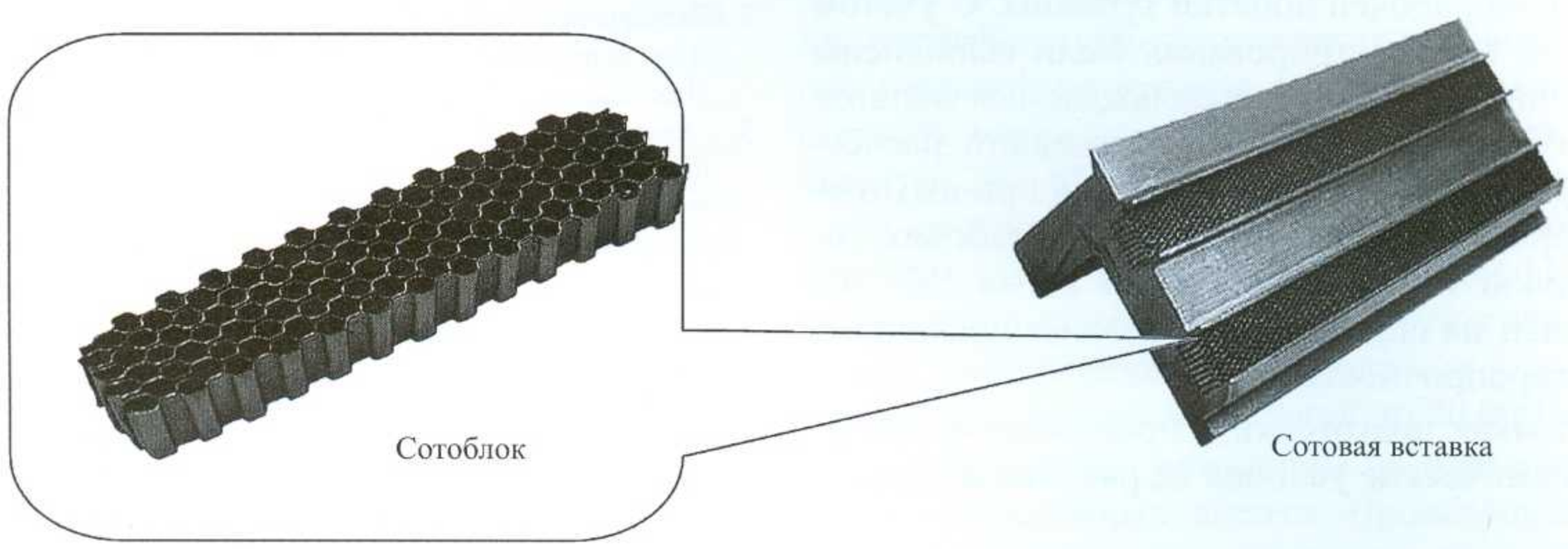


Рис. 1. Внешний вид сотовой вставки регулирующей ступени турбины ПТ-65-130/13

Сотовые надбандажные уплотнения (рис. 1) представляют собой набор вставок, число которых может колебаться от 20 до 30 в зависимости от диаметра уплотняемой поверхности. Каждая вставка состоит из корпуса и закреплённых на нём посредством высокотемпературной пайки сотоблоков. Корпус сот изготавливается из жаропрочной стали. Сотоблоки формируются из жаропрочной хромоникелевой фольги толщиной 0,05 мм и имеют шестигранную форму ячейки в продольном сечении. Высота сот в поперечном сечении составляет не менее 4,0 – 5,0 мм, диаметр вписываемой в ячейку окружности – около 1 мм.

Создание сотовых уплотнений для паровых турбин базировалось на опыте проектирования и эксплуатации данного типа уплотнений в авиадвигателестроении. Часть технологических операций на авиадвигательном предприятии ФГУП "НПП "Мотор" (г. Уфа) была адаптирована под изготовление сотовых уплотнений для паровых турбин.

Технология изготовления сотовых надбандажных уплотнений включает в себя ряд последовательных термомеханических операций. Первоначально из сляба получают раскатное кольцо требуемого диаметра, которое затем подвергают механической обработке на токарном станке. Далее производят разрезку кольца на сегменты и установку в них непосредственно самих сотоблоков с проведением высокотемпературной пайки. Длительность производственного цикла изготовления комплекта сотовых уплотнений для турбины составляет 3 – 4 мес. В настоящее время освоено производство сотовых уплотнений с максимальным диаметром (в зоне уплотнения) до 2300 мм.

Конструкции сотовых надбандажных уплотнений различаются при проектировании нового и при модернизации действующего паротурбинного оборудования. Новое проектирование проточных частей паровых турбин, как правило, позволяет использовать типовые конструкции сотовых уплотнений, в то время как при модернизации требуется специальное проектирование с целью адаптации к существующим проточным частям турбин.

Надбандажные уплотнения традиционной конструкции устанавливаются либо в козырьках диафрагм, либо непосредственно в обойму или внутренний цилиндр. На рис. 2, 3 показаны типовые

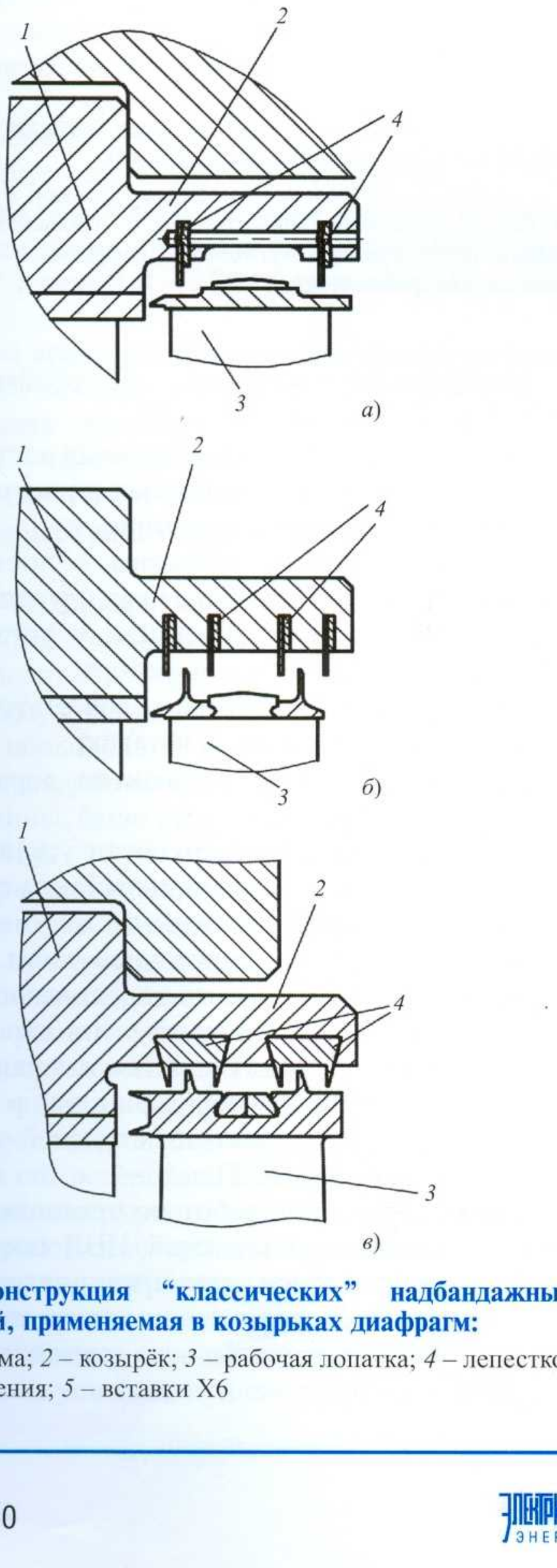


Рис. 2. Конструкция "классических" надбандажных уплотнений, применяемая в козырьках диафрагм:

1 – диафрагма; *2* – козырёк; *3* – рабочая лопатка; *4* – лепестковые уплотнения; *5* – вставки Х6

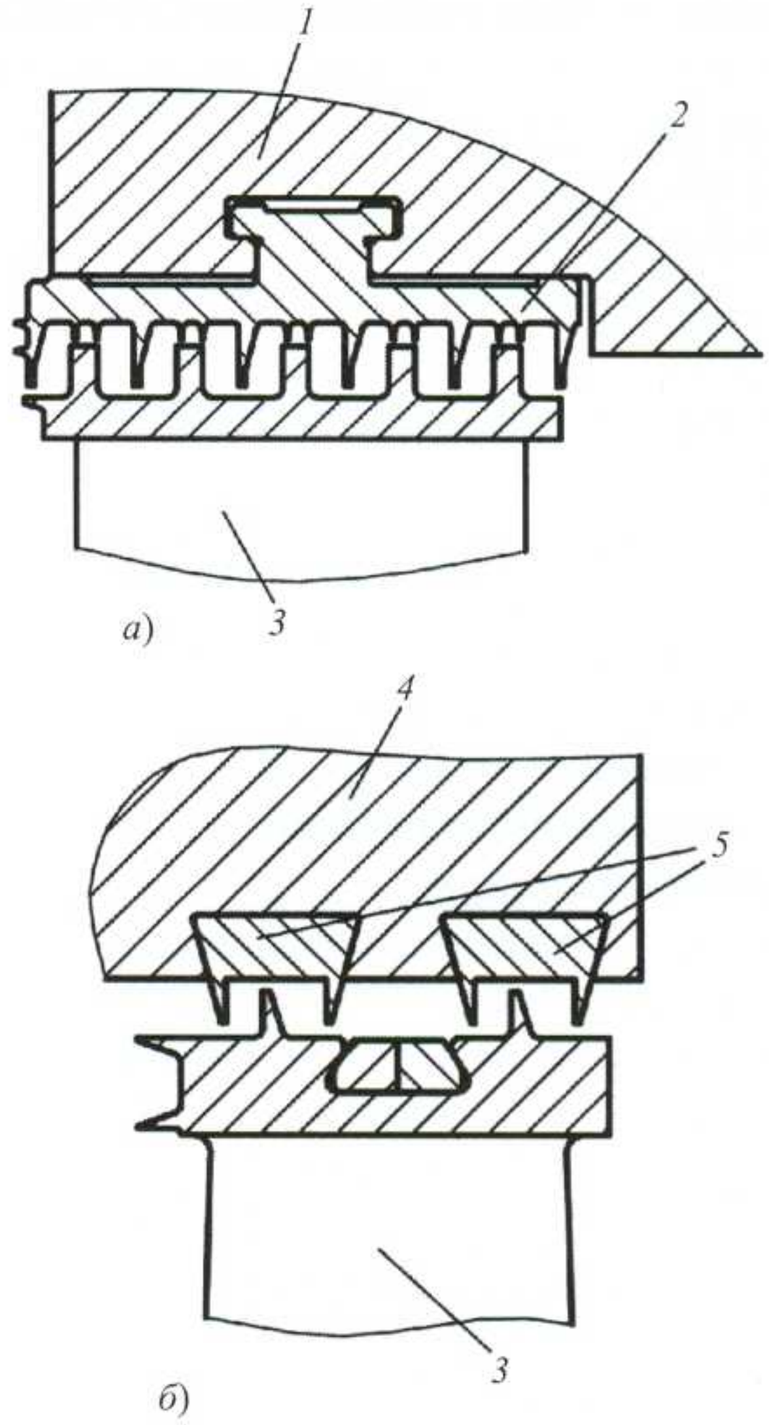
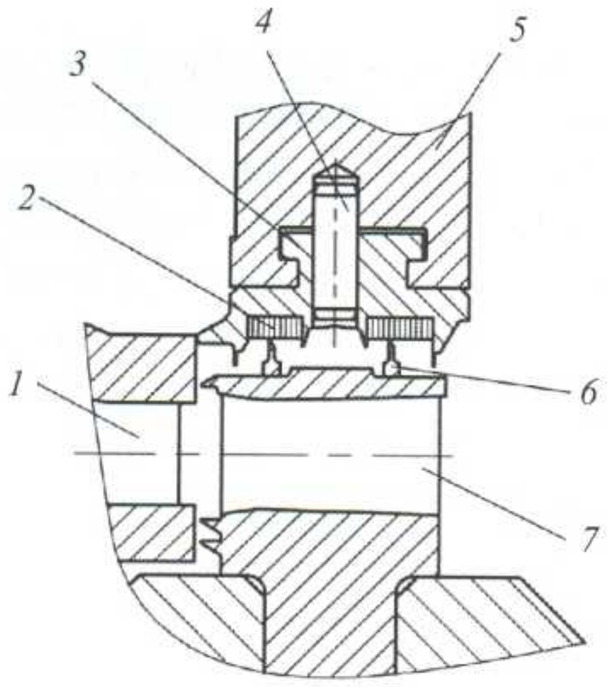
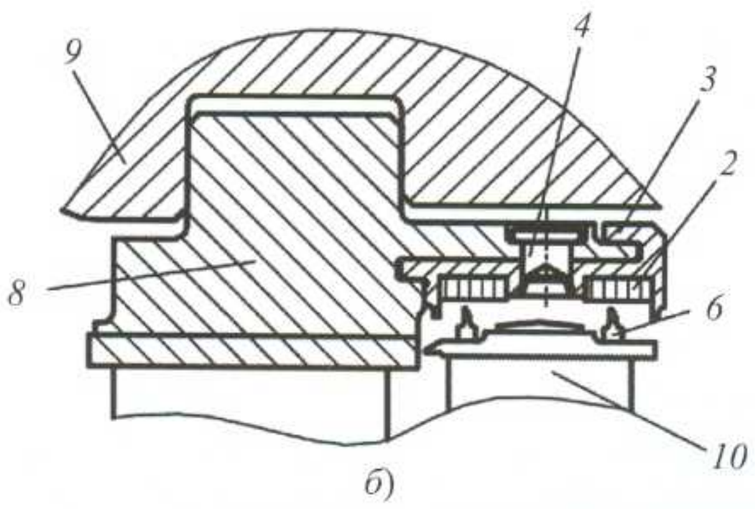


Рис. 3. Конструкция "классических" надбандажных уплотнений внутреннего цилиндра и обойм:

1 – внутренний цилиндр; *2* – уплотнительное кольцо; *3* – рабочая лопатка; *4* – обойма; *5* – вставки Х6



а)



б)

Рис. 4. Конструкция надбандажных сотовых уплотнений, применяемая в обойме регулирующей ступени (*а*) и в козырьках диафрагм (*б*):

1 – сопло; *2* – сотоблок; *3* – сотовая вставка; *4* – штифт; *5* – обойма регулирующей ступени; *6* – гребешок ротора; *7* – лопатка регулирующей ступени; *8* – диафрагма; *9* – обойма; *10* – рабочая лопатка

конструкции надбандажных уплотнений паровых турбин, эксплуатирующихся в настоящее время.

Конструкция радиальных уплотнений, изображённая на рис. 2, *а*, *б*, стала применяться в 60-х годах прошлого века и обладала недостатком, связанным с "разуплотнением" проточной части, причиной которого являлись задевания и истирание уплотняющих "усов" статора турбины, а следствием – снижение экономичности.

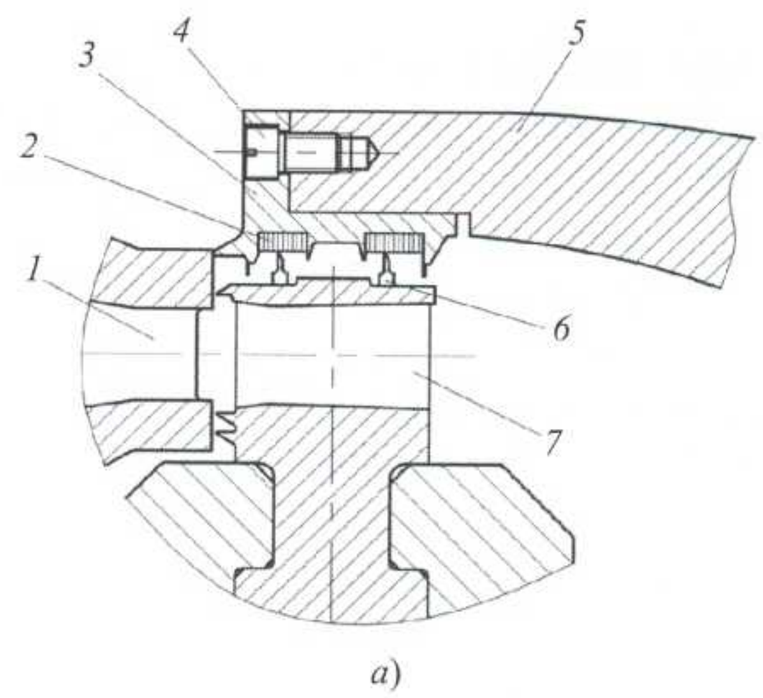
Конструкция осерадиальных уплотнений рис. 2, *в* и рис. 3, *б*, применяемая с 1980-х годов, позволяет повысить экономичность, улучшить вибросостояние турбин на сверхкритические параметры пара, но в то же время не исключает серьёзных повреждений проточной части при больших радиальных задеваниях.

На рис. 4, 5 показаны конструкции надбандажных сотовых уплотнений, применённые в паровых турбинах ОАО "Силовые машины" при проведении модернизаций действующего оборудования:

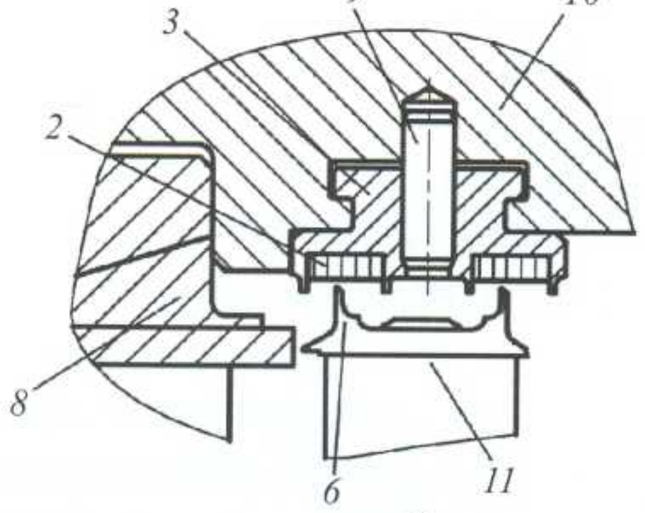
регулирующей ступени турбин типа ПТ-60-130, Т-50-130 (рис. 4, *а*);

диафрагм проточных частей ЦВД паровых турбин типа ПТ-60-130, ПТ-80-130, К-200-130 (рис. 4, *б*). Сотовые уплотнения указанной конструкции также устанавливаются с 14 по 18 ступень ЦСД турбоагрегатов типа Т-180-130, К-200-130;

обоймы регулирующей ступени турбин типа ПТ-65-130, К-200-130 (рис. 5, *а*);



а)



б)

Рис. 5. Конструкция надбандажных сотовых уплотнений обойм (*а*) и внутреннего цилиндра (*б*):

1 – сопло; *2* – сотоблок; *3* – сотовая вставка; *4* – винт; *5* – обойма № 1 регулирующей ступени; *6* – гребешок ротора; *7* – лопатка регулирующей ступени; *8* – диафрагма; *9* – штифт; *10* – обойма; *11* – рабочая лопатка

внутреннего цилиндра и обойм турбин Р-50-130, К-300-240 (рис. 5, *б*).

В ходе модернизации проточных частей с установкой сотовых надбандажных уплотнений выполняются следующие операции:

ремонт (наплавка, приварка с последующей проточкой) гребней на бандажах ступеней ротора (т.е. восстановление гребней или их установка) по результатам дефектоскопии ротора;

механическая обработка узлов статора турбины под установку сотовых вставок;

установка сотовых вставок на доработанные узлы статора турбины;

расточка рабочей поверхности установленных сотовых вставок в окончательный размер, согласно требованиям конструкторской документации;

контрольная сборка проточной части.

Таким образом, сотовые надбандажные уплотнения устанавливаются на ступени паровых турбин, где имеются бандажные полки над лопатками, а это, в первую очередь, цилиндр высокого (ЦВД), а также несколько ступеней цилиндра среднего давления (ЦСД).

Срок выполнения работ по установке надбандажных сотовых уплотнений ЦВД составляет в условиях энергоремонтного предприятия не более полутора месяцев и сопоставим со сроками проведения типового капитального ремонта паровой турбины.

В случае когда сотовые уплотнения устанавливаются в проточную часть новых турбин, требуется только осуществление операций, заключающихся в установке сотовых вставок в выполненные проточки (слесарные операции) с последующей чистовой механической обработкой поверхности сот.

Конструкция данного типа уплотнений, применяемая на турбоагрегатах типа К-225-130, К-660-130, показана на рис. 5, *б* и по геометрическим параметрам идентична сотовым уплотнениям, используемым при модернизации турбин К-300-240.

Анализ результатов тепловых испытаний блоков после установки в проточные части модернизированных турбин сотовых надбандажных уплотнений, проведённых в ОАО "Башкирэнерго" с 1995 по 2004 г. и в ОАО "Татэнерго" с 2003 по 2007 г., показывает, что различие относительных внутренних КПД ЦВД турбин с надбандажными сотовыми уплотнениями и турбин, оснащённых уплотнениями радиального типа, может составлять до 4 – 5% через 30 000 ч наработки (межремонтный период) [1].

Дополнительно следует отметить, что за счёт уменьшения радиальных зазоров прирост относительного внутреннего КПД цилиндра может составить не менее 1,0 – 2,0% к нормативному значению.

Важным преимуществом конструкции сотовых уплотнений, помимо снижения протечек в уплотняемых узлах, является их надёжная работа не только в случаях частичных радиальных задеваний, но также и в случаях попадания в проточную часть турбины грата и других посторонних предметов.

Одним из примеров такой надёжной работы является пуск турбины ПТ-60-130 после проведённого капитального ремонта в 2006 г. После нескольких безуспешных попыток пуска, сопровождавшихся повышенной вибрацией и, как следствие, многочисленными задеваниями в проточной части турбины, было принято решение о вскрытии ЦВД и ЦСНД.

Осмотр выявил наличие масла в осевом канале ротора высокого давления и многочисленные попадания в проточную часть турбины грата и других посторонних предметов со стороны паровпуска, повредившие поверхности сот, а также рабочих и направляющих лопаток. Было отмечено, что все уплотнительные усики на бандажах рабочих лопаток РВД остались целы, но наблюдались следы выработки сот вследствие повышенной вибрации. Разрушение поверхности сот с включением фрагментов крупного постороннего предмета наблюдалось только на сотоблоках девятой ступени ЦВД (рис. 6). После замены некоторых наиболее повреждённых сотоблоков данной ступени ЦВД новыми турбина была успешно пущена в эксплуатацию.

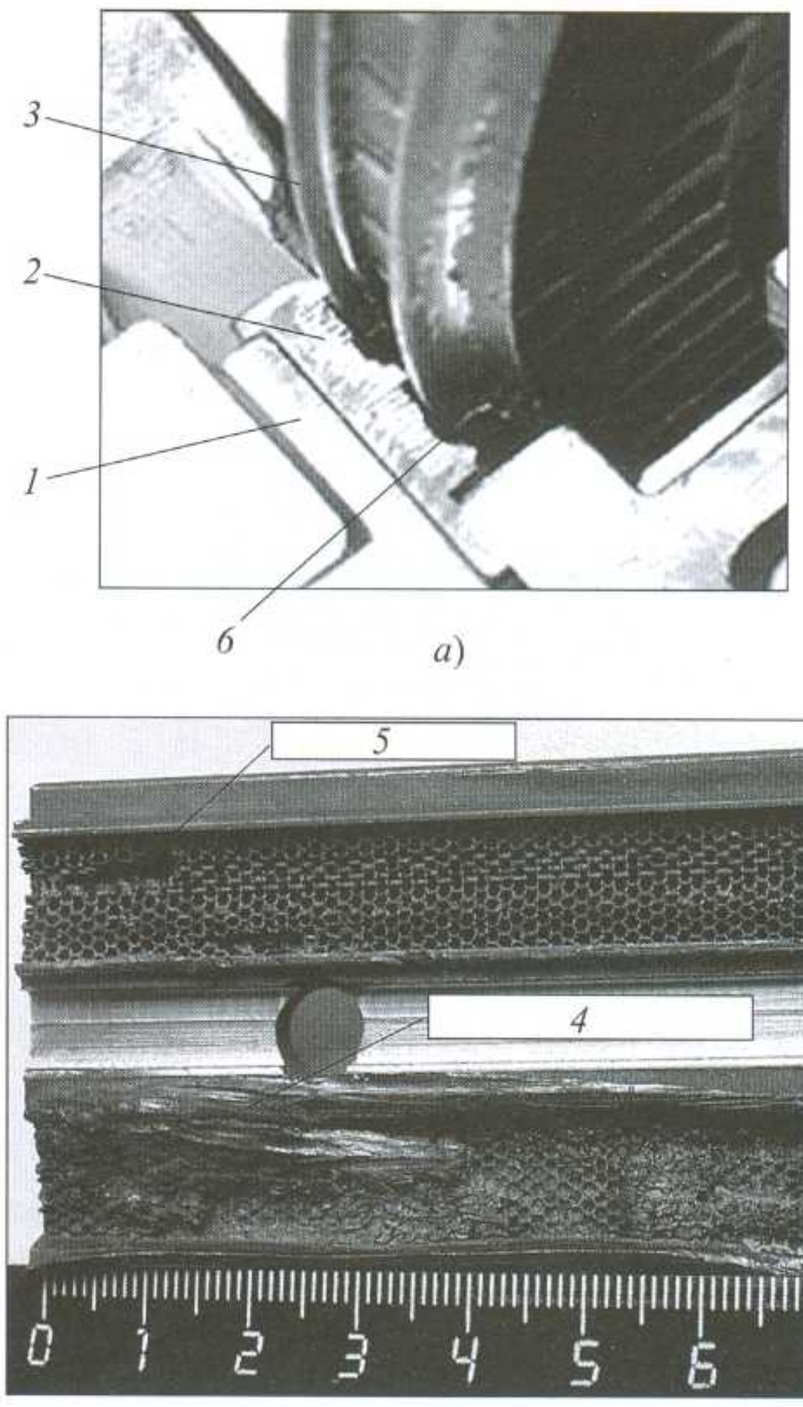
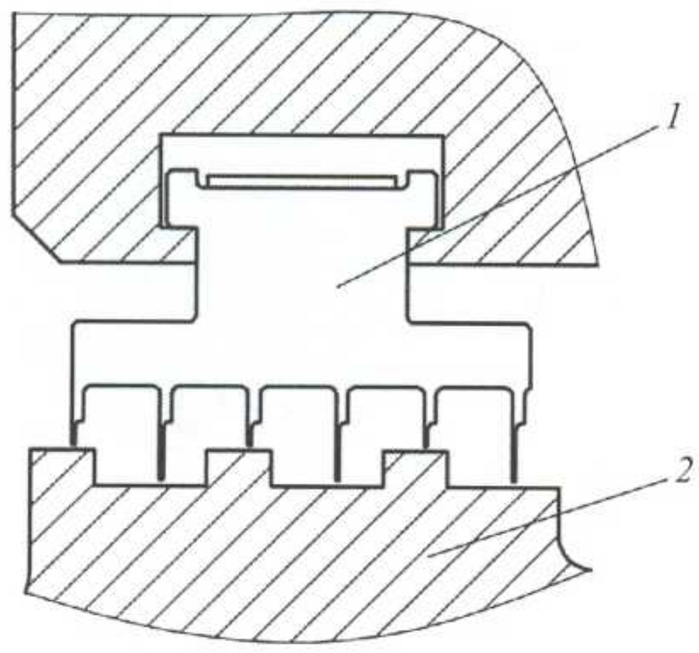


Рис. 6. Выработка сот девятой ступени ЦВД при аварийном пуске паровой турбины типа ПТ-60-130:

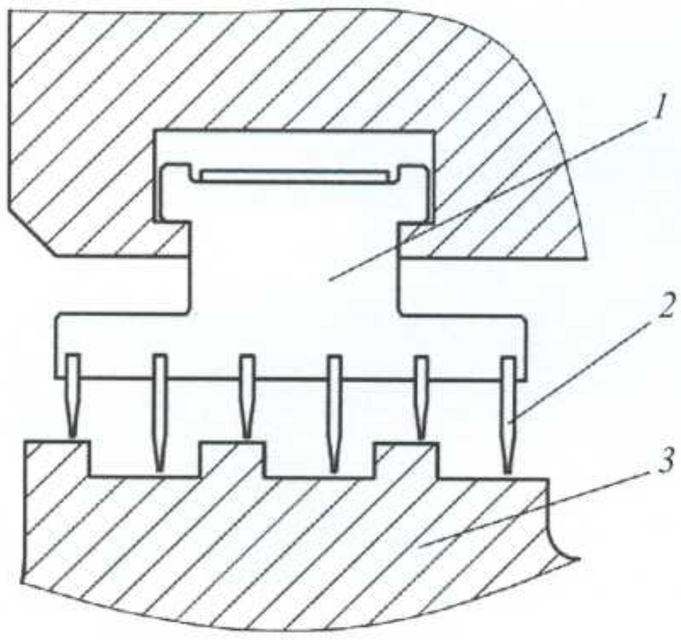
1 – козырёк диафрагмы; *2* – сотовое уплотнение; *3* – гребешок ротора; *4* – фрагмент крупного инородного предмета, запрессованного в сотовую вставку; *5* – вырывы от попадания инородных предметов; *6* – выработка сотового уплотнения

Большой накопленный положительный опыт эксплуатации паровых турбин мощностью 60 – 300 МВт с модернизированными проточными частями, в которых применены сотовые уплотнения, способствовал широкому внедрению этого вида уплотнений в проточных частях ЦВД и ЦСД на вновь проектируемых турбинах. В последние годы НПП "АРМС" совместно с НПП "Мотор" спроектировал и поставил комплекты сотовых надбандажных уплотнений для паровых турбин производства ОАО "Силовые машины": К-225-130 Харанорской и Черепетской ГРЭС; Т-185/210-6Р ТЭС "Юваскюля" (Финляндия); К-660-24,7 ТЭС "Барх" (Индия) и ТЭС "Сипат" (Индия).

Кроме этого, сотовые надбандажные уплотнения широко применяются при модернизации проточных частей паровых турбин производства ОАО "Силовые машины", в частности ЦВД турбин К-300-240 Лукомльской ГРЭС (Белоруссия) и Конаковской ГРЭС (ОГК-5). Ведутся разработки надбандажных сотовых уплотнений для модернизации ЦВД паровых турбин К-800-130 Белоярской АЭС, К-330-240-Р Череповецкой ГРЭС и К-1200-6,8/50 Нововоронежской АЭС и Ленинградской АЭС-2.



а)



б)

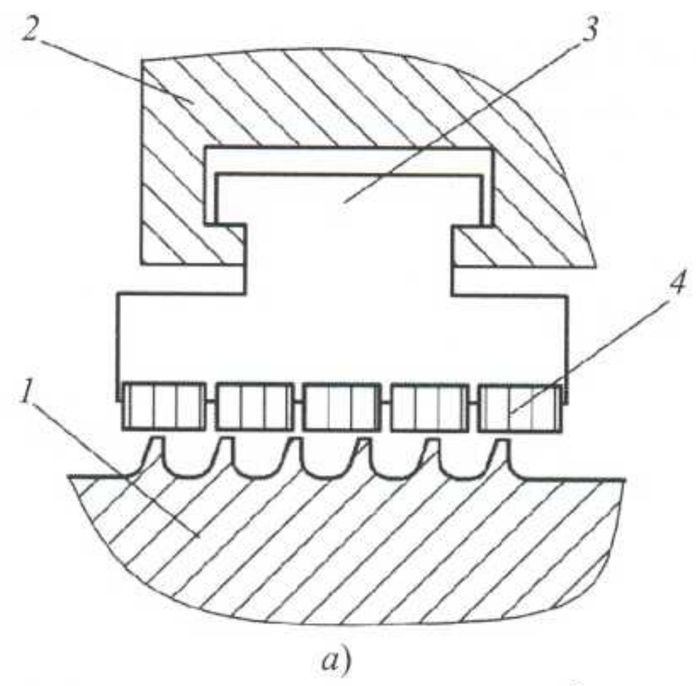
Рис. 7. Конструкция “классических” концевых уплотнений паровых турбин:

1 – сегмент концевого уплотнения; *2* – вал ротора; *3* – вставные гребешки

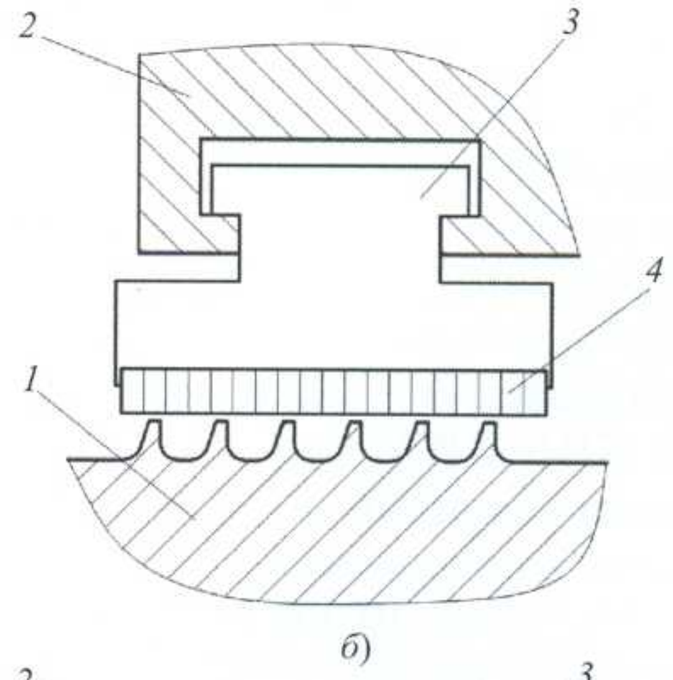
Не менее важным шагом при модернизации уплотнений паровых турбин является применение ***концевых сотовых уплотнений***. На рис. 7 показаны конструкции традиционно применяемых концевых уплотнений.

Замена существующих концевых радиальных уплотнений сотовыми позволяет уйти от таких дефектов, как обламывание “усов” при осевых перемещениях роторов турбин, уменьшить обводнение масла, повысить маневренность турбоагрегата, снизить присосы воздуха в вакуумную систему и понизить расход пара на концевые уплотнения турбоагрегата. Тем самым повышается надёжность работы, увеличивается экономичность и срок службы уплотнений, снижаются затраты на последующие капитальные ремонты.

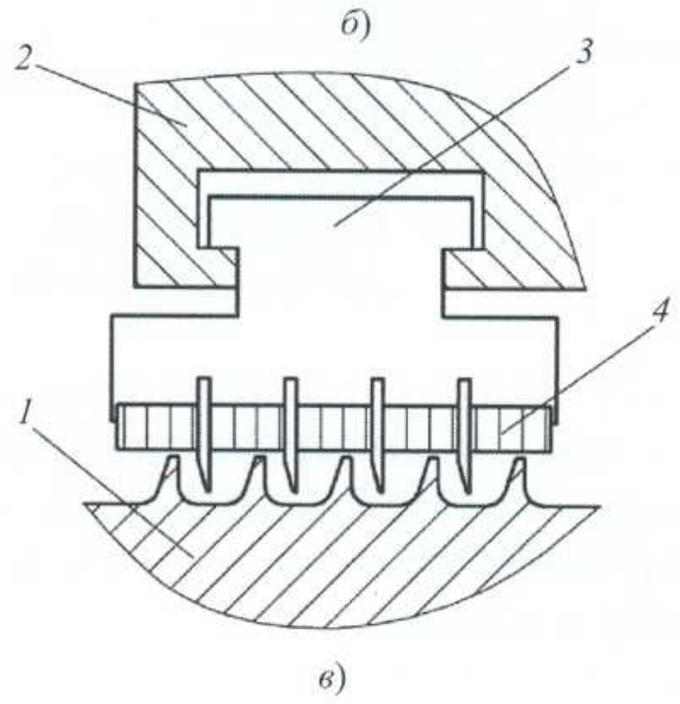
Сотовые концевые уплотнения изготавливаются так же, как надбандажные, однако отличаются от них как геометрическими размерами, так и числом сегментов в уплотняющем кольце. Максимальный диаметр кольца по уплотняемой поверхности составляет ориентировочно 780 мм, число сегментов может варьироваться от четырёх до шести, диаметр вписываемой в ячейку сот окружности составляет от 1 до 5 мм, при этом высота ячеек сохраняется в диапазоне 4 – 5 мм.



а)



б)



в)

Рис. 8. Конструкция концевых сотовых уплотнений паровых турбин:

1 – вал ротора; *2* – обойма; *3* – сегмент сотового концевого уплотнения; *4* – сотоблок

На рис. 8, *а*, *б* показаны конструкции концевых сотовых уплотнений ЦСД и ЦНД, устанавливаемые на турбины типа Р-50-130, ПТ-60-130, Т-100-130, Т-250-240, на рис. 8, *в* изображена конструкция концевого уплотнения ЦНД для турбины Т-180-130.

Главное конструктивное отличие концевых сотовых уплотнений от традиционно используемых – наличие сот на уплотняемой поверхности колец вместо “усов”, остальные геометрические параметры (сопрягаемые размеры) полностью идентичны обычно применяемым. Это обстоятельство позволяет минимизировать материальные и временные затраты при замене традиционных концевых уплотнений сотовыми.

При модернизации турбин и установке концевых сотовых уплотнений выполняются следующие работы:

проточка уплотнительных поверхностей ротора в местах установки концевых сотовых уплотнений;

подгонка и установка сегментов с сотовыми вставками на место штатных концевых уплотнений с учётом центровки (объём работ соответствует ремонту штатных концевых уплотнений при замене 100% сегментов).

В процессе оснащения турбин концевыми сотовыми уплотнениями предполагается доработка ротора, связанная со снятием поверхностного слоя металла и формированием галтелеобразных проточек. В результате этой операции убираются накопленные термоусталостные напряжения.

Установка концевых сотовых уплотнений широко применяется на перечисленных типах турбин в ОАО "Башкирэнерго", ОАО "Татэнерго", ОАО "Мосэнерго".

По заключению ОАО "ВТИ" [2, 3], опыт эксплуатации в ОАО "Мосэнерго" показал, что на большинстве турбин Т-250/300-240 в стационарных режимах наблюдается повышенное укорочение РСД-2, доходящее на некоторых турбинах до "красной черты" (–4,5). Внедрение системы охлаждения РСД-1 и металлофторопластовой ленты обостряет эту проблему. При переменных режимах, и особенно сбросах нагрузки, вероятны осевые задевания, которые могут привести к выводу ротора ЦСД-2 из строя. Для ликвидации этого дефекта целесообразны установка сотовых уплотнений на все пять уплотнительных колец и соответствующая проточка ротора.

Внедрение сотовых уплотнений в концевых уплотнениях выполнено на ряде станций ОАО "Мосэнерго", в том числе на ТЭЦ-23. Проведённые на турбине испытания показали, что в результате внедрения улучшилась работа эжекторов, уменьшилось обводнение масла и возросла вакуумная плотность. Можно принять, что давление в конденсаторе при этом снизилось на 0,005 кгс/см^2. Это приведёт к росту КПД блока на 0,17%. С учётом того, что в конденсаторном режиме блок работает не более полугода, прирост КПД блока составит 0,08% [2, 3].

Надёжность и высокие ресурсные показатели концевых сотовых уплотнений можно проиллюстрировать выдержками из акта осмотра сотовых уплотнений ЦСД-2 (блок Т-250/300-240, ТГ-4 ТЭЦ-26 ОАО "Мосэнерго"): "износ сот в радиальном направлении составляет от 0,5 до 0,8 мм, в аксиальном – до 3,5 мм. Гребни втулок РСД-2 находятся в хорошем состоянии, визуальных следов износа и подкаливания не обнаружено. Общее состояние сотовых уплотнений является удовлетворительным, ремонт и замена не требуются". При этом наработка турбины со времени установки сотовых концевых уплотнений в 2003 г. составила 40 406 ч.

Большой практический опыт, накопленный энергоремонтными предприятиями, позволяет сделать следующее заключение: доработка ротора и статора паровой турбины при установке сотовых уплотнений не вызывает серьёзных технологических проблем и может быть выполнена в условиях энергоремонтных предприятий в сроки проведения типового капитального ремонта турбины, т.е. ориентировочно за 30 – 45 дней.

Указанные работы проводились ЦРМЗ – филиалом ОАО "Мосэнерго" – при модернизации блоков К-300-240 Каширской ГРЭС (ОГК-1), Т-250-240 ТЭЦ-23, -25, -26 (ОАО "Мосэнерго"); филиалом ОАО "Татэнерго" "КамЭнергоРемонт" при модернизации турбин типа Т-100(110)-130, Р-40-130, ПТ-60 – 90(130) для Нижнекамской ТЭЦ, Набережночелнинской ТЭЦ, Казанской ТЭЦ-3; ОАО "Уралэнергоремонт" при модернизации турбин класса К-300-240 для Ириклинской ГРЭС (ОГК-1).

Таким образом, эксплуатационная надёжность и практическое подтверждение эффективности использования надбандажных и концевых сотовых уплотнений позволяют рекомендовать данный тип уплотнений к широкому промышленному внедрению.

Одной из важных задач при создании паротурбинного оборудования является унификация конструкций отдельных узлов и элементов, позволяющая снизить затраты при их изготовлении и эксплуатации.

В связи с изложенным понятна необходимость создания унифицированной конструкции надбандажных сотовых уплотнений, которую можно было бы использовать в любых типах турбин. Сотовые уплотнения такой конструкции должны отвечать следующим критериям:

быть унифицированы для установки на любую паровую турбину;

быть легкомонтируемыми, без использования специальных станков и оборудования;

устанавливаться без существенной доработки проточной части, в частности статора.

Создание конструкции сотовых уплотнений, удовлетворяющих перечисленным требованиям, позволит снизить в целом стоимость комплекта сотовых уплотнений, иметь неснижаемый запас сотовых вставок, которые могут устанавливаться на любую ступень и любой тип турбины.

Научно-производственное предприятие "АРМС" и СКБ "Турбина" Ленинградского металлического завода – филиала ОАО "Силовые машины" – совместно ведут работы в данном направлении.

На рис. 9 показана конструкция сотовой вставки, которая отвечает перечисленным требованиям. По геометрическим параметрам данная унифицированная вставка полностью идентична корытообразным осерадиальным вставкам, изготовленным

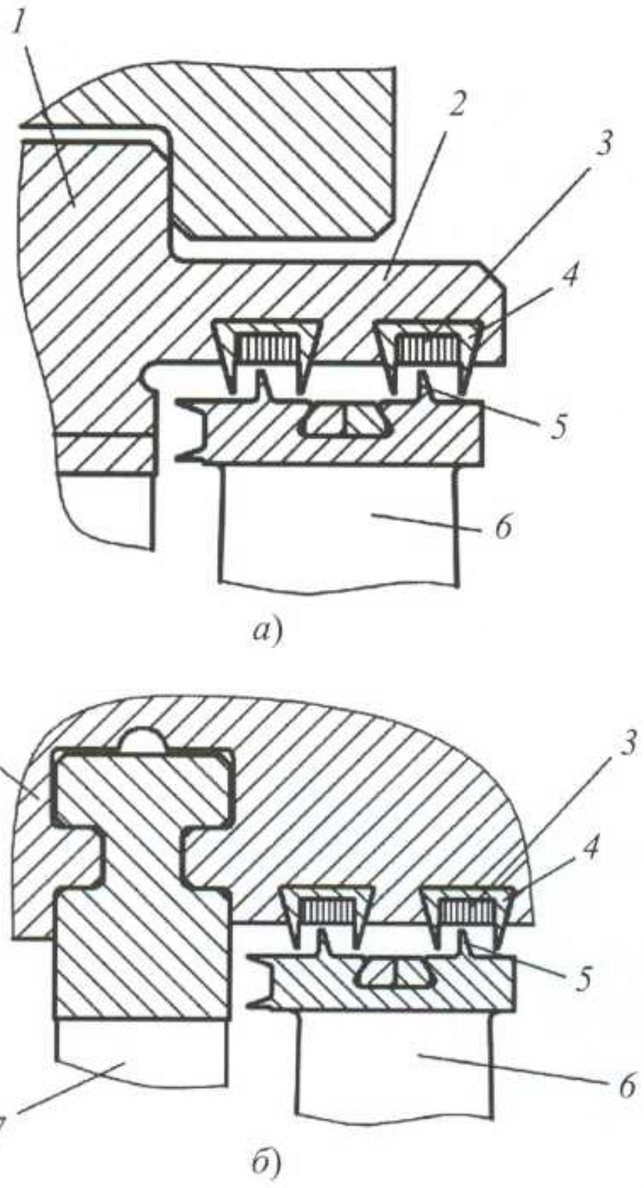


Рис. 9. Конструкция унифицированных надбандажных сотовых уплотнений козырьков диафрагм (*а*), обойм и внутреннего цилиндра (*б*):

1 – диафрагма; *2* – козырёк диафрагмы; *3* – сотоблок; *4* – сотовая вставка; *5* – гребешок ротора; *6* – рабочая лопатка; *7* – направляющая лопатка; *8* – обойма

из материала Х6, может устанавливаться как в козырьках диафрагм (рис. 9, *а*), так и в обойме или внутреннем цилиндре (рис. 9, *б*), и поэтому может применяться практически на всех типах турбин мощностью 60 – 800 МВт, как модернизируемых, так и вновь проектируемых.

Технологически установка сотовых уплотнений не вызывает сложностей и полностью идентична установке корытообразных вставок Х6 во внутреннем цилиндре или обойме.

Что касается установки указанных вставок в козырьки диафрагм взамен лепестковых уплотнений, то в этом случае необходимо выполнить следующие механические операции:

для минимизации термических деформаций осуществить наплавку, термообработку и механическую обработку двух половин диафрагм совместно, зафиксировав в технологических приспособлениях взаимное положение верхних и нижних половин;

после проведения окончательной механической обработки обеспечить заложенные в сборочных чертежах диафрагм требования к зазорам по разъёму между верхними и нижними половинами. При необходимости допускается наплавка разъёмов по ремонтным технологиям с последующей механической доработкой;

одновременно с наплавкой торцевой части заварить отверстия под зачеканку уплотнительных и упорных пластин с целью улучшения фиксации сотовых вставок в козырьках.

В настоящее время, в рамках реализации совместной программы ЛМЗ – филиала ОАО "Силовые машины" – и НПП "АРМС", изготовлена опытная партия сотовых вставок указанной унифицированной конструкции и идёт отработка технологических операций по их монтажу в проточной части экспериментальной обоймы.

По результатам данных работ будут разработаны маршрутно-технологические карты, позволяющие производить установку сотовых вставок в проточную часть паровых турбин, как вновь проектируемых в условиях завода, так и модернизируемых в условиях электростанций или энергоремонтных предприятий.

Выводы

1. Использование сотовых уплотнений позволяет сохранить минимальные надбандажные протечки на протяжении более длительного времени по сравнению с эксплуатацией уплотнений других видов.

2. Сотовые уплотнения позволяют предотвращать износ уплотнительных усиков бандажей рабочих лопаток в случае возникновения нештатных ситуаций (значительные радиальные и аксиальные задевания в бандажных уплотнениях, попадание в проточную часть грата и др.).

3. Создание новой унифицированной конструкции сотовых уплотнений существенно сокращает сроки и затраты при их установке во время проведения капитальных ремонтов турбин и не требует доработки их проточных частей.

4. Высокая надёжность и эффективность применения сотовых надбандажных и концевых уплотнений на различных типах паровых турбин позволяет рекомендовать их к широкому промышленному внедрению.

Список литературы

1. *Применение* сотовых уплотнений на турбинах / Салихов А. А., Юшка М. П., Ушинин С. В., Ивах А. Ф., Салихов А. А. – Электрические станции, 2005, № 6.
2. *Продление* ресурса турбин Т-250 / 300-240 УТМЗ в ОАО "Мосэнерго" / Резинских А. Ф., Авруцкий Г. Д., Фёдоров М. В., Быков С. А. – Электрические станции, 2006, № 6.
3. *Первые* результаты использования систем уплотнений сотовой конструкции взамен уплотнений традиционного типа в паровых турбинах ТЭЦ № 16 и 23 ОАО "Мосэнерго" / Сахаров А. М., Ушинин С. В., Малютин Ю. П., Лунин И. А. – Энергосбережение и водоподготовка, 2005, № 2.