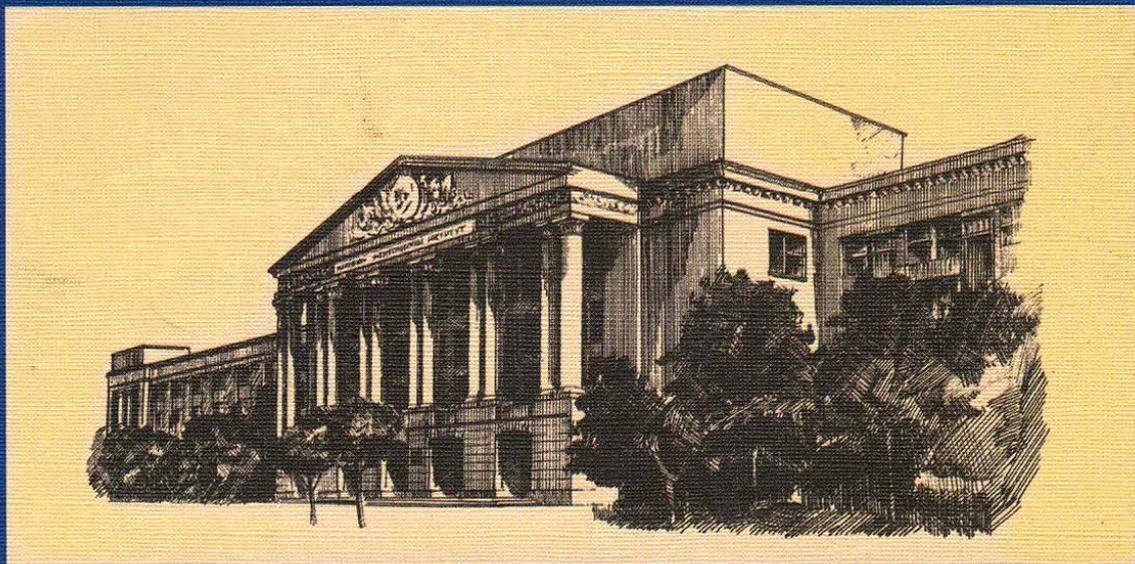


4 — 6 июня 2012 г.  
Москва, НИУ МЭИ

**Э** 2012  
НЕРГО



**МРЭДЫ**

Второй Всероссийской научно-практической конференции

**Повышение надежности  
и эффективности эксплуатации  
электрических станций  
и энергетических систем**

**МОИ**  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

**РФИ**

А.Г.Костюк<sup>1</sup>, В.Г.Грибин<sup>1</sup>, Б.Н.Петрунин<sup>1</sup>, А.С.Лисянский<sup>2</sup>, К.В.Горлицын<sup>3</sup>, С.В.Ушинин<sup>3</sup>  
Московский энергетический институт (технический университет) (1),  
ЛМЗ филиал ОАО «Силовые машины», Санкт-Петербург (2),  
Научно-производственное предприятие «АРМС», Москва (3)

## ПРАКТИЧЕСКИЙ ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ СОТОВЫХ НАДБАНДАЖНЫХ УПЛОТНЕНИЙ НА ТУРБОАГРЕГАТАХ МОЩНОСТЬЮ 60÷800МВт

### АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрен практический опыт внедрения сотовых уплотнений в проточных частях паровых турбин мощностью 60÷800МВт. Представлены наиболее распространенные конструкции надбандажных и концевых сотовых уплотнений, применяющихся при модернизации действующего паротурбинного оборудования.

Рассмотрены результаты стендовых исследований по сравнительной оценке расходных и силовых характеристик сотовых, радиальных и осерадиальных уплотнений. Приведены результаты экспресс-испытаний по оценке эффективности применения сотовых надбандажных уплотнений в ЦВД турбоагрегата К-800-240 Пермской ГРЭС.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Паровые турбины тепловых электростанций, а также турбоагрегаты, входящие в состав парогазовых установок, являющиеся базовым генерирующим оборудованием, обеспечивающим более 60% вырабатываемой электроэнергии и почти 32% тепловой мощности для отопления потребителей жилищно-коммунального хозяйства России.

В то же время, существенная часть эксплуатирующегося паротурбинного оборудования тепловых электрических станций выработала свой ресурс или выработает его в ближайшее время. Анализ показывает, что к 2015 году более 64% установленных мощностей исчерпают свой парковый ресурс. Это обуславливает возрастающую потребность в проведении модернизации и замещении изношенного паротурбинного оборудования электростанций. При этом следует последовательно и планомерно решать задачу реконструкции действующего оборудования, в т.ч. повышения тепломеханических и эксплуатационных показателей паровых турбин при их модернизации на основе применения передовых технологий. Одним из важных направлений работ по повышению надежности и экономичности паротурбинного оборудования является модернизация проточных частей, в том числе усовершенствование надбандажных и концевых уплотнений.

В последнее десятилетие различными организациями был выполнен ряд работ по созданию конструкций сотовых уплотнений для их применения в проточных частях паровых турбин. В основном это касалось установки надбандажных сотовых уплотнений в ЦВД паровых турбин мощностью 30МВт. В конце 90-х годов в ряде энергосистем, в т.ч. ОАО «Мосэнерго», были предприняты попытки использовать уплотнения сотовой конструкции для влагулавливания с периферии безбандажных ступеней ЦВД турбин класса ПТ-80, Т-100, К-200, Т-175, Т-250. В те же сроки на турбинах Т-250/300-240 применены задние концевые уплотнения сотовой

конструкции на РСД-2, а в начале нашего столетия установлено концевое уплотнение на турбоагрегате К-500-65/3000 Смоленской АЭС.

Необходимо отметить, что данные работы носили опытно-экспериментальный характер, ограничились единичным внедрением и не нашли широкого серийного применения в проточных частях паровых турбин большой мощности на докритические и сверхкритические параметры пара.

### 2. КОНСТРУКЦИИ СОТОВЫХ УПЛОТНЕНИЙ, ПРИМЕНЯЮЩИХСЯ ПРИ МОДЕРНИЗАЦИИ ПРОТОЧНЫХ ЧАСТЕЙ ПАРОВЫХ ТУРБИН МОЩНОСТЬЮ 60÷300МВт

В последние годы НПП «АРМС» совместно с заводами-изготовителями паровых турбин ОАО «Силовые машины» г.Санкт-Петербург, а также ЗАО «УТЗ» г.Екатеринбург выполнена разработка концевых и надбандажных сотовых уплотнений для широкого мощностного ряда турбоагрегатов 60÷300МВт. В основном работа была направлена на интеграцию конструкций сотовых уплотнений, применяющихся в авиадвигателестроении, в проточные части энергетических турбин. В данных проектах достаточно эффективно использовался опыт предприятия ОАО НПП «Мотор» г.Уфа, на производственных площадях которого изготавливались сотовые уплотнения.

Наиболее распространенные конструкции сотовых уплотнений, применяющихся в настоящее время в проточных частях турбоагрегатов, представлены на рис.1,2,3,4.

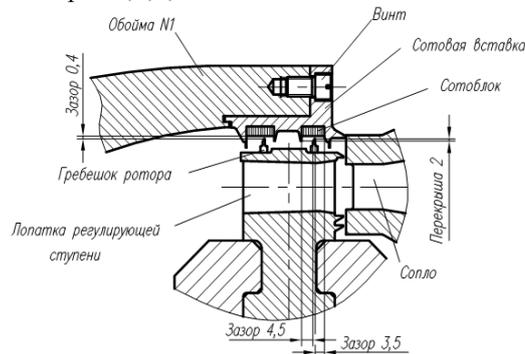


Рис.1. Сотовое уплотнение регулирующей ступени т/а ПТ-80-130

Данные типы сотовых уплотнений были установлены в проточных частях паровых турбин класса Т-100-130, ПТ-60(80)-130, К-200-130, К-300-240. Общее количество турбоагрегатов с модернизированными проточными частями составляет более 120 единиц.

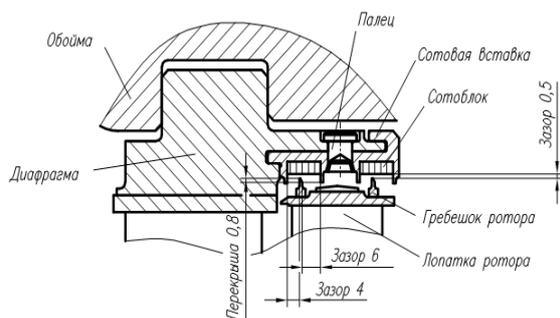


Рис.2. Сотовое надбандажное уплотнение ЦВД и ЦСД т/а К-200-130

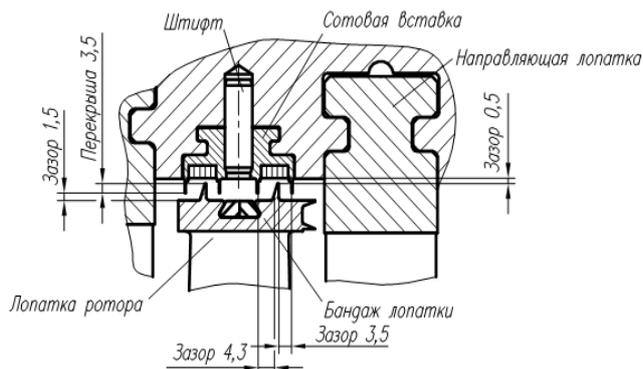


Рис.3. Сотовое надбандажное уплотнение ЦВД т/а К-300-240

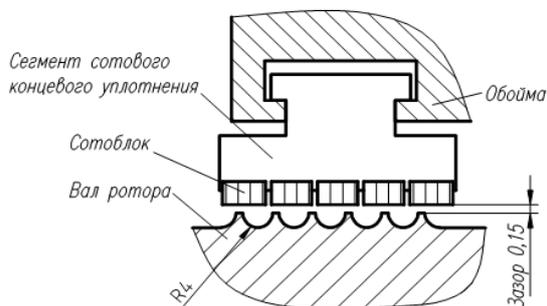


Рис.4. Сотовое концевое уплотнение ЦСД-2 и ЦНД т/а Т-250/300-240

В то же время недостаточно изученными оставались вопросы, связанные с оптимизацией геометрических размеров ячеек сотовых уплотнений, влияющие износа сотовой поверхности на расходные и силовые характеристики уплотнений, а также назначение обоснованных минимально-допустимых зазоров в надбандажных уплотнениях проточных частей турбоагрегатов на сверхкритическое давление (СКД). На ЛМЗ филиал ОАО «Силловые машины» были выполнены исследования механических повреждений, возникающих при контакте гребня ротора с сотовой поверхностью при различных оборотах ротора ( $2 \div 300$  об/мин). В процессе работ были проведены сравнительные испытания сотовых и металлокерамических вставок. Анализ результатов показал, что сотовые уплотнения с ячейкой  $0,9 \div 1,5$  мм (диаметр вписываемой окружности) достаточно «мягкие» и подвержены деформации при

контакте, при этом гребень ротора имеет незначительное истирание. Данные исследования подтвердили практику многолетней эксплуатации сотовых концевых и надбандажных уплотнений в проточных частях паровых турбин. На рис.5,6,7,8 представлены наиболее характерные повреждения сотовых и традиционно применяемых радиальных уплотнений.



Рис.5. Надбандажное сотовое уплотнение проточной части ЦВД т/а К-200-130 после задеваний



Рис.6. Надбандажное радиальное уплотнение проточной части ЦСД т/а К-200-130 после задеваний

На рис.5,6 представлены фотографии диафрагм проточных частей ЦВД и ЦСД т/а К-200-130. Данные повреждения были получены при возникновении аварийной ситуации, связанной с увеличением вибрации ротора до значений  $11,2$  мм/сек. Осмотр сотовых уплотнений ЦВД показал, что имеется выработка на сотовой поверхности в радиальном направлении, значение которой составило до  $3 \div 4$  мм, в осевом до  $1 \div 2$  мм, при этом отсутствовал износ гребня бандажа.

При осмотре радиальных уплотнений ЦСД (рис.6) зафиксировано полное истирание радиальных гребней, расположенных на диафрагме.



Рис.7. Концевое сотовое уплотнение ЦНД т/а Т-250/300-240 после 5 лет эксплуатации



Рис.8. Концевое лабиринтное уплотнение ЦВД т/а К-200-130 после задеваний

На рис.7 показаны концевое сотовое уплотнение ЦНД турбоагрегата Т-250/300-240 после 5 лет эксплуатации. Выработка сотовой поверхности составила в радиальном направлении до  $1\div 2,5$ мм, в осевом - до  $2\div 3$ мм. Состояние сотовой поверхности признано удовлетворительным и уплотнение допущено к дальнейшей эксплуатации.

На рис.8 показан фрагмент концевых уплотнений ЦВД т/а К-200-130 после задеваний с характерным заминанием и поломкой гребней сегментов.

Таким образом, можно констатировать, что при возникновении внештатных ситуаций, связанных с повышенной вибрацией ротора, при контакте ротора о сотовую поверхность происходит в первую очередь прорезание паза в сотах при незначительном истирании гребня. При этом протечки рабочей среды через сотовое уплотнение практически не увеличиваются и уплотнение продолжает эффективно работать при минимально допустимых зазорах. Данное заключение справедливо как для надбандажных, так и концевых сотовых уплотнений.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ СТЕНДОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО СРАВНИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКЕ СИЛОВЫХ И РАСХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СОТОВЫХ, РАДИАЛЬНЫХ И ОСЕРАДИАЛЬНЫХ УПЛОТНЕНИЙ

Одним из немаловажных аспектов применения сотовых уплотнений в проточных частях турбоагрегатов большой единичной мощности на сверхкритическое давление является сохранение динамической устойчивости валопровода, особенно это актуально для ротора цилиндра высокого давления. Для исследования данной проблемы в НИУ МЭИ на кафедре паровых и газовых турбин им.А.В.Щегляева совместно с ЛМЗ филиал ОАО «Силловые машины» и НПП «АРМС» был проведен ряд стендовых работ по сравнительной оценке силовых и расходных характеристик сотовых, радиальных и осерадиальных надбандажных уплотнений [1]. Сравнение выполнено при режимных параметрах, одинаковых для всех типов исследуемых уплотнений. Для того, чтобы считать сравнение корректным, все представленные ниже результаты приведены к единым начальным параметрам потока (давление, температура, окружная составляющая скорости потока на вхо-

де). Для всех экспериментов было принято: начальное давление перед уплотнением  $P_0 = 124$  кПа, температура  $T_0 = 32^\circ\text{C}$ ; окружная составляющая скорости потока на входе в уплотнение  $C_0 = 42$  м/с; отношение давлений  $\varepsilon = p_k/p_0 = 0,806$ , где  $p_k$  – давление за уплотнением. Необходимо отметить, что по своим геометрическим характеристикам, все исследуемые уплотнения были идентичны уплотнениям, применяемым в проточных частях паровых турбин. Ниже приведены типы данных уплотнений, а также представлены основные результаты испытаний (рис.9,10).

Приведенные зависимости на рис.9 получены для условия  $\delta_{\text{вар.1}} = \text{var}$ ,  $\delta_{\text{вар.2}} = \text{const} = 1,5$  мм, при этом вариант 1 идентичен сотовым надбандажным уплотнениям ЦВД т/а класса Т-100-130, ПТ-60(80)-130, К-200-130, К-300-240, К-660-240; вариант 2 соответствует радиальным уплотнениям, применяемым в ЦВД т/а класса ПТ-60(80)-130, Р-50-130, К-200-130.

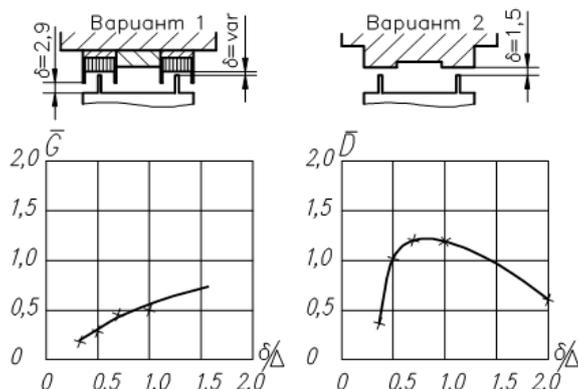


Рис.9. Графики зависимости отношений расходных и силовых характеристик сотового (вар.1) и радиального (вар.2) уплотнений

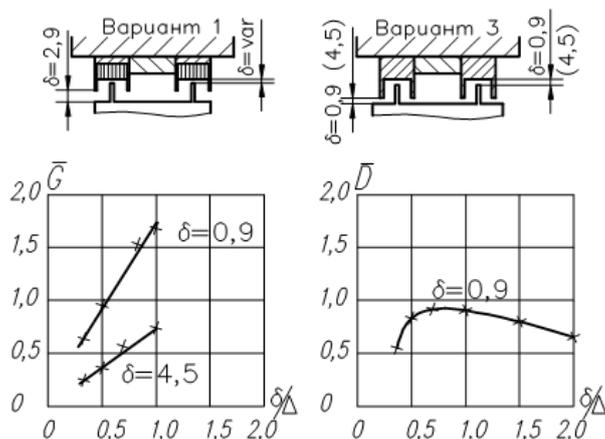


Рис.10.Графики зависимости отношений расходных и силовых характеристик сотового (вар.1) и осерадиального (вар.3) уплотнений

Приведенные зависимости на рис.10 получены для условия  $\delta_{\text{вар.1}} = \text{var}$ ,  $\delta_{\text{вар.3}} = \text{const} = 0,9$  (4,5) мм., при этом вариант 3 идентичен надбандажным осерадиальным уплотнениям, применяемым в ЦВД т/а класса Т-100-130, К-300-240, Т-250-240.

Анализ зависимостей (рис.9), полученных для сотового и радиального уплотнений показывает, что расход через сотовое уплотнение при рабочем зазоре ( $\delta = 0,5$ мм) составляет 40% от расхода через радиальное уплотнение при рабочем зазоре для дан-

ного уплотнения равным 1,5мм. Жесткость аэродинамических сил сотового уплотнения при зазорах меньших 0,5мм имеет тенденцию к резкому снижению, по сравнению с жесткостью прямогочного уплотнения, имеющего величину радиального зазора  $\delta=1,5$ мм.

Анализ результатов испытаний сотового и осердиального уплотнений (рис.10) показывает, что расход через сотовое уплотнение при рабочем зазоре ( $\delta=0,5$ мм) практически равен расходу через осердиальное уплотнение с рабочим радиальным зазором 0,8-1,0 мм, при этом жесткость неконсервативной составляющей АС сотового уплотнения ниже на 10-15% по сравнению с осердиальным уплотнением. Расход через сотовое уплотнение при рабочем зазоре ( $\delta=0,5$ мм) в 2,5 раза ниже, чем у осердиального уплотнения с рабочим радиальным зазором равным 4-5 мм.

В ходе экспериментов с помощью пневмометрического зонда были измерены скорости и направления потока в надбандажной камере на границах статора и ротора. При проведении сравнений параметров вихря можно сделать заключение: в сотовом уплотнении интенсивность вихря значительно ниже, чем в уплотнении с гладкими стенками надбандажной камеры, при этом на некоторых режимах снижение составляло до 30%. При малых радиальных зазорах ( $\delta \leq 0,5$ мм) в камерах устанавливалось практически канальное течение.

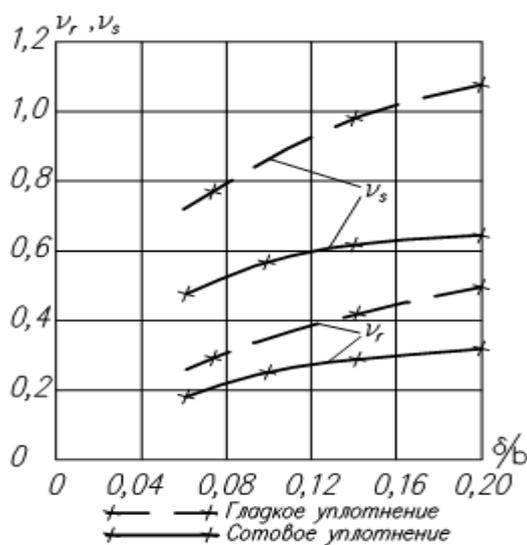


Рис.11. Параметры вихря на поверхности статора и ротора уплотнений

Таким образом, можно сделать качественный вывод о том, что повышенная шероховатость сотовой поверхности существенно снижает величину окружной составляющей потока в надбандажной камере и, следовательно, способствует уменьшению величины неконсервативной составляющей аэродинамической силы.

Это утверждение полностью совпадает с предположением о том, что применение сотовой поверхности в надбандажном уплотнении не является дестабилизирующим фактором, с точки зрения возникновения низкочастотной вибрации ротора[2].

#### 4. КОНСТРУКЦИЯ УНИФИЦИРОВАННОГО СОТОВОГО УПЛОТНЕНИЯ ДЛЯ ТУРБОУПЛОТНЕНИЙ МОЩНОСТЮ 300-1200МВт. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПРЕСС-ИСПЫТАНИЙ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ К-800-240

Результаты экспериментальных исследований были учтены при разработке и внедрении унифицированного сотового уплотнения (рис.12), устанавливаемого в проточных частях, в том числе, с реактивным облопачиванием паровых турбин на СКД мощностью 300-800МВт, а также в ЦВД турбоагрегатов класса К-1200 для АЭС.

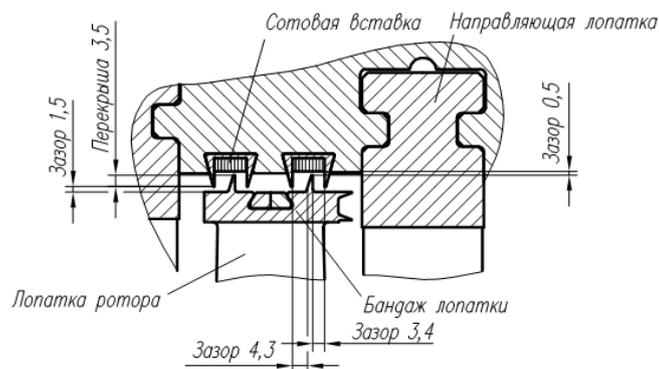


Рис.12.Сотовые надбандажные уплотнения ЦВД и ЦСД т/а К-300-240,К-800-240,К-1200-6,8

Главной отличительной особенностью данного типа сотового уплотнения является полная идентичность геометрических размеров с традиционно применяемыми корытообразными вставками.

В 2011г. впервые сотовые надбандажные уплотнения были установлены в ЦВД (3-10 ступень) блока К-800-240-5 ст.3 Пермской ГРЭС, ОГК-1. При этом монтажные радиальные зазоры были уменьшены в среднем с 2,5мм до 0,8-1,0мм. При проведении тепловых экспресс-испытаний, выполненных специалистами ОАО «Южный инженерный центр», увеличение относительного внутреннего КПД цилиндра составило 0,6%, что эквивалентно увеличению мощности цилиндра на 1,9МВт [3]. Данные результаты достаточно хорошо коррелируются с расчетами завода-изготовителя ЛМЗ филиал ОАО «Силовые машины». В ходе эксплуатации энергоблока, в том числе, на переходных режимах не отмечено отклонений от требований ПТЭ по низкочастотной вибрации.

Опыт внедрения сотовых уплотнений на различных типах паровых турбин, а также анализ полученных экспериментальных данных позволил сделать заключение о возможности выполнения модернизации ЦВД турбоагрегата Т-250/300-240 с целью улучшения экономических характеристик.

Необходимо напомнить, что в 70-е годы прошлого столетия при промышленном освоении данного типа турбин специалисты ОАО «Мосэнерго» столкнулись с достаточно серьезной проблемой, связанной с возникновением низкочастотной вибрации ротора высокого давления при достижении турбоагрегатом пороговой мощности. Данная задача была решена за счет внедрения виброустойчивых

надбандажных уплотнений с увеличенными радиальными зазорами до значений  $4,5 \div 5$  мм [4].

В ходе выполнения работ по модернизации проточной части ЦВД специалистами НПП «АРМС» была разработана и согласована с ЗАО «УТЗ» конструкция сотовых надбандажных уплотнений с радиальными зазорами, составляющими  $0,5 \div 0,7$  мм, которая была реализована на блоке Т-250/300-240 ст.9 ТЭЦ-21 в ОАО «Мосэнерго». Кроме этого, на данном турбоагрегате для повышения маневренности и исключения присосов в вакуумную систему были установлены концевые сотовые уплотнения в обоймах ЦСД-2 и ЦНД с зазорами по уплотняющей поверхности равными  $0,15 \div 0,2$  мм. Дальнейшая эксплуатация энергоблока показала, что комплексная установка сотовых уплотнений с уменьшенными радиальными зазорами в проточной части не оказывает негативного влияния на виброустойчивость валопровода турбоагрегата. По расчетам, выполненным специалистами ЗАО «УТЗ» и ОАО «ВТИ», установка в ЦВД сотовых надбандажных уплотнений повышает относительный внутренний КПД цилиндра на  $0,7 \div 1,0$ %, что эквивалентно увеличению мощности на  $0,5 \div 1,0$  МВт. Установка концевых сотовых уплотнений в ЦСД-2 и ЦНД, кроме улучшения маневренности турбоагрегата, сокращения времени пусковых операций, увеличивает КПД блока на  $0,17$ % на конденсационном режиме [5]. Результаты испытаний, выполненные специалистами ОАО «Южный инженерный центр», подтвердили эффективность проведенной модернизации турбоагрегата Т-250/300-240.

## ВЫВОДЫ

1. Разработанные конструкции сотовых надбандажных, диафрагменных и концевых уплотнений позволяют производить их установку практически на все типы паровых турбин отечественного производства.

2. Сотовые уплотнения улучшают маневренность турбоагрегата, сохраняют высокие эксплуатационные характеристики в течение межремонтного периода, обеспечивают более высокие значения относительного внутреннего КПД цилиндров по сравнению с традиционными видами уплотнений, применяемых в энергетике.

3. Установка надбандажных сотовых уплотнений в ЦВД турбоагрегатов мощностью  $300 \div 800$  МВт не вызывает низкочастотную вибрацию.

4. Сотовые уплотнения могут быть рекомендованы к использованию при разработке новых типов турбоагрегатов, в том числе на сверхкритические параметры пара ( $T=600-620^\circ\text{C}$ ,  $P \leq 29,4$  МПа).

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ОАО – открытое акционерное общество;  
АЭС – атомная электростанция;  
ЛМЗ – Ленинградский Металлический завод;  
ОАО «ВТИ» – открытое акционерное общество «Всероссийский Тепломеханический институт»;  
ЗАО «УТЗ» – закрытое акционерное общество «Уральский турбинный завод»;  
т/а – турбоагрегат;  
ЦВД – цилиндр высокого давления;  
ЦСД – цилиндр среднего давления;  
ЦНД – цилиндр низкого давления;  
РСД – ротор среднего давления;  
СКД – сверхкритическое давление;  
ОГК – опто-генерирующая компания;  
ГРЭС – государственная районная электростанция;  
ПТЭ – правила технической эксплуатации;  
КПД – коэффициент полезного действия;  
АС – аэродинамическая сила;  
МВт – мега Ватт;  
Кпа – кило Паскаль;  
 $G$  – расход через уплотнение, кг/с;  
 $D_n$  – жесткость неконсервативной возмущающей силы Н/м;  
 $T$  – температура,  $^\circ\text{C}$ ;  
 $P$  – давление, Н/м<sup>2</sup>;  
 $\delta$  – зазор в уплотнении, мм;  
 $\Delta$  – толщина гребня ротора, мм;  
 $b$  – высота камеры уплотнения, мм;  
 $v_r$  – параметры вихря на роторе;  
 $v_s$  – параметры вихря на статоре.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Экспериментальное** исследование новых типов уплотнения для паровых турбин. В.Г.Грибин., С.С.Дмитриев., А.Г.Костюк., Б.Н.Петрунин., С.В. Ушинин. // Отчет о НИР М.;МЭИ, 2011.: УДК 621.125.
2. **Экспериментальное** обоснование методики расчета аэродинамических возбуждающих сил в уплотнениях турбомашин А.Г.Костюк., С.А.Серков., Б.Н.Петрунин., А.А.Чистов. Теплоэнергетика, 1994, №5, С.32-38.
3. **Результаты** тепловых испытаний турбины ЛМЗ типа К-800-240-5 (ст.№3) Пермской ГРЭС – филиал ОАО ОГК-1 до и после установки надбандажных сотовых уплотнений 3-10 ступеней ЦВД. О.В.Фатъков., А.М.Сахаров. С.В.Александров. М., ОАО «Южный ИЦЭ», 2011.
4. **Г.Д. Баринберг., Ю.М.Бродов., А.А.Гольдберг., Л.С.Иоффе., В.В.Кортенко., В.Б.Новоселов., Ю.А.Сахнин.** под ред. проф. д.т.н. Ю.М.Бродова и к.т.н. В.В.Кортенко. Паровые турбины и турбоустановки Уральского турбинного завода. Е., Априо, 2010.
5. **В.Ф.Резинских., Г.Д. Авруцкий., М.В.Федоров., С.А. Быков.** Продление ресурса турбин Т-250/300-240 УТМЗ в ОАО Мосэнерго. Электрические станции, 2006, №6, С.4-8.