

УДК 621.165

Совершенствование уплотнений паровых турбин

Сацкевич Я.М., Шнипова М.В.

Научный руководитель – ст. препод. ПАНТЕЛЕЙ Н.В.

Система уплотнений паровой турбины предназначена для исключения поступления атмосферного воздуха в вакуумную систему через концевые уплотнения цилиндров, а также для предупреждения выхода пара в атмосферу из цилиндра с избыточным его давлением в них [1].

В начальный период развития паротурбинной энергетики преобладали одноцилиндровые турбины с низкими начальными параметрами пара. Уплотнения их цилиндров имели 3 камеры со стороны избыточного давления пара:

- отвода протечек пара в вакуумный отбор,
- подвода уплотняющего пара,
- отвода паровоздушной смеси в атмосферу машинного зала.

Уплотнения цилиндров со стороны разрежения (вакуума) имели 2 камеры:

- подвода уплотняющего пара;
- отвода паровоздушной смеси в машинный зал.

Камеры подвода уплотняющего пара располагались между камерой отвода паровоздушной смеси в машинный зал и отводом протечек пара в сторону вакуума. Контроль за уплотнениями производился по облачку пара из «вестовой» трубы, отводящей в машинный зал паровоздушную смесь из камеры каждого уплотнения. Для обнаружения выхода перегретого (невидимого) пара над вестовой трубой устанавливалась металлическая лопасть на оси, вертушка или полоски тонкой фольги. Управление работой уплотнений производилось с помощью вентиля на трубах подачи уплотняющего пара к каждому уплотнению или вентиля на отводящих трубах протечек пара в сторону вакуума при наличии избыточного давления (самоуплотнения). Вентили располагались так, чтобы при управлении ими «вестовая» труба находилась в поле зрения оператора.

Тяга в «вестовой» трубе, возникающая благодаря разности плотностей пара и воздуха, создавала небольшое разрежение во внешней камере, которое при высоте трубы 1,8 м и температурах пара 100 °С и воздуха 20 °С, не превышало 10 Па (1 мм вод. ст.). Поэтому при лёгком парении из «вестовой» трубы скорости и расходы пара и воздуха в камере уплотнений были ничтожны, а разрежение в ней поддерживалось с высокой точностью. В этих условиях такие явления, как выход пара из уплотнений или присосы воздуха в вакуумную систему полностью зависели от машиниста турбины.

С появлением многоцилиндровых турбин на повышенные и сверхкритические начальные параметры пара ручное управление вентилями и наблюдение за многочисленными «вестовыми» трубами стало затруднительным. Кроме того, сами «вестовые» трубы были признаны неэстетичными, а выход пара из них был причиной повышенной влажности в машинном зале, поэтому было решено автоматизировать работу уплотнений: уплотняющий пар стали подавать через общий регулятор давления с контролем давления и температуры пара, а отвод паровоздушной смеси из внешних камер уплотнений выполнили в «сальниковый» охладитель, переименованный впоследствии в конденсатор пара уплотнений (КПУ). В КПУ с помощью эжектора поддерживается разрежение в пределах 10-20 кПа. С учётом гидравлического сопротивления труб это обеспечивает в камерах отвода паровоздушной смеси уплотнений разрежение около 6 кПа и позволяет отказаться от «вестовых» труб.

Важнейшими разработками в области турбостроения, связанными с совершенствованием проточных частей паровых турбин, являются: оптимизация зазоров в проточной части, меридиональное профилирование ступеней паровой турбины, применение модернизированных конструкций лабиринтовых и концевых уплотнений, организация оптимальной схемы влагоудаления последних ступеней паровых турбин, переход к новому

типу облопачивания с цельнофрезерованными бандажами. Улучшение работы концевых уплотнений современных паровых турбин обеспечивает надежную, экономичную и маневренную работу турбоагрегата.

Один из способов совершенствования проточных частей паровых турбин средней и большой мощности с необандаженными рабочими лопатками является уменьшение периферийных зазоров за счет использования сотовых уплотнительных сегментов [2].

Сотовые уплотнения – это усовершенствованный тип уплотнений с использованием сотовой поверхности. Конструктивно соты имеют форму шестигранных ячеек с диаметром вписанной окружности, равной 1,5мм. Сотоблоки изготавливаются из жаростойкой хромоникелевой фольги толщиной 0,05мм и припаиваются к вставкам, из которых собирается кольцо сотового уплотнения для последующего монтажа в проточную часть турбины.

Применение сотовых уплотнительных сегментов является одним из эффективных методов совершенствования аэродинамики проточных частей паровых турбин, в результате чего обеспечивается повышение экономичности за счет снижения протечки рабочего тела в периферийном зазоре над рабочими лопатками и надежности работы за счет исключения повреждения профильной части рабочих лопаток в случае задевания их вершин о сотовые сегменты.

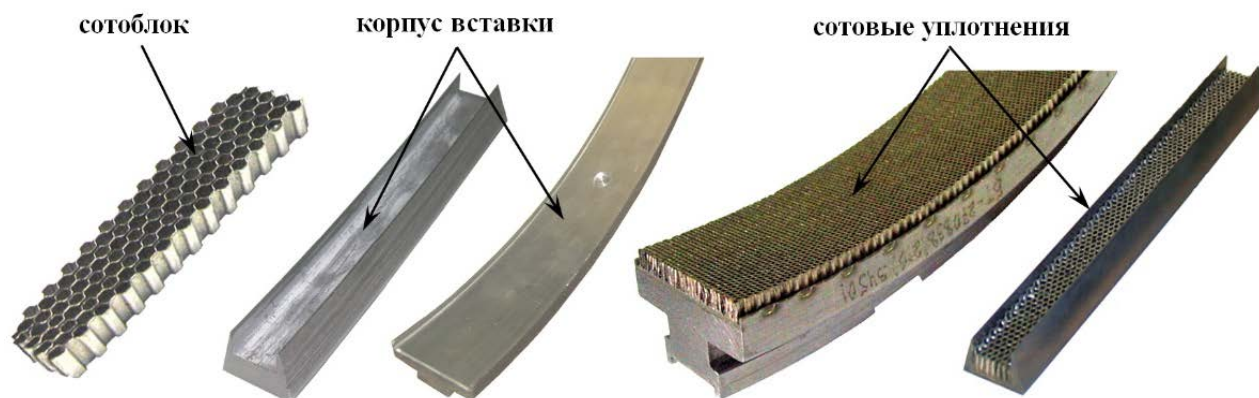


Рисунок 1 – Конструкция сотовых уплотнений

Основным преимуществом предлагаемой конструкции сотовых уплотнительных сегментов является меньшая жесткость как по сравнению с традиционно применяемыми конструкциями уплотнений, так и по сравнению с альтернативными вариантами исполнения сотовых уплотнительных сегментов.

Уплотнительные сегменты собраны из уплотнительных пластин толщиной 0,2 - 0,3 мм и скрепляющей рамки. Рамка одновременно служит для направления сотового уплотнительного сегмента в пазу козырька.

Габариты сотовых уплотнительных сегментов и их количество определяются наружным диаметром ступени. При этом в сегменте отсутствует кривизна пластин и ребер, а отклонение от цилиндричности (стрелка между хордой и дугой) составляет примерно 0,2 мм, что значительно меньше, чем допустимое отклонение величины радиального зазора.

Готовые сотовые уплотнительные сегменты вставляются в паз уплотнительного кольца-козырька над рабочими лопатками. Кольцо-козырек изготавливается из двух или более секторов и прикрепляется к диафрагме или обойме. В районе разъема сотовые уплотнительные сегменты фиксируются с помощью стопорных пластин.

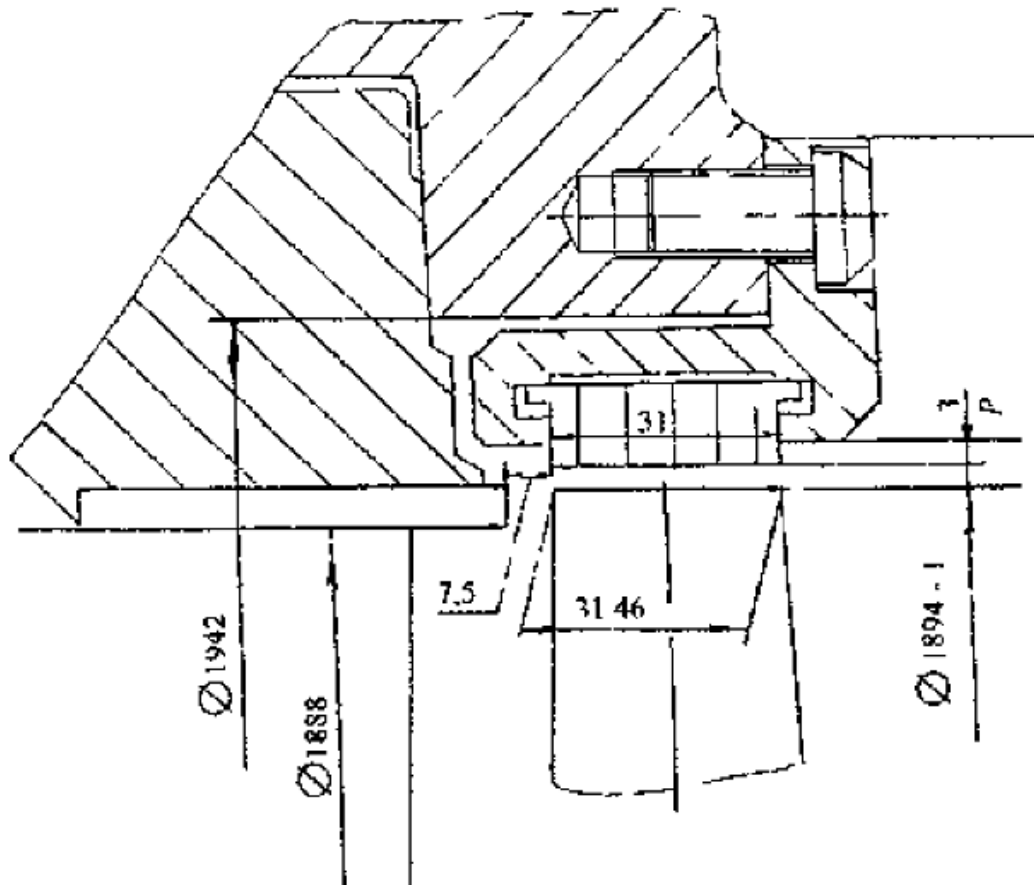


Рисунок 2 – Пример установки сотовых уплотнений над необбандаженной лопаткой

Наличие сквозных ячеек позволяет использовать сотовые уплотнительные сегменты для интенсификации влагоудаления из периферийной зоны последних ступеней. Следствием этого будет уменьшение эрозионного износа рабочих лопаток.

Жесткость предлагаемого сотового уплотнительного сегмента во много раз ниже, чем торца профильной части рабочей лопатки. По этой причине радиальный зазор над торцами рабочих лопаток может быть существенно уменьшен (например, с 3 до 2 мм) в зависимости от геометрии ступени – длины лопатки, периферийного диаметра, цилиндрического или конического обвода.

Эффективность сотовых уплотнений определялась путем сравнительных расчетов величин протечек (потери мощности) через периферийный зазор ступеней для случая исходного (заводского) радиального зазора и для случая применения сотовых уплотнений.

Расчет величины протечки через зазор определяли по формуле [3]:

$$G_z = \frac{\mu_z \cdot F_z \cdot C_{10} \cdot \sqrt{\rho_{\Pi} + \varphi_p^2 \cdot (1 - \rho_{\Pi}) \cdot \sin^2 \alpha_{lp}}}{V_{2p}}, \tag{1}$$

где G_z – расход через радиальный зазор, кг/сек;

μ_z – коэффициент расхода через зазор;

F_z – площадь радиального зазора, м²;

C_{10} – скорость, соответствующая адиабатному перепаду, срабатываемому периферийным сечением рабочей лопатки, м/сек;

ρ_{Π} – степень реактивности периферийного сечения рабочей лопатки;

φ_p – коэффициент расхода периферийного сечения направляющей лопатки;

α_{lp} – угол выхода потока из периферийного сечения направляющего аппарата, град;

V_{2p} – удельный объем пара в периферийном сечении за рабочими лопатками, м³/кг.

В таблице 1 приведены результаты расчета изменения КПД, мощности ступени из-за протечки в периферийном сечении рабочей лопатки и расхода среды через радиальный зазор.

Таблица 1 – Сводная таблица результатов расчета потерь через периферийный зазор 28-30 ступеней турбины ПТ-60-130

Параметр	Исходный расчетный зазор				Сотовое уплотнение			
	28-я ст.	29-я ст.	30-я ст.	Суммарные потери, кВт	28-я ст.	29-я ст.	30-я ст.	Суммарные потери, кВт
Расход среды через радиальный зазор необандажной ступени, G_z , кг/сек	1,99	1,13	0,857	-	0,296	0,23	0,113	-
Потери от утечки через радиальный зазор, $\eta_{и}$, %	2,92	2,57	1,7	-	0,64	0,54	0,625	-
Снижение мощности ступени из-за утечки среды через зазор, N_z	105,93	109,39	65,03	280,35	23,33	23,16	10,15	56,64

Из таблицы видно, что применение сотовых уплотнений в 28-30 ступенях турбины позволит уменьшить потери мощности примерно на 224 кВт, что составит около 0,35-0,37% от мощности турбоагрегата.

Экономический эффект от применения сотовых уплотнений образуется из двух составляющих:

- повышение эффективности работы ступеней за счет уменьшения протечек рабочего тела;
- организации оптимальной системы влагоудаления.

Рабочие лопатки последних ступеней турбины работают в зоне влажного пара и для них чрезвычайно актуальным является организация оптимальной схемы влагоудаления из периферийной зоны последних ступеней. Наряду с другими техническими решениями – создание сборных камер отсоса влаги надо сотами, организация влагоудаляющих камер в козырьках приведет к уменьшению эрозионного износа рабочих лопаток. Опыт эксплуатации турбины ПТ-60-130, последние ступени которых оснащены сотовыми уплотнениями подтверждают это. Срок службы последних ступеней может быть увеличен, в среднем, в 1,5 раза, то есть с 8 до 12 лет.

Литература

1. Трухний А.Д., Костюк А.Г., Трояновский Б.М. Совершенствование основных и эксплуатационных и технико-экономических показателей паровых турбин. Теплоэнергетика, 1994. – № 1.
2. Орлик В.Г., Перминов И.А., Розенберг С.Ш. Экспериментальное определение эффективности модернизации надбандажных уплотнений на действующих турбинах. Электрические станции, 1982. – № 1.
3. Гудков Н.Н. Проектирование, модернизация и унификация мощностных рядов паровых турбин ЛМЗ, отвечающих требованиям современной теплоэнергетики. С-Петербург, 1997.