

УДК 621.165

**БЕСКОНТАКТНЫЕ ЛАБИРИНТОВЫЕ УПЛОТНЕНИЯ  
ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ТУРБИН  
NON-CONTACT LABYRINTH SEALS  
OF THE FLOW PART OF TURBINES**

А.И. Снапкова

Научный руководитель – Н.В. Пантелей, старший преподаватель  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

A. Snapkova

Supervisor – N. Panteley, Senior Lecturer  
Belarusian national technical university, Minsk

**Аннотация:** В данной статье рассматривается один из видов концевых уплотнений, используемый в проточной части многоступенчатых турбин. Этот тип уплотнений, как и все концевые уплотнения, помогает в уменьшении проблемы, связанной с потерями от утечек рабочего тела.

**Abstract:** This article discusses one type of end seal, used in the flow part of multi-stage turbines and helping to reduce the problem associated with losses from leakage of the working fluid.

**Ключевые слова:** надежность, уплотнения, протечки пара, расход пара, всасывание воздуха, ступенчатые, прямоточные.

**Key words:** reliability, seals, fluid leaks, steam consumption, air suction, stepped, straight-through.

### Введение

Надежность функционирования турбин на теплоэлектростанциях зависит от множества различных факторов, которые могут оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на их работу. Одним из немаловажных аспектов, оказывающих непосредственное воздействие на общую надежность действия турбины, можно выделить конструктивное выполнение концевых уплотнений. Для минимизации концевых потерь широкое применение в энергетическом производстве получил такой вид уплотнений, как лабиринтовые уплотнения.

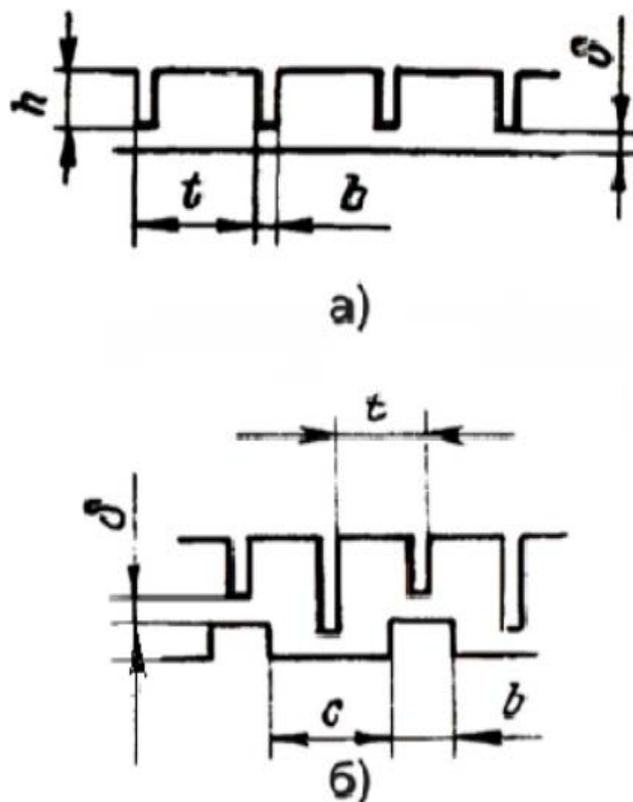
### Основная часть

Уплотнения цилиндров паровых или газовых турбин играют ключевую роль в снижении протечек пара наружу из областей с высоким давлением и для недопущения всасывания воздуха в тех частях, где давление ниже атмосферного. Лабиринтовые уплотнения, также известные как бесконтактные, специально разработаны с целью сокращения утечек, возникающих в промежутках между ротором и статором турбины. Данные уплотнения представляют собой цепочку последовательных сужений, которые значительно затрудняют прохождение потока рабочего тела [1].

При изготовлении энергетического оборудования выполняют два основных типа лабиринтовых уплотнений: прямоточные и ступенчатые. Что касается конструкции ступенчатых уплотнений, то там используются гребни (они располагаются на корпусе) с острыми кромками, которые формируют щели. На

роторе в этом случае предусмотрены сообразные выступы и углубления, которые в объединении с гребнями создают дополнительные сужения. В отличие от ступенчатых, прямоточные уплотнения не имеют углублений и выступов на роторе.

Для избежания локального перегрева ротора и его различного рода деформаций при взаимодействии с лабиринтовым уплотнением, гребни наиболее часто размещаются на роторе, а выступы и впадины – на деталях статора. Такое конструктивное решение позволяет в лучшей степени управлять тепловыми нагрузками и, тем самым, обеспечивает наиболее устойчивую организацию работы любой турбоустановки.



$h$  – высота гребня,  $t$  – шаг гребня,  $b$  – ширина выступа,  
 $\delta$  – радиальный зазор,  $c$  – осевой разбег

Рисунок 1 – Схемы лабиринтовых уплотнений: а) прямоточного типа,  
 б) ступенчатого типа [2]

Среди основных преимуществ лабиринтовых уплотнений можно выделить несколько важных пунктов:

- надежность, компактность, а также простота в изготовлении и эксплуатации, так как уплотнения легко интегрируются в систему и их установка требует минимальных затрат времени и ресурсов;
- детали уплотнений имеют высокий уровень износостойкости. Это происходит благодаря тому, что между вращающимися элементами отсутствует механический контакт, тем самым детали демонстрируют высокий уровень устойчивости. Это позволяет значительно сократить частоту технического обслуживания и продлить срок службы оборудования:

- улучшение плавности работы турбины, что приводит к снижению вибрационных нагрузок и увеличению общей работоспособности системы;
- обеспечение стабильной работы турбины в различных режимах (при изменении давления и температуры);
- адаптивность лабиринтовых уплотнений, так как они могут быть настроены под специфические условия работы, что делает их универсальным решением для широкого спектра промышленных приложений, включая не только энергетическую, но и нефтегазовую и химическую отрасли.

Принцип функционирования уплотнений в паровых и газовых турбоагрегатах заключается в многократном дросселировании, выполняющемся через ряд элементов, расположенных поочередно друг за другом и образующих зазоры. Эти элементы и представляют собой каналы (щели, для прохождения пара), которые формируются за счет наличия гребней в поверхности ротора. В промежутках между гребнями возникают вихревые камеры. В то время, когда пар проходит под гребнем в образованной щели, его потенциальная энергия переходит в кинетическую. Затем вихревые камеры, которые возникают непосредственно между гребнями, служат местом, где кинетическая энергия потока замедляется и преобразуется в тепловую энергию. В результате всего этого, по мере продвижения пара от камеры к другой камере, наблюдается снижение давления, однако важно отметить, что энтальпия пара постоянна на протяжении всех камер уплотнения, поскольку тепло от пара не выводится наружу через уплотнение [3].

Весь упомянутый процесс течения пара в ступенчатом уплотнении более наглядно можно проиллюстрировать с помощью  $h, s$ -диаграммы (рис. 2).

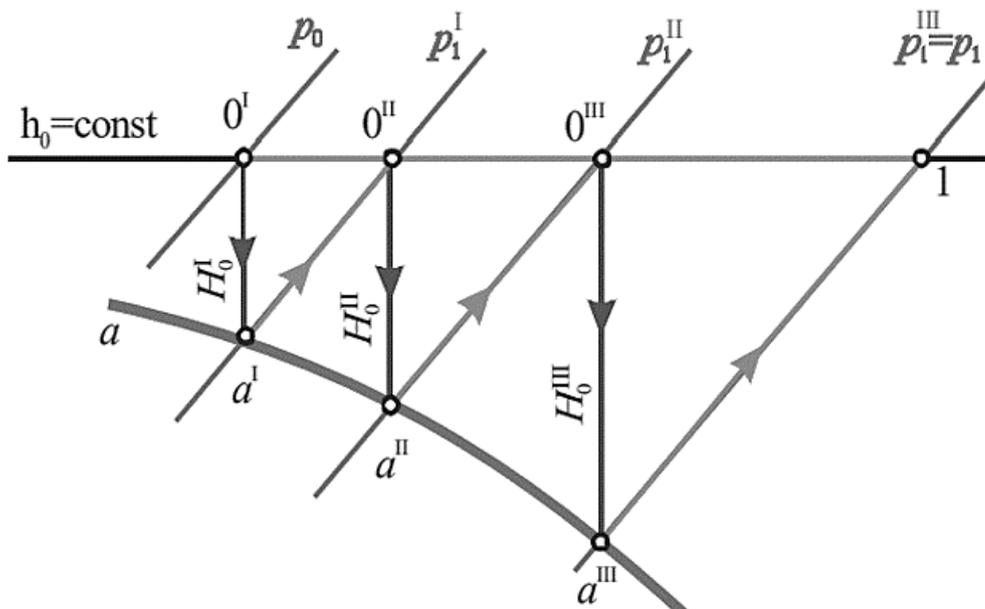
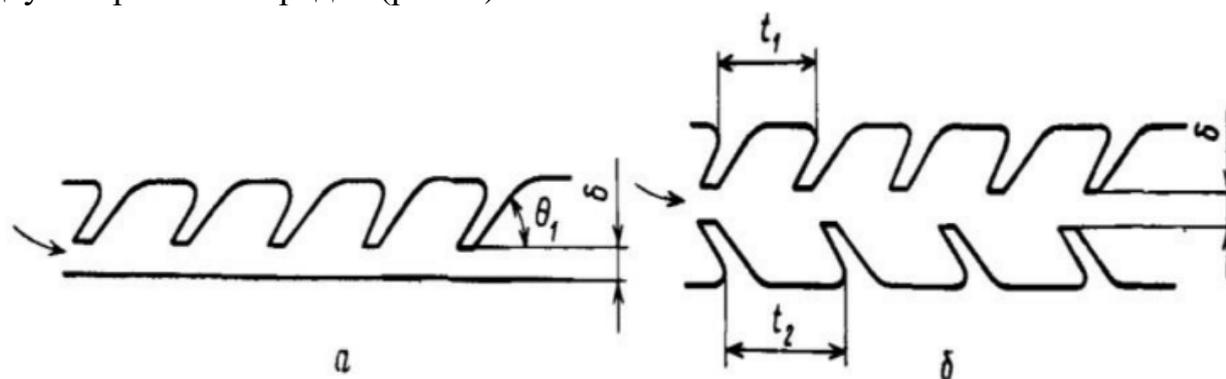


Рисунок 2 – Процесс изменения состояния пара в уплотнении ступенчатого типа в  $h, s$ -диаграмме [1]

При рассмотрении изображения процесса нужно заметить, что состояние пара перед щелью отнесаются точками  $o^I, o^{II}, o^{III}$ , а точки, где отображается состояние пара в щелях обозначены соответственно как  $a^I, a^{II}, a^{III}$ . Эта линия состояния пара, образованная последними точками, носит название – линия Фанно. Изобарное торможение потока, где происходит процесс преобразования из одного вида энергии в другой (переход кинетической энергии в тепловую) отображается на отрезках  $a^I o^{II}, a^{II} o^{III}, a^{III} 1$ . Давления в процессе расширения обозначаются как  $p_0, p_1^I, p_1^{II}, p_1^{III} = p_1$ , а теплоперепады соответственно  $H_0^I, H_0^{II}, H_0^{III}$ .

В случае применения в конструкции турбин прямооточных уплотнений стоит отметить, что поток пара не останавливается полностью между гребнями. Это обстоятельство приводит к тому, что кинетическая энергия струи из предыдущей щели лишь частично преобразуется в тепловую энергию. Оставшаяся часть энергии также тратится для увеличения скорости потока в следующей щели. Из этого можно сделать вывод, что расход пара через лабиринтовые прямооточные уплотнения будет выше, чем если бы были использованы в таких же условиях ступенчатые уплотнения.

Это различие в расходе обусловлено тем, что в ступенчатых уплотнениях происходит более эффективное преобразование энергии за счет полной остановки потока между гребнями, что способствует требуемому уменьшению утечек. В свою очередь, прямооточные уплотнения могут быть менее эффективными с точки зрения управления утечками, но этот тип уплотнений может быть полезен в определенных условиях эксплуатации. Для того, чтобы протечки в уплотнениях прямооточного типа стали значительно меньше, на практике применяется наклон гребней навстречу потоку под углом  $\theta = 45^\circ$ . Также гребни могут располагаться не только в одну сторону, но также и в двухстороннем порядке (рис. 3).



а – одностороннее расположение гребней; б – двустороннее расположение гребней с различными шагами  $t$  (нониусное)

Рисунок 3 – Прямоточные уплотнения с наклонными гребнями [2]

На утечку рабочего тела в уплотнениях с наклонными гребнями не влияет кольцевое или винтовое исполнение гребней, но стоит отметить, что отклонение от обычной прямой формы гребней не помогает поддержанию в использовании

исходной величины зазора и исходной конфигурации гребней из-за возможных задеваний.

Учитывая все эти факты, при весьма значительных температурных удлинениях ротора относительно статора в области уплотнения необходимо отказаться от использования ступенчатых уплотнений. Это связано с тем, что при таких удлинениях расстояние между гребнями уплотнений становится слишком большим. Поэтому вместо этого рекомендуется использовать более компактные упрощенные в конструкции уплотнения прямого исполнения [3].

### **Заключение**

Таким образом, лабиринтовые уплотнения являются важным компонентом паротурбинных установок, обеспечивая их стабильную и эффективную работу. Данные уплотнения – это действенное решение, чтобы снизить потери и повысить производительность вращающихся механизмов. Благодаря своей уникальной конструкции и способности функционировать в различных условиях, они способствуют продлению срока службы турбин и снижению эксплуатационных затрат. Также ведутся новые разработки новых материалов и технологий для создания более эффективных лабиринтовых уплотнений, способных работать в более экстремальных условиях сверхвысоких температур и давлений, характерных для современных энергоблоков.

### **Литература**

1. Турбины тепловых и атомных электрических станций: учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / А.Г. Костюк [и др.]; под ред. А.Г. Костюка, В.В. Фролова. – М: Издательство МЭИ, 2001. – 488 с.
2. Уплотнения и уплотнительная техника: справочник / А.А. Кондаков [и др.]; под ред. А.А. Кондакова, А.И. Голубева. – М: Машиностроение, 1986. – 464 с.
3. Турбины тепловых и атомных электрических станций: учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / А.Г. Костюк [и др.]; под ред. А.Г. Костюка, В.В. Фролова, А.Е. Булкина. – М: Издательство МЭИ, 2016. – 557 с.