

УДК 621.165

**МОДЕРНИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ СТУПЕНЕЙ ЧНД ТУРБИНЫ
В МЕСТАХ ОТБОРА ПАРА
STEAM TURBINE STAGE MODERNISATION IN FRONT
OF THE EXTRACTION POINT**

М.А. Ерёменко, К.С. Иванова

Научный руководитель – Н.В. Пантелей, старший преподаватель
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь
nvpanteley@tut.by

M. Yaromenka, K. Ivanova

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

***Аннотация:** в статье представлена модернизация ступени паровой турбины, расположенной перед местом отбора турбины. Модернизированная конструкция предназначена для лучшего управления потоком пара в этой области. В представленной конструкции используется специальное кольцо для отбора потока пара непосредственно в теплообменник. Проведенные эксперименты и численный анализ подтвердили измеримые эксплуатационные и экономические преимущества внедренной модернизации. До сих пор он успешно применялся в ряде турбин, работающих на западных электростанциях, но его использование может быть легко распространено, без необходимости дальнейшей модификации и без потери преимуществ.*

***Abstract:** the paper presents modernization of the steam turbine stage situated in front of the turbine extraction point. The modernized design is intended to better control the steam flow in this area. In the presented design a special ring is used to drive the steam leakage flow directly to the heat exchanger. The performed experiments and numerical analyses confirmed measurable exploitation and efficiency advantages of the introduced modernization. So far, it has been successfully applied in a number of turbines working in inland power plants, but its use can be easily extended, without need for further modification and without advantage loss.*

***Ключевые слова:** ступени турбины, утечки, место отбора, проточная часть турбины*

***Keywords:** turbine stages, leakages, extraction point, axial flow turbine.*

Введение

За многие годы эксплуатации паровых турбин, часть низкого давления подвержена множеству повреждений, а также большому количеству потерь на всем пути прохода пара через ЧНД. В данной работе приведен метод борьбы с этим процессом разработанный нашим западными коллегами.

Основная часть

По эксплуатационным соображениям в конструкции паровой турбины необходимо сохранить некоторые зазоры над лопатками ротора. Верхушка

потока утечки пара через зазоры имеет более высокую энергию и различное направление, по сравнению с основным потоком, являющимся источником потерь в этой части турбинного канала, вследствие образования вихревых зон, интенсивных процессов перемешивания и блокировка потока к регенеративным теплообменникам. Эти диссипативные процессы особенно интенсивны в последних ступенях ЧНД турбин, где скорость потока пара, выходящего из зазоров над незащищенными лопатками ротора, является околосвуковой. Этот эффект впервые наблюдался в экспериментальных исследованиях, проведенных на турбинах мощностью 200 МВт со ступенью Баумана

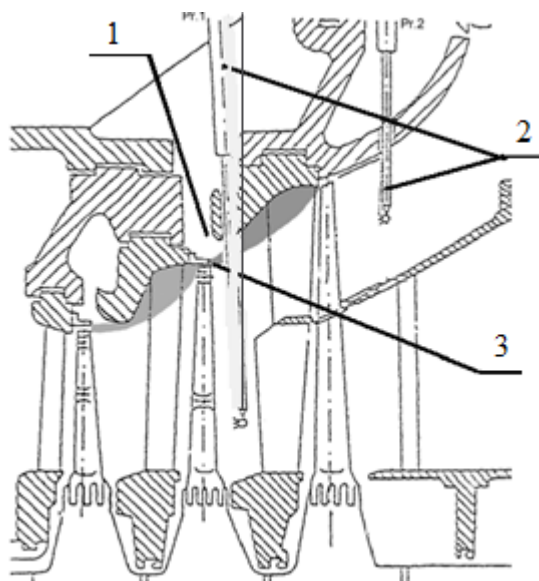


Рисунок 1 – Теплоизмерительное оборудование в ЧНД турбины мощностью 200 МВт со ступенью Баумана, 1-место отбора;2-пробоотборник;3-утечки

Запись температуры, давления, скорости стало возможным благодаря пластинчатым зондам, вставленным в проточную часть. По результатам, записанным на ступенях турбины до модернизации, была предложена, запатентована и практически применена новая, более эффективная конструкция ступени паровой турбины перед точкой регенеративного отбора [4, 5]. Авторы данной конструкции являются Андрей Гардзилевич и Станислав Марцинковский.

Идея новой конструкции показана на рисунке 2. Она заключается в установке кольца правильной формы в зоне зазора между вершинами лопастей ротора, без кожуха для направления потока утечки в камеру отбора. Как правило, преимущество наличия кольца заключается в устранении зоны завихрения в потоке, поскольку кольцо удаляет так называемую аэродинамическую завесу, создаваемую околосвуковым потоком пара в области зазора, см. рисунок 2.

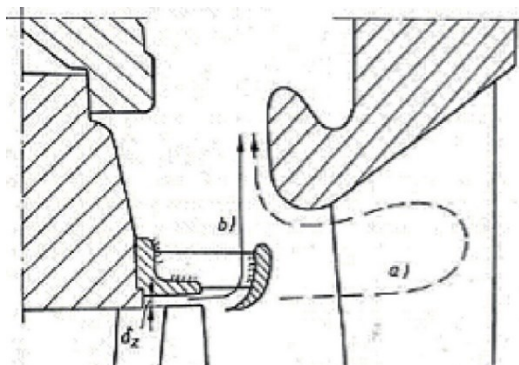


Рисунок 2 – Новая конструкция перед точкой извлечения

При установке кольца пропускная способность паровой ступени, расположенной за точкой отбора, значительно увеличивается за счет:

1. устранение смешивания пара утечки с основным потоком и направление пара утечки непосредственно в камеру отбора;
2. в результате использования высокоэнергетического потока утечки в экстракционной камере, возникает более высокая тепловая нагрузка первого (обычно недогретого) теплообменника для регенерации. Важно отметить, что массовый расход потока утечки эквивалентен расходу пара отбора.

Поскольку кольцо работает как сепаратор вторичных капель влаги, находящихся в потоке пара через эту часть турбины, из потока удаляется жидкая фаза.

В турбинах, где применялось это решение, результирующие выгоды оценивались как равные 400-800 кВт в зависимости от условий эксплуатации. За 2008-2015 годы новое решение было применено в семнадцати турбинах мощностью 200 МВт на следующих станциях Elcho power plant 220.00 МВт, Poznan Karolin power plant 275.00 МВт, Siekierki power plant 538.00 МВт, Bydgoszcz II power plant 227.00 МВт (Польша). Никаких эксплуатационных проблем не наблюдалось, см. рисунок 3.



Рисунок 3 – Вид кольца внутри проточной части турбины

Этап модернизации ЧНД турбины 225 МВт

По результатам изучения работы колец в ряде старых турбин мощностью 200 МВт было принято решение установить эти кольца также в ЧНД новых

турбин мощностью 225 МВт, модернизированных в Польше в 2008 году, в зоне диффузора между двумя последними ступенями. Одним из основных мотивов такого решения явились интенсивные повреждения концевых участков передней кромки лопатки ротора в ступенях, расположенных непосредственно за диффузором, которые наблюдались при осмотре этой части турбины, см. рисунок 4. Предполагалось, что эти повреждения в основном вызваны достаточно большими каплями влаги, переносимыми потоком пара, которые не распадались в зоне скопления. Дополнительные несерьезные повреждения, замеченные в оставшейся части передних кромок. Судя по всему, были вызваны более мелкими каплями, разбрызгиваемыми потоком утечки. Наибольшую угрозу для работы турбины представляли эрозионные дефекты, расположенные в зоне лопатки за пределами зоны упрочнения. Капли воды, которые достигали этой области, были очень кислыми ($pH < 5$) и являлись возможным источником опасных трещин в зоне эрозии.

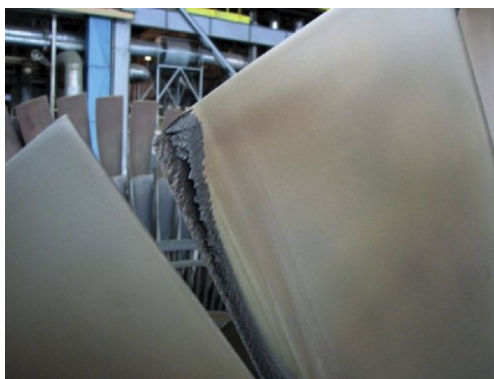


Рисунок 4 – Характер повреждений передней кромки, наблюдаемых в системе лопаток ротора последней ступени турбины мощностью 225 МВт

Чтобы устранить эти неблагоприятные явления, было принято решение модернизировать турбину мощностью 225 МВт, а именно, установить кольцо в проточную часть ЧНД. Конструкция кольца была разработана в результате анализа экспериментальных данных, записанных в реальной паровой турбине компании Alstom. Принципиальная схема размещения измерительных щупов, установленных в этой турбине, приведена на рисунке 5. Как и в более старых конструкциях, проведенные измерения выявили наличие струйного потока, выходящего из концов незащищенных лопаток ротора в предпоследней ступени. Эта струя затем вмешивалась в структуру потока, блокируя поступление пара в регенеративную систему. Наличие и действие этого струйного потока и засорения перед кольцевой установкой подтверждались также отложениями солей, наблюдавшимися на поверхностях лопаток статора последней ступени в проверенных реальных турбинах.

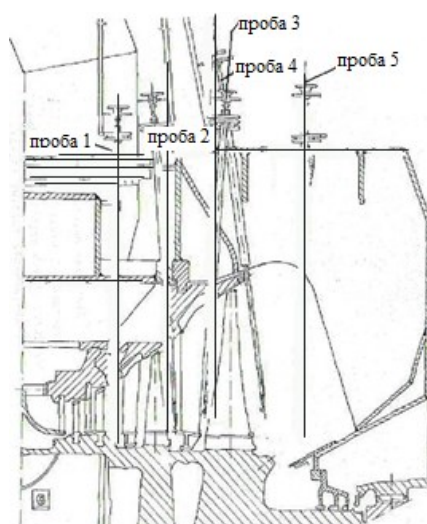


Рисунок 5 – Размещение измерительных зондов в нижней части турбины мощностью 225 МВт

Результаты экспериментальных измерений потока через эту часть турбины были сопоставлены с результатами, полученными при численных расчетах методами-CFD (Вычислительная гидродинамика). Область расчета включала две последние ступени ЧНД турбины и межступенчатый диффузор с расположенной между ними точкой отбора. Были подготовлены два варианта геометрии турбины, которые отличались наличием или отсутствием кольца. Расчеты проводились с использованием модели течения сжимаемой и вязкой жидкости, дополненной двумерной моделью турбулентности $k-\omega$.

Термодинамическое состояние пара моделировалось уравнениями, справедливыми для идеального газа. Термодинамические константы, определенные для условий, соответствующих потоку влажного пара, были равны: $R = 437,5$ Дж/кг и $k = 1,13$.

Расчеты расхода через межступенчатый диффузор позволили определить изменение давления в камере отбора, которое было вызвано направлением в нее высокоэнергетического потока утечки из точки отбора. Эта энергия потока утечки может быть использована в регенеративном теплообменнике.

Полученные результаты исследований показали, что применение кольца способствует устранению эффектов завихрения, смешивания и течения. Также по полученным данным было уточнено место расположения кольца для получения наиболее оптимальной картины течения потока, например, когда кольцо располагалось слишком высоко, оно не устраняло закупорку, а делило поток на две части. Оно также не отделяло капли воды, собирающиеся за предпоследней ступенью. С другой стороны, когда кольцо было слишком низко, оно увеличивало зону завихрения в аэродинамическом следе в потоке и неблагоприятно снижало давление в камере отбора. Когда кольцо было слишком коротким, оно быстро останавливало поток утечки на ограничительной стенке, что было источником потерь энергии и возможной эрозии захвата статора. А когда оно было слишком длинным, то нежелательно усиливало завихрения в камере отбора.

Численный анализ подтвердил повышение эффективности после модернизации. В этом случае эффективность последней ступени увеличилась примерно на 1%, при условии, что КПД на остальных ступенях не изменились. Такое повышение КПД произошло в основном за счет более равномерного распределения скоростей на входе в лопаточную систему статора последней ступени после модернизации. Эти выигрыши могут показаться незначительными, но, если учесть, что номинальная мощность последних ступеней в двух частях низкого давления турбины превышает 20 МВт, то это является достаточно существенным повышением эффективности.

Полученные результаты, относящиеся как к изменению КПД, так и к изменению давления в камере отбора, были использованы для расчета выигрыша от применяемой модернизации, исходя из баланса теплового цикла всей турбины. Принятая модернизация была тщательно проанализирована в силовом и динамическом аспектах. Конструкция кольца получилась безопасной и надежной. Выполненные расчеты учитывали различные условия эксплуатации, в том числе пуски и остановки.

Технология изготовления и сборки была тщательно разработана с учетом специфических условий эксплуатации паровой турбины. Кольцо, установленное в турбине, показано на рисунке 6. Визуальные осмотры, проведенные после двух лет эксплуатации турбины с установленными кольцами, не выявили увеличения величины эрозионного износа рабочих лопаток последней ступени.

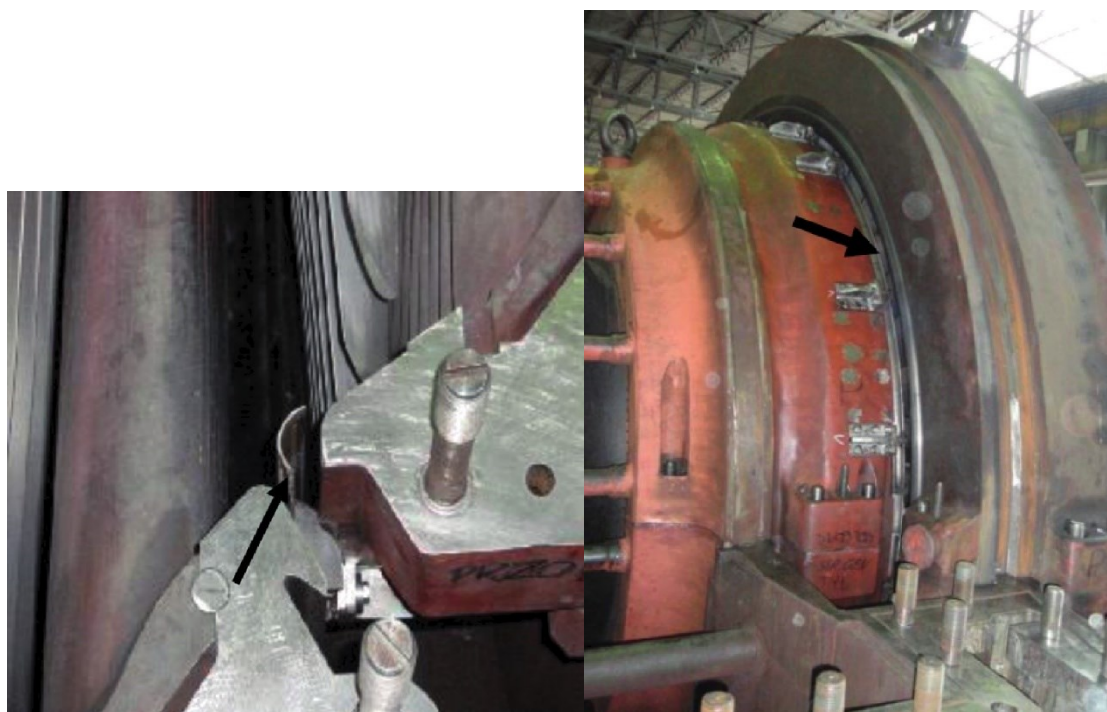


Рисунок 6 – Фотографии кольца, установленного на захватах статора в турбине мощностью 225 МВт

Заключение

1. Модернизация ступени перед точкой отбора в ЧНД, позволит получить прирост мощности, который будет превышать 400 кВт, что позволит снизить

удельную теплоемкость на 10-15 кДж/кВт·ч. Данный результат может быть получен при более высокой нагрузке на теплообменник и повышении эффективности потока на последней ступени.

2. Кольцо в диффузоре между двумя последними ступенями исключает выделение капель воды в этой части, так как кольцо работает как эжектор, и устраняет утечку пара. Это уменьшает повреждения последних кромок лопаток статора последней ступени.

3. Новая конструкция по результатам оценки более безопасна в эксплуатации и легка в сборке. Кольца должны быть точно закреплены в турбине относительно статора, учитывая не только допуски на обработку, но также относительные перемещения подвижных и неподвижных частей турбины во время пусков и остановов турбины.

4. Окончательное подтверждение полученного эффекта основывается на более точных термодинамических измерениях и более предметном исследовании поверхностей лопаток ротора ЧНД для оценки степени снижения воздействия эрозийных процессов.

Литература

1. Gardzilewicz A, Marcinkowski S, 1995 Diagnosis of LP Steam Turbine prospects of Measuring Technique, PWR Vol. 28 1995, Joint Power Generation Vol. 3 ASME 1995, pp. 349-358.

2. Gardzilewicz A, 1995 Analysis of Regenerative Extractions of Turbine Based on Thermal Measurements in Power Plants, VDI Berichte 1186, 1995 Erlangen, pp. 427-443, 8.

3. Шиманяк М. Гардзилечик А. Пащенко Н.В. Нагорный И.Ю. Анализ структуры парового потока в области отбора цилиндра низкого давления паровой турбины мощностью 225 МВт с модернизированной проточной частью, 2016.

4. Gardzilewicz A and Marcinkowski S, 1997 Stage of steam Turbine, Patent No 160-805, Warsaw, Poland (in Polish).

5. Gardzilewicz A, Marcinkowski S, Sobera H. and Józefowicz Z 1994 Experimental Experience of Patent No. 160-805 Application in 200 MW Turbines, Energetyka (No. 3), pp. 73-78, (in Polish).