

¹ М. Шиманяк, канд. техн. наук
¹ А. Гардзилевич, д-р техн. наук
² Н. В. Пащенко, канд. техн. наук
² И. Ю. Нагорный

¹ Институт проточных машин
 им. Р. Шевальского ПАН
 Польша, г. Гданьск, e-mail:
 masz@imp.gda.pl, gar@imp.gda.pl

² Институт проблем машиностроения
 им. А. Н. Подгорного НАН Украины,
 г. Харьков, e-mail:
 rashchenko@ipmach.kharkov.ua,
 nagorniy@itek.com

Ключові слова: парова турбіна, циліндр низького тиску, робоче колесо, камера відбору.

УДК 621.165:532.6

АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ПАРОВОГО ПОТОКА В ОБЛАСТИ ОТБОРА ЦИЛИНДРА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ МОЩНОСТЬЮ 225 МВт С МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТЬЮ

Подано нову конструкцію циліндра низького тиску, що дозволяє підвищити ефективність проточної частини парової турбіни в районі нерегульованого відбору пари. Модернізація циліндра базується на застосуванні спеціального кільця, яке спрямовує струмінь потоку пари, утворену перерізом в радіальному зазорі робочого колеса, безпосередньо в теплообмінник через нерегульований відбір. Експериментальні та розрахункові дослідження підтвердили переваги і ефективність нової конструкції в порівнянні з вихідною, в якій протікання пари з радіального зазору потрапляла у вихідний ступінь.

Введение

Существенное влияние на характеристики проточных частей турбин оказывают перетечки пара над рабочими лопатками, особенно в случае отсутствия радиальных уплотнений. Поток пара, проходящий через радиальные зазоры, имеет более высокую энергию по сравнению с основным паром в ступени. Направление потока пара в протечке не совпадает с направлением основного потока, что приводит к генерации зон с существенной завихренностью и диссипацией энергии потока, и к уменьшению газодинамической эффективности проточной части. Кроме того, в случае расположения ступени перед областью регенеративного отбора струя, образованная в радиальном зазоре, препятствует поступлению пара в регенеративный отбор. Эти явления были подтверждены экспериментальными исследованиями, выполненными на турбине мощностью 200 МВт [1, 2]. Схема измерений и используемые в эксперименте измерительные приборы представлены на рис. 1. Благодаря пластинчатым зондам, вводимым в канал потока, давление, температура и распределение скоростей были оценены с высокой точностью. На основе анализа полученных результатов было предложено и запатентовано новое и очень эффективное решение, которое нашло широкое практическое применение [3]. Идея этого решения для ступени паровой турбины перед регенеративным отбором показана на рис. 2. В зоне радиального зазора за лопатками рабочих колес устанавливается новый конструктивный элемент – кольцо (рис. 2, б), которое направляет поток протечки пара в камеру отбора.

За счет применения новой конструкции достигаются следующие эффекты:

- устраняется смешивание пара периферийной протечки и основного потока пара, т. к. протечка пара направлена непосредственно в камеру отбора (увеличивается последней ступенью);
- повышается тепловая нагрузка первого (обычно

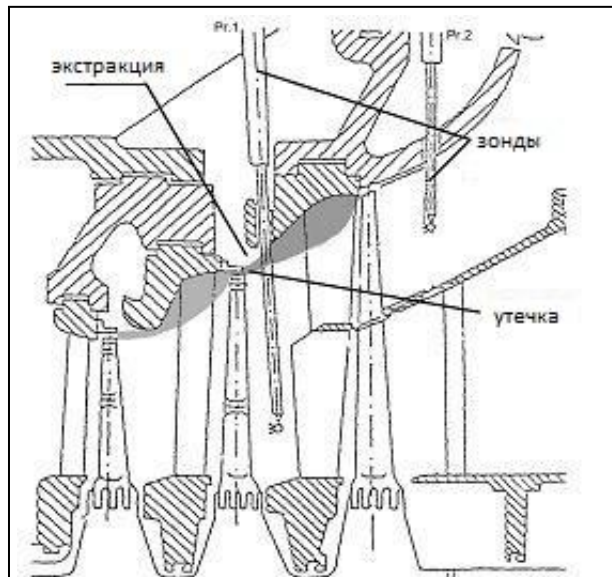
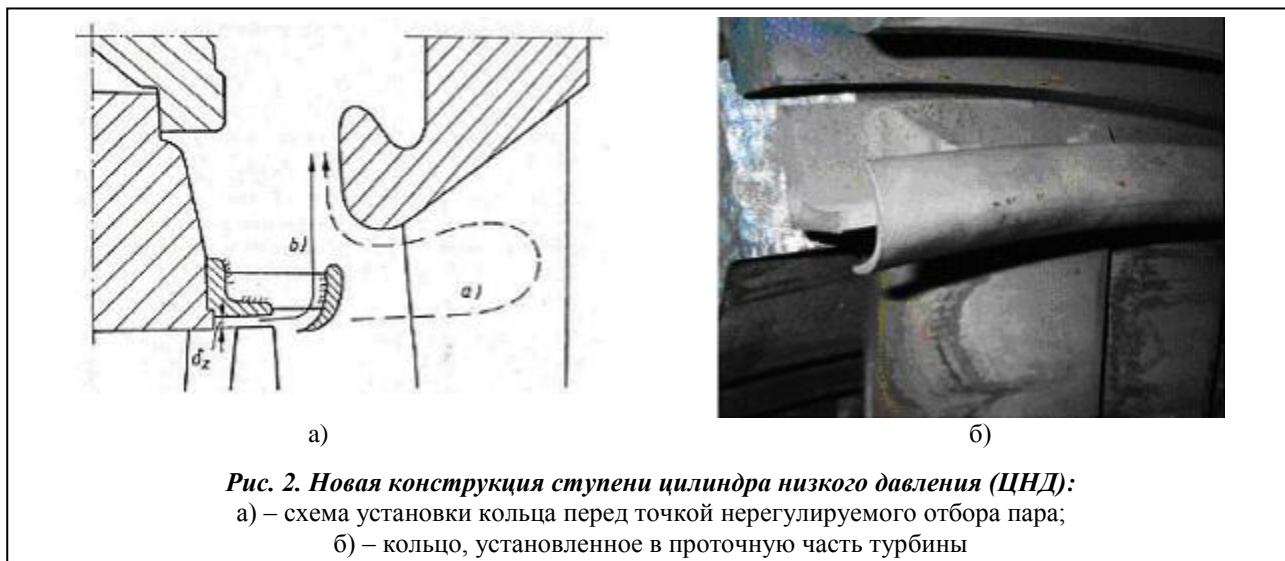


Рис. 1. Схема расположения измерительного оборудования в части низкого давления турбины мощностью 200 МВт со ступенью Баумана

© М. Шиманяк, А. Гардзилевич, Н. В. Пащенко, И. Ю. Нагорный, 2016



недогретого) регенеративного теплообменника (подогревателя) в результате утилизации высокоэнергетического потока протечки пара в камере отбора. Замечено, что массовый расход протечки эквивалентен расходу отобранного пара;

- удаляется жидкая фаза из потока, так как кольцо работает как разделитель вторичных капель воды, существующих в этой части паровой турбины.

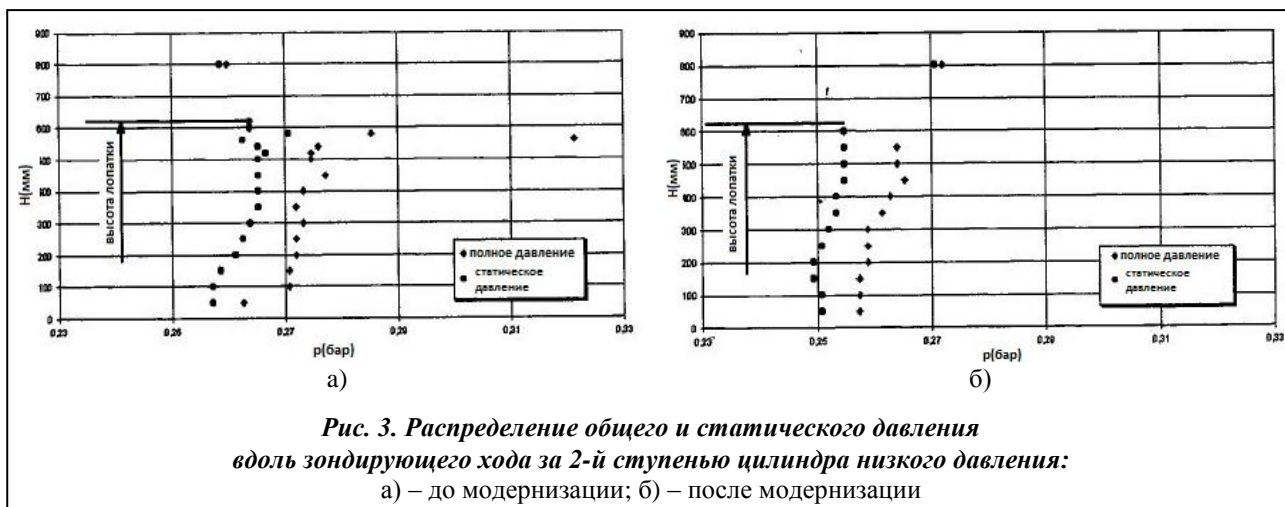
Из представленных результатов измерений давлений (рис. 3 [2]) в исходной и модернизированной конструкциях ЦНД турбин мощностью 200 МВт видно, что в модернизированной проточной части распределение давлений наиболее благоприятное. Анализ полученных результатов измерения подтверждает преимущества новой конструкции ступени.

Повышение эффективности работы турбины с модернизированной ступенью ЦНД составляет 400–800 кВт (в зависимости от условий эксплуатации турбины).

В период 1991–2002 гг. предложенный вариант модернизации ступени реализован в тридцати турбинах мощностью 200 МВт. За это время проблем (с технической стороны) в эксплуатации новых ступеней обнаружено не было [4].

Предложение по модернизации ступеней проточной части цилиндра низкого давления турбины мощностью 225 МВт

В статье [5] представлены предложения по модернизации ЦНД турбин мощностью 225 МВт с применением нового технического решения. На рис. 4 приведены конструкция ЦНД и схема системы измерений, полученные на основе экспериментальных исследований, выполненных компанией Alstom в реальной паровой турбине. По результатам проведенных измерений выявлено наличие



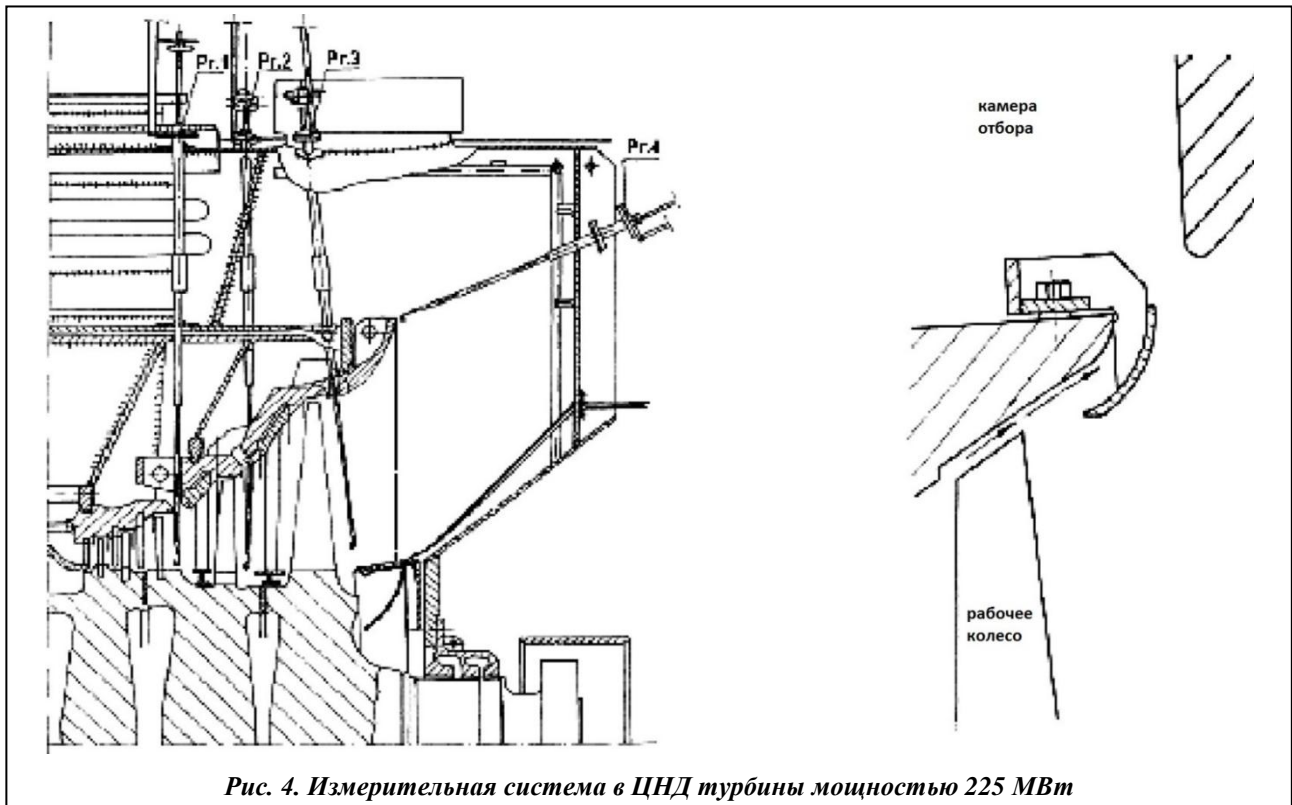


Рис. 4. Измерительная система в ЦНД турбины мощностью 225 МВт

струи утечки у периферии открытых лопаток ротора в предпоследней ступени. Как и в предыдущих конструкциях, этой струей нарушается структура потока, блокируется отбор пара в систему регенеративного теплообменника.

Результаты измерений были подтверждены с помощью компьютерного моделирования течения в проточной части исследуемого ЦНД [5]. На рис. 5 показано распределение полного давления в ступени до и после установки кольца.

Наличие струи и затекание потока пара также были подтверждены солевыми отложениями [6], наблюдаемыми на поверхности лопаток последней ступени направляющего аппарата. При такой картине течения рабочего тела существенно увеличиваются потери кинетической энергии, а также наличие струи провоцирует нетипичные эрозийные повреждения системы лопаточных аппаратов последней ступени (рис. 6). Интенсивные повреждения входных кромок в периферийных зонах главным образом вызваны крупными каплями воды в потоке пара, которые не были разрушены в зоне затенения потока пара. Незначительные повреждения наблюдаются и в оставшейся части входной кромки, которые возникли из-за мелких капель из потока пара. Также высокую угрозу для работы турбины представляют эрозийные дефекты, расположенные в лопатке за закаленной зоной,

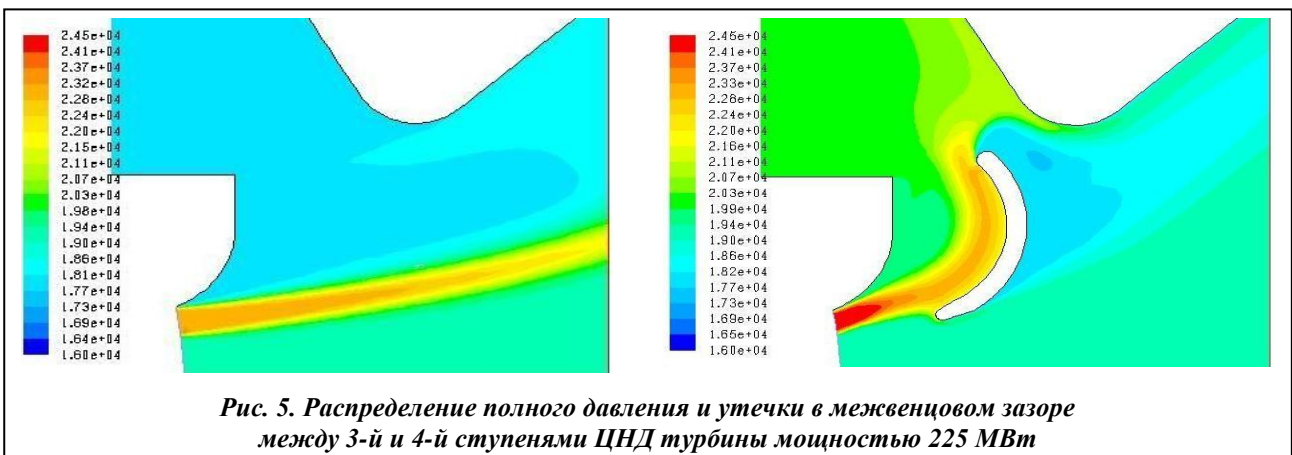


Рис. 5. Распределение полного давления и утечки в межвенцовом зазоре между 3-й и 4-й ступенями ЦНД турбины мощностью 225 МВт

обозначенной на рис. 6 стрелкой. Капли воды, достигшие лопатки в этой области, имели высокую кислотность ($\text{pH} < 5$), что, в свою очередь, может быть источником опасных трещин в зоне эрозии. Чтобы устранить эти неблагоприятные явления, было принято решение модернизировать турбину мощностью 225 МВт [7], а именно, установить кольцо в проточную часть ЦНД (рис. 7).

Для оценки эффективности модернизации были проведены экспериментальные [8] и численные (CFD моделирование) исследования [9]. Полученные результаты исследований показали, что применение кольца способствует устранению эффектов завихрения, смешивания и тени. Также по полученным данным было уточнено место расположения кольца для получения наиболее оптимальной картины течения потока (рис. 8).

Когда кольцо установлено слишком высоко (рис. 8, а), поток разделяется на две части. В этом случае водяные капли, собранные за предпоследней ступенью, не отделяются, однако это не исключает эффективности данной модернизации. В том случае, когда кольцо находится слишком низко, увеличивается зона завихрения в аэродинамическом следе потока и неблагоприятно снижается давление в камере отбора. Короткое кольцо быстро останавливает поток протечки пара на обводе, что является источником потерь энергии и вызывает эрозию решетки направляющего аппарата (рис. 8, б). Длинное кольцо усиливает завихрения в камере отбора (рис. 8, в).

На рис. 9 показаны линии тока пара до и после модернизации. При таком положении кольца повышение давления в камере отбора равно 2–3 кПа, что эквивалентно 3–4 °С температуры нагрева воды, выходящей после первого подогревателя.

Математические расчеты также показали, что после модернизации эффективность последней

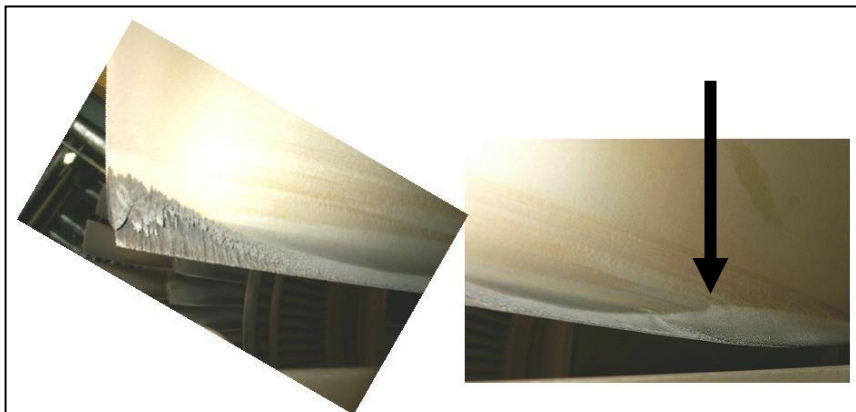


Рис. 6. Эрозионный износ входной кромки лопаток рабочего колеса последней ступени ЦНД турбины мощностью 225 МВт

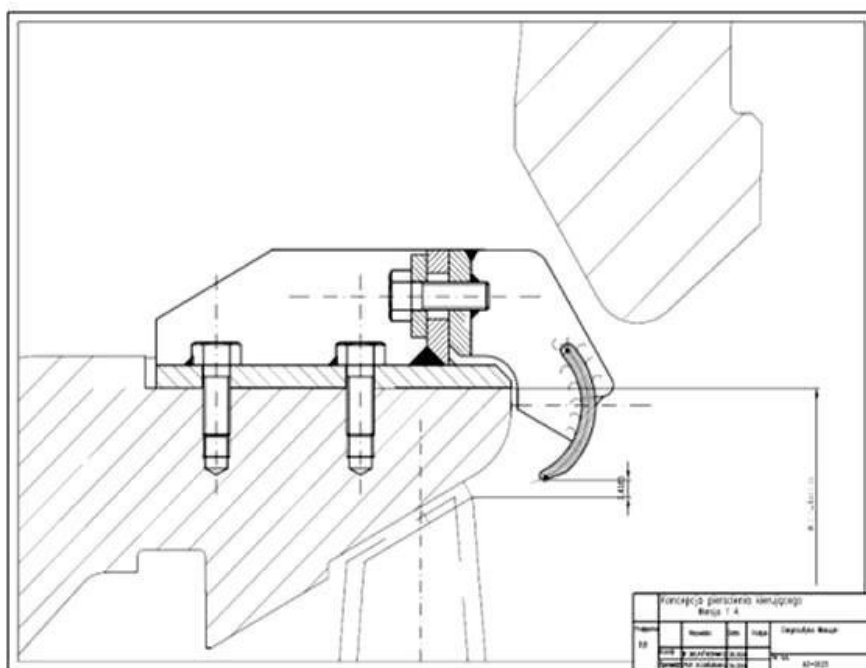
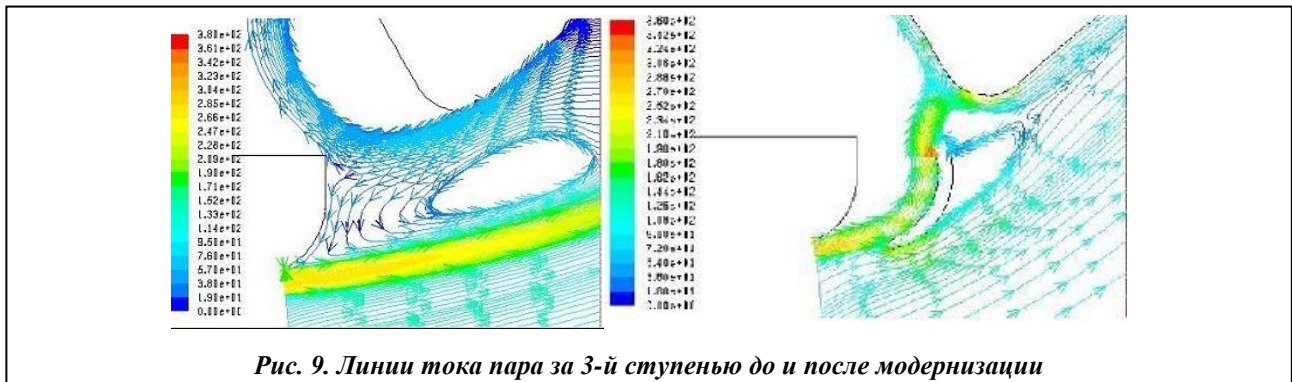
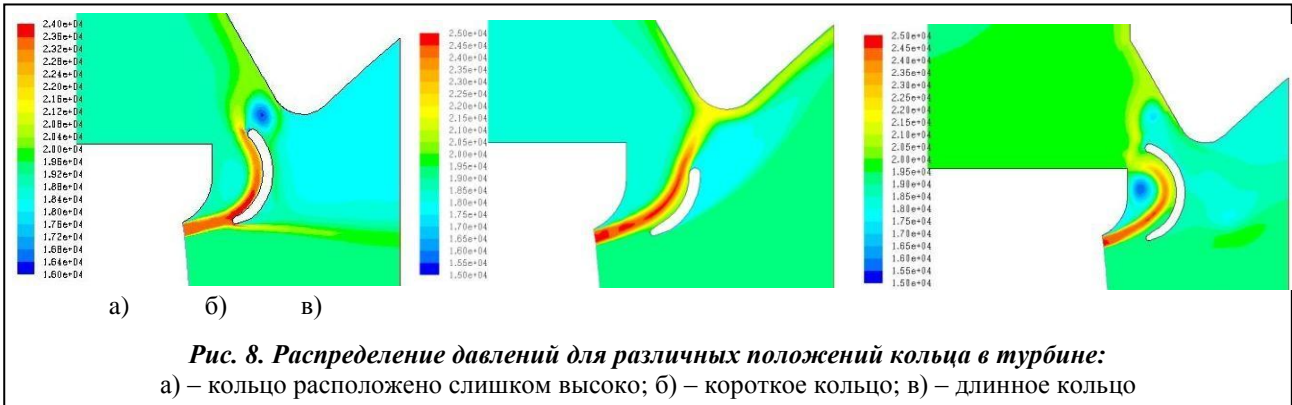


Рис. 7. Схема монтажа кольца в модернизированном ЦНД турбины мощностью 225 МВт



ступени увеличивается на 1% (номинальная мощность последних ступеней в двух потоках ЦНД порядка 20 МВт), при условии отсутствия изменений уровней эффективности в остальных ступенях. Повышение эффективности в модернизированной проточной части происходит главным образом из-за более равномерного распределения скоростей на входе в направляющий аппарат последней ступени. Расчеты проводились с использованием программного продукта DIAGAR [10] с учетом эксплуатационных параметров турбины на электростанции.

На рис. 10 видно увеличение мощности в зависимости от нагрузки и давления в конденсаторе для одних и тех же тепловых параметров на входе и выходе турбины до и после модернизации.

Для турбины с диапазоном нагрузки в пределах 120–225 МВт и давлением в конденсаторе 3–6 кПа можно ожидать увеличение мощности турбины на 150–420 кВт, что соответствует снижению удельного расхода тепла на 10–15 кДж/кВтч.

Предложенный вариант модернизации ступени был оценен в прочностных и динамических аспектах. Расчеты учитывали различные условия эксплуатации, в том числе пуски и аварийные остановки [11]. Анализ полученных результатов показал, что конструкция ступени с кольцом оказалась безопасной и надежной. Также были тщательно разработаны технологии изготовления и сборки [12], с учетом конкретных условий эксплуатации паровой турбины. Кольцо устанавливается в турбине так, как показано на рис. 11.

Визуальные осмотры, проведенные после двух лет эксплуатации турбины с установленными кольцами, не выявили увеличения величины эрозийного износа рабочих лопаток последней ступени.

Выводы

Применение паротбойного кольца пе-

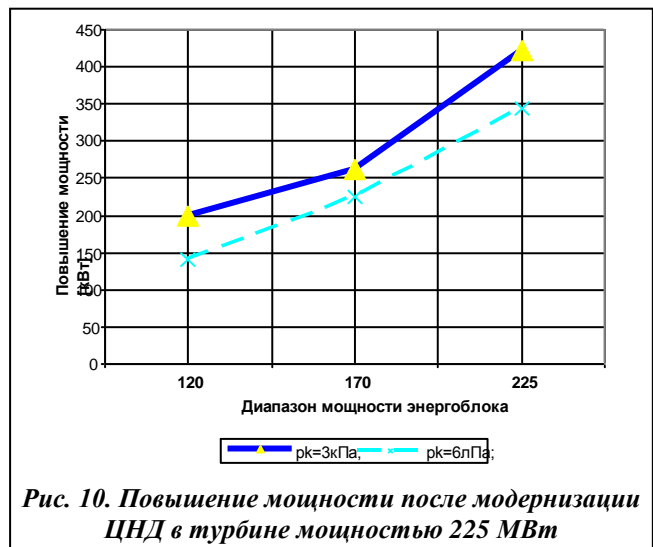




Рис. 11. Фотографии кольца, установленного на неподвижных частях ступени ЦНД турбины мощностью 225 МВт

ред точкой нерегулируемого отбора пара в конструкции ступени ЦНД турбины мощностью 225 МВт позволяет увеличить мощность более чем на 400 кВт, что эквивалентно снижению удельного расхода тепловой энергии на 15 кДж/кВтч. Этот эффект получается в результате увеличения тепловой нагрузки первого подогревателя и повышения эффек-

тивности последней ступени.

Установка кольца в диффузоре за третьей ступенью не только устраняет протечку пара, но также исключает сепарацию капель воды. Это возможно за счет того, что кольцо, установленное внутри проточной части, действует как эжектор. В результате уменьшается эрозионное разрушение входных кромок лопаток рабочего колеса последней ступени.

Новая конструкция оказалась сравнительно простой в монтаже и безопасной в эксплуатации. Кольца должны быть надежно зафиксированы в турбине относительно решетки направляющего аппарата, с учетом не только механического крепления, но и относительных перемещений подвижной и неподвижной частей турбины во время пуска и останова.

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

Литература

1. Gardzilewicz, A. Diagnosis of LP Steam Turbine prospects of Measuring Technique / A. Gardzilewicz, S. Marcinkowski // Joint Power Generation. – 1995. – P. 349–358.
2. Gardzilewicz, A. Analysis of Regenerative Extractions of Turbine Based on Thermal Measurements in Power Plants / A. Gardzilewicz // VDI Berichte. – 1995. – P. 427–443.
3. Gardzilewicz, A. Stage of Steam Turbine / A. Gardzilewicz, S. Marcinkowski // Patent No 160-805, Warsaw, Poland (in Polish). – 1997, 4 p.
4. Experimental Experience of Patent No. 160-805 Application in 200 MW Turbines / A. Gardzilewicz, S. Marcinkowski, H. Sobera, Z. Józefowicz // Energetyka. – 1994. – № 3. – P. 73–78.
5. Gardzilewicz, A. Proposal of Modernisation of System Turbine Stage / A. Gardzilewicz et al. // Task Quarterly 6. – 2002. – № 4. – P. 577–581.
6. Gardzilewicz, A. Surveys and Erosion Threat Analysis of Lasts Stages of 225 MW Turbine (Power Unit 3) in Kozenice Power Station / A. Gardzilewicz, S. Marcinkowski, M. Szymaniak // Diagnostyka Maszyn Ltd. – 2009. – № 6/09. – 98 p.
7. Gardzilewicz, A. Application of new Solution for LP Stages in the Power Unit No. 3 in Polaniec Power Station / A. Gardzilewicz et al. // Diagnostyka Maszyn Ltd. – 2009. – № 26/10. – 152 p.
8. Gardzilewicz, A. Investigations of steam flow in the LP part of 225 MW Modernised Turbine (Power Unit 4) in Polaniec Power Station / A. Gardzilewicz, S. Marcinkowski // Diagnostyka Maszyn Ltd. – 1993. – № 6/93. – 132 p.
9. Szymaniak M. CFD Technique Applied for the Modernisation of a Steam Turbine Construction in the Regenerative Extraction Area / Szymaniak M. et al. // Proc. IX ISAIF, Gyeongju (Korea) 2009.
10. IAGAR Program Version 2002 / A. Gardzilewicz, J. Gluch, M. Bogulicz, W. Uzieblo // Diagnostyka Maszyn Ltd. – 2002. – No. 28/02, 251 p.
11. Badur, J. Strength and Dynamic Calculation for the Patent No. P160-805 / J. Badur, D. Slawinski // Diagnostyka Maszyn Ltd. – 2008. – No. 05/08. – 58 p.
12. Graczyk, P. Technology of manufacturing and assembly of ring in the steam turbine / P. Graczyk, T. Graczyk, J. Gronert // Posteor Ltd. – 2008. – No. 07/08. – 72 p.

Поступила в редакцию 15.01.16