

А. А. Тарелин, В. П. Склярів

Інститут проблем машиностроєння ім. А. Н. Подгорного НАН України, Харків

РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЧАСТИ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ ТУРБИНЫ К-300-240 ПРИ РАБОТЕ В УСЛОВИЯХ ЭНЕРГОРЫНКА

Аннотация: Рассмотрены основные причины снижения эффективности части низкого давления турбины К-300-240 при работе на переменных режимах, отличающихся от расчетных. Показано, что на КПД турбоагрегата заметно влияет электризация пара и его термодинамическое состояние. Максимальное снижение мощности происходит на режимах, когда пар на выходе турбины либо перегрет, либо переохлажден, и теплота фазового перехода не используется. Предложены методы снижения потерь, вызванных электризацией и переохлаждением пара. Рассмотрены конструктивные решения уменьшения выхлопных потерь.

Ключевые слова: паровая турбина, эффективность работы, переохлаждение пара, перегрев пара, ядра конденсации, выхлопной патрубков.

В условиях энергорынка (когда ежедневное задание графика мощности энергоблоков задается по часам, причем изменение режимов меняется очень резко – от мощности 300 МВт до мощности 160 МВт в течение двух часов) турбоустановки ТЭС значительную часть времени работают при пониженной мощности.

Снижение мощности турбины приводит к отклонению от оптимального распределения течения парового потока в цилиндрах высокого и среднего давления, снижению используемого теплоперепада в части низкого давления, а также к появлению вентиляционных потерь в последних ступенях турбины. Мак-

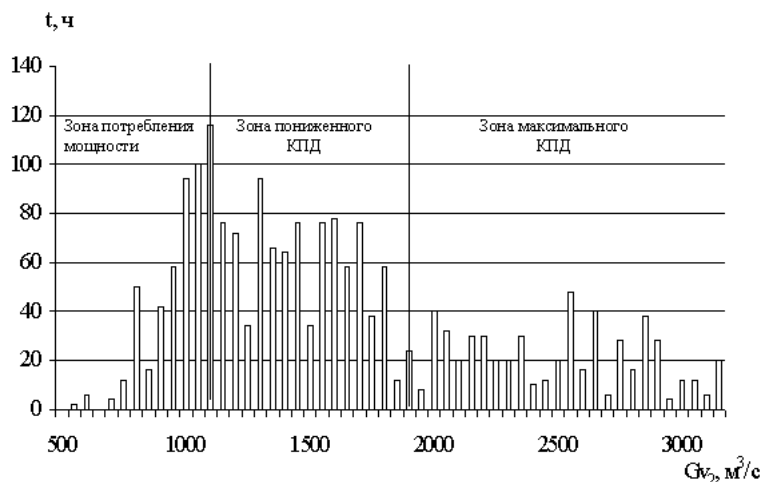


Рис. 1. Диаграмма продолжительности работы последних ступеней при различном объемном расходе пара через ЦНД энергоблока № 7 Змиевской ТЭС на разных режимах

симальные потери, связанные с уменьшением расхода пара через турбину, приходится на ступени цилиндра низкого давления (ЦНД), работающие в зоне влажного пара. При использовании энергоблоков К-300-240 как пиковых ЦНД турбин (особенно последние ступени) работают в условиях, существенно отличающихся от расчетных. Анализ условий эксплуатации этих турбин показал, что значительную часть времени энергоблоки работают на режимах частичной нагрузки. Для иллюстрации вышесказанного на рис. 1 приведена гистограмма режимов работы последних ступеней одного из энергоблоков Змиевской ТЭС за 2004–2005 гг.

Как видно из рис. 1, большую часть времени турбина работала либо при пониженном КПД последних ступеней, либо в режиме потребления мощности (вентиляционный режим). Потери мощности при отклонении режимов работы от номинальных составляют существенную величину. Уже на режиме с объемным расходом пара $G_{v2} = 1150 \text{ м}^3/\text{с}$ (~60 % от номинального) последняя ступень не вырабатывает мощности, из-за чего мощность турбины



Рис. 2. Общий вид нейтрализатора объемного заряда за последней ступенью турбины Т-250/300-240

в целом уменьшается на 10–15 МВт [1, 2]. При дальнейшем понижении нагрузки последняя ступень переходит в вентиляционный режим. На этом режиме ступень не вырабатывает, а потребляет мощность.

В соответствии с экспериментальными данными ХТГЗ и ВТИ [3, 4] потеря мощности от вентиляции достигает 4,5 МВт. А суммарное уменьшение вырабатываемой мощности на таких режимах составляет 14,5–19,5 МВт. Неэффективная работа последних ступеней ЦНД турбины при частичных режимах обусловлена не только конструктивными особенностями, но и термодинамическими условиями их работы, а также влиянием условий работы предпоследних ступеней.

Одним из факторов, вызывающих снижение мощности последних ступеней турбины, является электризация влажного парового потока. Исследования, выполненные в Украине [5] и за рубежом [6], показали, что при работе паровой турбины влажный пар на последних ступенях всегда электризуется. Методика измерения объемной плотности зарядов в паровом потоке изложена в работе [7].

При влажности парового потока, близкой к диаграммной, объемная плотность зарядов на выхлопе турбины может достигать $10^{-3} \text{ Кл}/\text{м}^3$ при напряженности поля $2 \cdot 10^5 \text{ В}/\text{м}$ [8]. В этом случае давление, создаваемое объемным зарядом за последней ступенью, достигает 200 Па, уменьшая перепад на ступени, что вызывает увеличение выхлопных потерь и снижение мощности турбины. Для уменьшения потерь, вызванных естественной электризацией парового потока, целесообразно установить нейтрализатор электростатических зарядов, обеспечивающий увеличение КПД турбины на 0,2–0,3 % [9, 10].

На рис. 2 показан общий вид такого нейтрализатора за последней ступенью турбины Т-250/300-240 (Харьковская ТЭЦ-5). Ориентировочный срок окупаемости такого нейтрализатора составляет 0,5–1 месяц.

Важным фактором, определяющим эффективность работы ЦНД, является также термодинамическое состояние пара в проточной части и на выхлопе турбины. На некоторых режимах в последних ступенях и на выхлопе турбины может наблюдаться переохлаждение пара. При расширении пара в проточной части ЦНД в условиях дефицита естественных ядер конденсации влага в паровом потоке не образуется (возникает задержка конденсации) и пар переходит в переохлажденное состояние. При переохлаждении пара в проточной части турбины не выделяется теплота фазового перехода (конденсации). В результате уменьшается удельный объем пара и использованный теплоперепад, что приводит к уменьшению вырабатываемой мощности. Переохлаждение пара может сохраняться даже за последней ступенью, где может достигать 10–15 °С [11]. Экспериментальные исследования на блоке № 7 Змиевской ТЭС показали, что даже при давлении в конденсаторе $p_k = 0,003$ МПа пар за последней ступенью турбины может быть переохлажден на 15,6–14,4 °С. Такое переохлаждение вызывает уменьшение вырабатываемой мощности турбины К-300-240 на ~1 МВт. В случае ухудшения вакуума в конденсаторе потери от переохлаждения пара возрастут.

На других режимах пар за последней ступенью турбины может оказаться перегретым. Это происходит из-за потери давления в пароперегревателе, чрезмерного промежуточного перегрева пара, а также из-за повышенного давления в конденсаторе и при работе последней ступени в вентиляционном режиме. Перегрев или переохлаждение пара снижает термический КПД турбоагрегата. И в том и другом случаях теплота фазового перехода не выделяется в проточной части, а уносится в конденсатор. Для турбины К-300-240 использованный теплоперепад при этом уменьшается на ~188 кДж/кг по сравнению с расчетным. Если такая ситуация возникнет при

номинальном расходе пара через ЦНД (даже с учетом внутреннего КПД), потеря мощности может составить до 23 МВт.

Чтобы устранить как перегрев, так и переохлаждение пара, необходимо корректировать режим турбоагрегата с учетом истинного состояния пара (термодинамической температуры) на выхлопе турбины.

Методика измерения термодинамической температуры пара разработана в Институте проблем машиностроения НАН Украины и подробно изложена в работе [11].

С целью уменьшения потерь от переохлаждения необходимо обеспечить условия для равновесного расширения пара во влажно-паровых ступенях турбины. Это можно осуществить за счет создания искусственных ядер конденсации. При наличии достаточного количества искусственных ядер конденсации процесс расширения приближается к равновесному. В таком случае основная часть влаги будет конденсироваться в объеме в виде мелких капель. Интенсивная объемная конденсация, по-видимому, должна привести к уменьшению конденсации влаги на рабочих поверхностях и, следовательно, к уменьшению эрозионного разрушения поверхностей.

Искусственные ядра конденсации можно создавать за счет коронного разряда в проточной части турбины [12]. Для создания коронного разряда перед зоной фазового перехода необходимо установить коронирующие электроды на входе в ЦНД либо непосредственно перед зоной фазового перехода в проточной части ЦНД. Схема размещения коронирующих электродов на входе в первый поток ЦНД показана на рис. 3.

Установка коронирующих электродов на входе в ЦНД позволит создать необходимую концентрацию ядер конденсации для равновесного расширения пара и тем самым свести к минимуму потери от переохлаждения. Увеличение мощности турбины в случае применения предлагаемой технологии может соста-

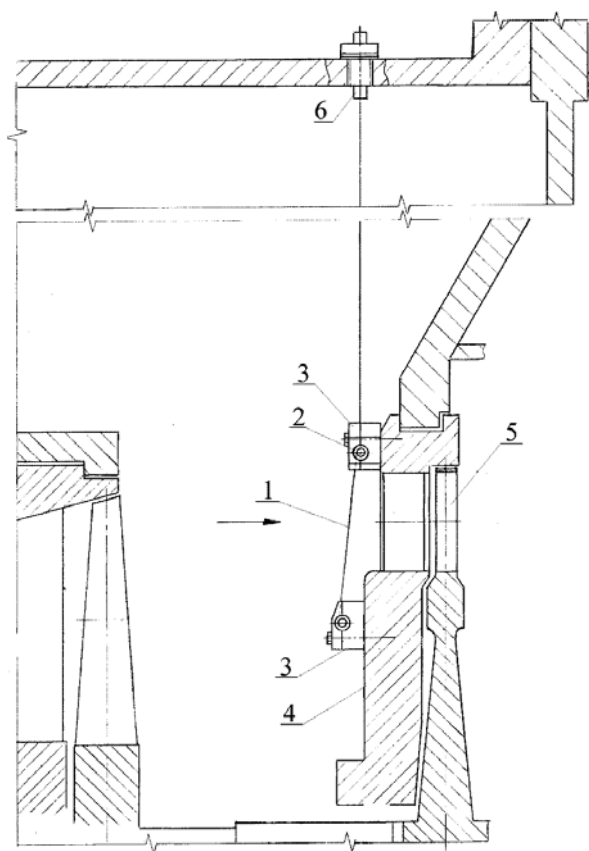


Рис. 3. Схема размещения коронирующих электродов в паровпуске первого потока НД турбины К-300-240: 1 – коронирующий электрод; 2 – изолированный электрод-коллектор; 3 – опора; 4 – диафрагма; 5 – рабочее колесо; 6 – проходной изолятор

вить 0,3–0,5 %. При этом мощность, необходимая для электризации парового потока турбины К-300-240, не превышает ~1 кВт [12].

Анализ реальных режимов работы блока позволил разработать также ряд рекомендаций по повышению экономичности турбин К-300-240 за счет модернизации части низкого давления. Одна из рекомендаций ограничена только модернизацией периферийных обводов последней ступени и выхлопного патрубка цилиндров низкого давления турбины. Технологические отклонения при сборке приводят к неравномерному распределению параметров в каналах осередиальных диффузоров трех патрубков ЦНД и, как следствие, к

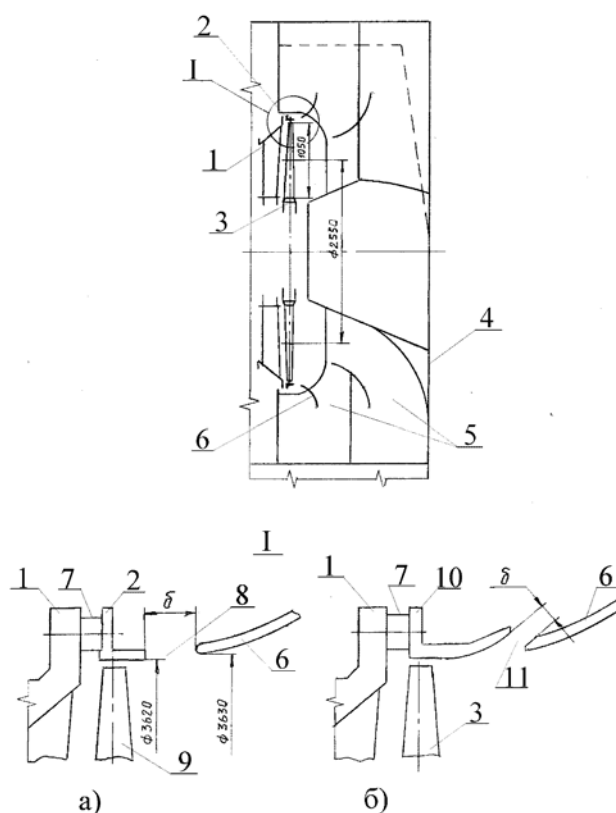


Рис. 4. Выхлопной отсек ЦНД турбины К-300-240 (а – существующая конструкция, б – предлагаемая): 1 – диафрагма последней ступени; 2, 10 – уплотнительный козырек; 3 – рабочее колесо с рабочей лопаткой; 4 – корпус (сборная камера); 5 – осередиальный диффузор; 6 – обечайка; 7 – дистанционная втулка; 8, 11 – осевая щель; 9 – радиальный зазор.

росту выхлопных потерь, а также к ухудшению условий работы конденсатора. В результате проработок целого ряда вариантов и проведенного технико-экономического анализа предлагается конструкция периферийного (выпускного) обвода осередиального диффузора.

Конструкции исходного и предлагаемого вариантов показаны на рис. 4. Такая конструкция позволяет использовать существующую в патрубке обечайку диффузора со специальным профилированием ее входной части для образования эффективного канала щели с новым козырьком. Конструкция крепления козырька к диафрагме сохраняется. Фор-

ма козырька в зоне рабочих лопаток выполняется цилиндрической, а затем переходит в тороидальную заданной кривизны. В предлагаемом конструктивном решении обеспечивается безотрывное обтекание поверхности козырька. В результате уменьшаются полные потери в патрубке. Реализация предлагаемого варианта модернизации выхлопных отсеков низкого давления турбины К-300-240 с учетом существующих особенностей штатной конструкции и возможных отклонений реальных параметров течения за последней ступенью от расчетных [13] обеспечит повышение мощности турбины на 0,6–0,9 МВт.

Еще одна возможность повышения экономичности ЦНД связана с уменьшением потерь от протечек в надбандажных уплотнениях. Рабочие колеса первых и вторых ступеней трех потоков низкого давления турбины К-300-240 имеют накладные полочные бандажы с уплотнительными гребнями, которые образуют с цилиндрической поверхностью проточки в ободе диафрагмы прямоточное уплотнение. Сравнительная оценка эффективности исходных уплотнений и выполненных с учетом рекомендаций [14] путем замены прямоточных уплотнений на уплотнения типа ЦКТИ показала, что суммарный эффект составляет 280 кВт (на три потока ЦНД).

ВЫВОДЫ

В условиях энергорынка турбоустановки (турбины К-300-240) ТЭС значительную часть времени работают на режимах, существенно отличающихся от расчетных. Работа с уменьшенным расходом пара приводит к снижению КПД ЦНД. Все это в результате может приводить к уменьшению вырабатываемой мощности на 14–19 МВт.

При реальной влажности парового потока, близкой к диаграммной, возникают дополнительные потери, связанные с электризацией пара. Использование нейтрализаторов объ-

емного заряда позволяет уменьшить эти потери и за счет этого увеличить КПД турбины на 0,2–0,3 % (прирост мощности составит 0,6–0,9 МВт).

При работе турбины как на расчетных, так и на частичных режимах может возникать переохлаждение пара в проточной части низкого давления. Вопреки распространенному среди специалистов мнению пар может находиться в переохлажденном состоянии и при пониженном давлении в конденсаторе (даже в зимнее время года), а реальная влажность за последней ступенью значительно ниже расчетной. На некоторых режимах переохлаждение сохраняется даже за последней ступенью турбины, где достигает 10–15 °С. В этом случае потеря от переохлаждения может достигать 0,7–1 МВт. На других режимах пар на выходе турбины может быть перегретым. В случае перегретого или переохлажденного пара теплота конденсации не используется, что в случае турбины К-300-240 приводит к уменьшению использованного теплоперепада на 188 кДж/кг. При номинальном расходе пара через ЦНД уменьшение вырабатываемой мощности для турбины К-300-240 может достигать 23 МВт.

С целью определения реального состояния пара за последними ступенями турбины необходимо установить датчики давления и датчики термодинамической температуры, что позволит регулировать параметры турбины для уменьшения (устранения) переохлаждения или перегрева пара. Для радикального решения проблемы переохлаждения пара в проточной части низкого давления необходимо установить коронирующие электроды перед зоной фазового перехода. Это позволит устранить потери от переохлаждения и приблизить процесс расширения пара к равновесному. Прирост мощности при этом может составить 3–9 МВт.

Малозатратная модернизация периферийных обводов проточной части цилиндра низ-

кого тиску і надбандажних ущільнень перших двох ступеней ЦНД дозволить підвищити вироблявану потужність на 0,9–1,2 МВт.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тарелин А. А., Антипцев Ю. П., Аннопольская И. Е., Борисов Н. А. Малозатратная модернизация ЦНД К-300-240 с учетом переменного режима функционирования турбоагрегата и потерь энергии в выхлопном патрубке. // Наука та інновації. – 2006. – № 6. – С. 156–167.
2. Лагун В. П., Симою Л. Л. и др. Особенности работы последних ступеней ЦНД на малых нагрузках и холостом ходу. // Теплоэнергетика. – 1971. – № 7. – С. 21–24.
3. Отработка модельных единичных ступеней на ЭПТ-2: Отчет о НИР. / ПО Турбоатом. – № ГР71061558. – Харьков, 1977. – 156 с.
4. Лагун В. П., Симою Л. Л., Фрумин Ю. З. Натурные исследования выхлопного патрубка мощной паровой турбины. // Теплоэнергетика. – 1975. – № 2. – С. 31–35.
5. Тарелин А. А., Скляров В. П., Верес О., Сурду Н. В. Электрофизические явления в паровых турбинах. // Пром. теплотехника. – 1999. – № 4–5. – С. 98–102.
6. Electrostatic Charge Measurements in the Turbine – Condenser Connection of Salt River Project’s Navajo Generating Station Unit 3. – Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, 1998. – EPRI WO3849-01.
7. Тарелин А. А., Скляров В. П., Крыженко В. П. Особенности измерения объемной плотности зарядов во влажном паровом потоке турбины. // Проблемы машиностроения. – 2000. – Т. 3, № 1/2. – С. 11–16.
8. Скляров В. П. Вплив електризації вологої пари на процеси конденсації в теплоенергетичних установках: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.14.06. / Інститут проблем машинобудування НАН України. – Харків, 2001. – 18 с.
9. Патент України, 47624 А, МКИ6 F01 D 25/30. Выхлопное устройство паровой турбины. / Тарелин А. А., Скляров В. П. – № 2001053424; заявлено 22.05.01; опубл. 15.07.2002. – Бюл. № 7. – 8 с.
10. Тарелин А. А., Скляров В. П., Вороновский Г. К., Козлоков А. Ю. Результаты испытаний нейтрализатора объемного заряда за последней ступенью паровой турбины. // Пробл. машиностроения. – 2006. – Т. 9, № 1. – С. 19–24.
11. Скляров В. П. Измерение температуры влажного парового потока в паровых турбинах. // Пробл. машиностроения. – 2005. – 8, № 3. – С. 8–16.
12. Патент 74193 України, МКИ6 F01D5/28. Способ увеличения КПД паровых турбин. / Скляров В. П., Тарелин А. А. – № 20030103319; заявлено 14.01.03; опубл. 15.11.05. – Бюл. № 11.
13. Касилов В. Ф., Галацан В. Н., Конев В. А., Денисов В. Н. Исследование выхлопного патрубка ЦНД паровой турбины. // Теплоэнергетика. – 1990. – № 5. – С. 35–39.
14. А.с. 756048. Лабиринтное уплотнение турбины. / В. И. Кораблев, В. Г. Орлик, Л. Б. Резник, С. Ш. Розенберг. – 1980. – Бюл. № 30.

А. О. Тарелін, В. П. Скляров. РОЗРОБКА ЗАХОДІВ ПО ПІДВИЩЕННЮ ЕФЕКТИВНОСТІ ЧАСТИНИ НИЗЬКОГО ТИСКУ ТУРБИНИ К-300-240 ПРИ РОБОТІ В УМОВАХ ЕНЕРГОРИНКУ.

Анотація: Розглянуто основні причини зниження ефективності частини низького тиску турбіни К-300-240 при роботі на режимах, що відрізняються від розрахункових. Показано, що на ККД турбоагрегата помітно впливає електризація пари та її термодинамічний стан. Максимальне зниження потужності відбувається на режимах, коли пара на виході турбіни або перегріта, або переохолоджена, і теплота фазового переходу не використовується. Запропоновано методи зниження втрат, зумовлених електризацією та переохолодженням пари. Розглянуто конструктивні рішення зменшення вихлопних втрат.

Ключові слова: парова турбіна, ефективність роботи, переохолодження пари, перегрів пари, ядра конденсації, вихлопний патрубок.

A. A. Tarelin, V. P. Skliarov. WORKING OUT MEASURES TO INCREASE EFFICIENCY OF THE LOW-PRESSURE SECTION OF THE K-300-240 TURBINE IN ENERGY MARKET CONDITIONS.

Abstract: Basic reasons of drop in efficiency of the low-pressure section of the K-300-240 turbine when operating in off-design modes are examined. It is shown that the efficiency of the turbine is affected by steam electrization and its thermodynamic state. Maximum power drop occurs at modes when steam at the turbine exhaust is either superheated or supercooled and phase transition heat is not used. Methods of reducing losses caused by electrization and steam supercooling are offered. Constructive solutions allowing to reduce exhaust losses are considered.

Keywords: Steam turbine, efficiency performance, steam supercooling, steam superheating, condensation nuclei, exhaust hood.

Надійшла до редакції 24.10.06