

ЭФФЕКТИВНОСТЬ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА КОНДЕНСАЦИОННЫХ УСТАНОВОК ПАРОВЫХ ТУРБИН

В рамках Межгосударственной программы инновационного сотрудничества государств – участников СНГ на период до 2020 года ученые России и Беларуси провели совместные исследования в области эффективности модификации поверхности теплообмена конденсационных установок паровых турбин с использованием поверхностно-активных веществ. Результаты исследований и опыт использования технологии позволяют говорить о высокой экономической эффективности данного способа. В настоящее время технология проходит адаптацию на ряде электростанций России и планируется к внедрению на энергетических объектах Беларуси.

Часть 1.

Несмотря на бурное развитие новых технологий прямого преобразования первичной энергии в электрическую, традиционные тепловые технологии будут использоваться еще долгие годы. Не стоит забывать и о том, что обычно при введении новаций замалчиваются негативные экономические и экологические аспекты развития нетрадиционной, в том числе возобновляемой, энергетики. В частности, это слабая плотность исходного энергетического потока и негативное влияние искусственно создаваемого разрыва в сложившейся природной цепочке преобразования энергии. В свете сказанного модернизация и повышение эффективности традиционных технологий остается актуальной проблемой.

В последние годы произошло значительное обновление энергетических мощностей Объединенной энергосистемы Республики Беларусь. Введен в эксплуатацию целый ряд парогазовых блоков. В то же время продолжают использоваться значительные мощности, работающие по паросиловой технологии. Рассмотрим один из возможных путей

повышения эффективности парогазовых и паросиловых блоков за счет модификации поверхности теплообмена конденсационных устройств паротурбинных установок (ПТУ).

Влияние конденсационных устройств ПТУ на надежность и экономичность ТЭС

Как известно, основные потери работоспособности энергии органического топлива происходят со стороны «горячего источника», поэтому термодинамический цикл ПТУ стремятся совершенствовать в первую очередь за счет повышения начальных параметров пара и перехода на комбинированные циклы. Но очевидно, что вариант повышения начальных параметров пара допустим исключительно для новых энергетических блоков. В то же время доминирующая часть тепловых потерь приходится на «холодный источник». Для того чтобы избежать этих потерь, в свое время был предложен теплофикационный цикл,

В.А. СЕДНИН,
д.т.н., профессор,
заведующий кафедрой
«Промышленная теплоэнергетика
и теплотехника» БНТУ

А.В. СЕДНИН,
к.т.н., доцент, заведующий
центром автоматизированных
систем управления в теплоэнергетике
и промышленности
филиала НИПИ БНТУ

А.В. ВОЛКОВ,
д.т.н., профессор ФГБОУ ВО
«Национальный исследовательский
университет «МЭИ»

А.В. РЫЖЕНКОВ,
д.т.н., директор НЦ «Износостойкость»
ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский университет «МЭИ»

М.В. ЛУКИН,
к.т.н., доцент, старший научный
сотрудник НЦ «Износостойкость»
ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский университет «МЭИ»

в котором теплота конденсации пара на хвосте турбины используется для нагрева теплоносителя систем централизованного теплоснабжения. Однако вследствие несбалансированности энергетических нагрузок – как во времени, так и по мощности – в балансе энергосистемы конденсационная выработка электрической энергии занимает значительную долю. Поэтому для действующих ПТУ снижение потерь со стороны «холодного источника» имеет большее практическое значение.

Достижение оптимальных параметров отработавшего в турбине пара обеспечивается работой низкопотенциального

комплекса (НПК) тепловой электростанции (ТЭС), в состав которого входит конденсационная установка. Эффективность работы оборудования НПК ТЭС существенно влияет на экономичность работы ПТУ. Мощность конденсатора в значительной мере определяется термическим сопротивлением перехода теплоты от отработавшего пара в окружающую среду. Любое уменьшение этого сопротивления приводит к снижению параметров пара на хвосте паровой турбины, что создает положительный эффект в виде увеличения мощности и снижения удельного расхода теплоты на выработку механической (электрической) энергии. Что касается непосредственно конденсатора паровой турбины, то увеличение давления в нем на 1 кПа приводит к снижению мощности турбоустановок высокого давления в конденсационном режиме на 0,8–1,5 %, турбоустановок низкого и среднего давления – на 1,5–2 % [1]. И хотя эффект от оптимизации работы НПК более важен для конденсационных блоков, значим он и для теплофикационных блоков, особенно при их работе на переменных режимах.

Конденсационные устройства ПТУ в значительной мере определяют надежную и экономичную работу ТЭС. Нарушения в работе конденсаторов приводят к вынужденному снижению электрической мощности энергоблока и его надежности, а также к существенной недопроизводке электроэнергии. Напомним, что абсорбция воздуха конденсатом снижается при повышении вакуума в конденсаторе. Следовательно, работа конденсатора оказывает влияние на водно-химический режим конденсатопитательного тракта.

На практике зависимость располагаемой мощности тепловой электростанции от эффективности работы НПК и параметров атмосферного воздуха в конечном виде определяется состоянием системы технического водоснабжения и гидроохладителей, а также организацией переноса теплоты от конденсируемого пара в воздушную атмосферу. В связи с этим имеют место физические (метеорологические) ограничения установленной мощности энергоустановки. Они обусловлены повышением температуры охлаждающей воды в летний период, которое, в свою очередь, зависит от температуры окружающего воздуха и эффективности процессов переноса теплоты сначала от конден-

сируемого пара к циркуляционной воде, а затем в градирнях от циркуляционной воды к окружающему воздуху. Отметим, что вопросам интенсификации теплообмена в градирнях посвящено большое количество исследований.

Кроме того, принимая во внимание сложность НПК и взаимозависимость

многих процессов при конденсации пара приведет к снижению величины температуры конденсации и, следовательно, давления в конденсаторе. Результатом станет повышение энергоэффективности работы энергоблока в целом (рис. 1).

Представленная на рисунке 1 диаграмма позволяет сделать вывод, что пло-

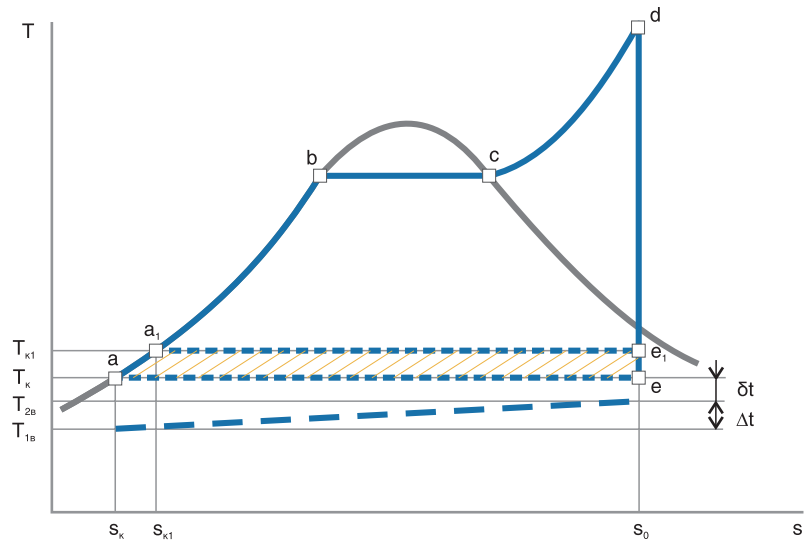


Рис. 1. Сопоставление идеальных тепловых циклов ПТУ с разными давлениями пара в конденсаторе: s – энтропия; T – температура; Δt и δt – перепад температуры

его элементов, необходимо учитывать, что изменение давления пара в конденсаторе p_k влияет не только на мощность турбины, но и на перераспределение потоков энергии в этих элементах. Так, изменение p_k приведет к изменению: мощности электроприводов циркуляционных и конденсатных насосов; расхода пара, воды или электроэнергии на привод воздухоудаляющих устройств; расхода пара в ПНД-1 вследствие изменения температуры конденсата t_k . В результате изменится мощность между последним отбором и выхлопным патрубком.

Основные аспекты теплопереноса в конденсационных установках

Рассмотрим более подробно процессы теплопереноса при конденсации пара в конденсационных установках. Согласно существующим нормативам допустимое давление пара в конденсаторе по условиям нормальной работы последней ступени ЦНД, установленное заводом-изготовителем, как правило, не должно превышать 12 кПа. Как отмечалось выше, интенсификация теплооб-

щади фигуры abcdea (полезная работа цикла), относящейся к циклу с меньшим давлением отработавшего в турбине пара, больше площади фигуры a₁bcde₁a, на площадь заштрихованной фигуры aa₁e₁ea.

В таблице в качестве примера представлены данные о том, как влияет изменение давления пара за турбиной при неизменных параметрах свежего пара на мощность турбин различных марок и экономичность ПТУ. Как показывают эти данные, при изменении давления за турбиной на 1 кПа экономичность ПТУ ТЭС изменяется примерно на 1 %.

За основной показатель эффективности работы конденсатора обычно принимают давление пара p_k в его переходном (входном) патрубке или производные этого параметра – разрежение, или вакуум V , то есть разность между барометрическим давлением B и давлением пара в конденсаторе, а также вакуум, выраженный в процентах барометрического давления. Исследования Всероссийского теплотехнического института [2] показали, что эффективность работы конденсационной установки практически не зависит от барометрического давления, и поэтому значение p_k харак-

теризует эффективность работы конденсатора (конденсационной установки в целом) и условия работы паровой турбины в части ее противодействия. В свою очередь, величина p_c однозначно определяется температурой насыщения $t_{н,}$ соответствующей этому давлению.

Величину $t_{н,}$ при которой происходит конденсация водяного пара в конденсаторе, можно представить в виде зависимости

$$t_{н} = t_{1цв} + \Delta t + \delta t,$$

где Δt – приращение температуры циркуляционной воды при ее нагреве в конденсаторе, $\Delta t = t_{2цв} - t_{1цв}$, где $t_{1цв}$, $t_{2цв}$ – температура циркуляционной воды соответственно на входе в конденсатор и выходе из него; δt – «недогрев» циркуляционной воды до температуры насыщения, $\delta t = t_{н} - t_{2цв}$.

Приведенная зависимость является основополагающей для анализа эффективности работы конденсатора и всей конденсационной установки как на номинальном, так и на переменном режиме работы турбины (турбоустановки). Отметим, что температура циркуляционной воды на выходе из конденсатора $t_{2цв}$, а следовательно, и приращение температуры циркуляционной воды Δt , определяется тепловой нагрузкой конденсатора и расходом циркуляционной воды (изменением теплоемкости в зависимости от температуры можно пренебречь). А разность температур δt формируется за счет термических сопротивлений циркуляционной воды, стенки трубок трубного пучка и конденсирующегося пара.

Таким образом, приращение температуры циркуляционной воды определяется исходя из температурного баланса, а величина ее «недогрева» до температуры насыщения может быть рассчитана при совместном решении уравнения теплопередачи и уравнения теплового баланса. Для этого необходимо знать коэффициент теплопередачи, однако определение его истинного значения является достаточно сложной задачей. Следовательно, величина «недогрева» охлаждающей воды в конденсаторе δt до температуры насыщения $t_{н}$ зависит от удельной паровой нагрузки конденсатора, чистоты его поверхности теплообмена, воздушной плотности, температуры и скорости охлаждающей воды, материала трубок и ряда других факторов. В то же время любые мероприятия, направленные на увеличение коэффициента теплопередачи и интенсификации теплообмена в конденсаторе, однозначно приводят к снижению «недогрева» и повышению эффективности ПТУ.

Для любой паровой турбины при постоянном расходе пара в конденсатор G_n и неизменных параметрах свежего пара p_0 , t_0 можно построить зависимость изменения мощности турбины от давления пара в конденсаторе p_c :

$$\Delta N = f(p_c), G_n = \text{const}, \\ p_0 = \text{const}, t_0 = \text{const}.$$

Такие зависимости, полученные на основе расчетных данных, включаются в типовые энергетические характеристики по результатам испытаний и обоб-

щения опыта эксплуатации больших групп однотипных турбин. На рисунке 2 по данным [4] в качестве примера представлены графики этих зависимостей для ряда паровых турбин.

Для режимов с докритической скоростью истечения пара из рабочей решетки последней ступени существует пропорциональная зависимость между приращениями теплоперепада и мощности (область, ограниченная линиями I-I и II-II). При сверхкритических скоростях истечения пара из рабочей решетки последней ступени изменение давления в конденсаторе не сказывается на параметрах пара перед ступенью. Поэтому мощность всех ступеней турбины, кроме последней, останется постоянной, а мощность самой турбины будет изменяться только за счет изменения окружающей составляющей скорости выхода пара из рабочей решетки последней ступени.

Температура охлаждающей воды на входе в конденсатор $t_{1цв}$ зависит от географического расположения электростанции, времени года и системы водоснабжения. Во многих публикациях последних лет, посвященных вопросу водоснабжения электрических станций [2, 3], показано, что практически на всех электростанциях неудовлетворительная работа системы оборотного охлаждения (СОО) с градирнями обуславливается плохим качеством циркулирующей воды.

Основные проблемы, которые возникают при работе СОО, – биологическое обрастание, образование минеральных отложений, а также повышенная температура охлаждающей воды. На практике

Таблица. Изменение мощности турбин и экономичности ПТУ при изменении давления отработавшего пара на ± 1 кПа [1]

Марка турбины	Номинальная мощность турбины, МВт	Изменение мощности турбины, МВт	Изменение экономичности ПТУ, %
К-50-90 ЛМЗ	50	0,45	0,90
К-100-90 ЛМЗ	100	0,90	0,90
Т-110/120-130 ТМЗ	120*	1,25	0,73*
К-200-130 ЛМЗ	200	1,90	0,95
Т-250-300-240 ТМЗ	300*	1,83	0,70*
К-300-240-ЛМЗ	300	2,76	0,92
К-300-240-ХТЗ	300	3,34	1,11
К-500-240-ХТЗ	500	3,88	0,78
К-750-65/3000 ХТЗ	750	8,91	1,19
К-800-240 ЛМЗ	800	4,94	0,62
К-500-65/3000 ХТЗ	500	8,00	1,60
К-220-44 ХТЗ	220	4,06	1,85
К-1000-60/1500-1 ХТЗ (3 ЦНД)	1000	12,75	1,28

* На конденсационном режиме работы

применяют ряд способов предотвращения обрастания и образования отложений, в том числе системы шариковой очистки, химические методы подготовки воды (подкисление, хлорирование, фосфатирование, обогащение двуокисью углерода и др.), гидравлические и механические методы, магнитную обработку и т.д. Но даже если будут решены все вопросы очистки поверхности теплообмена циркуляционной воды, со стороны поверхности, на которой конденсируется пар, будет по-прежнему возникать дополнительное термическое сопротивление, оказываемое непосредственно самой пленкой конденсата.

Заключение

Проблема интенсификации теплообменных процессов в конденсаторах современных паровых турбин является одной из наиболее актуальных, так как высокие значения коэффициента теплопередачи позволяют даже в условиях нерасчетных режимов эксплуатации обеспечить, с одной стороны, достаточно высокий КПД за счет поддержания необходимого уровня вакуума в паровом пространстве конденсатора, а с другой – создает условия для более глубокой деаэрации конденсата, что минимизирует

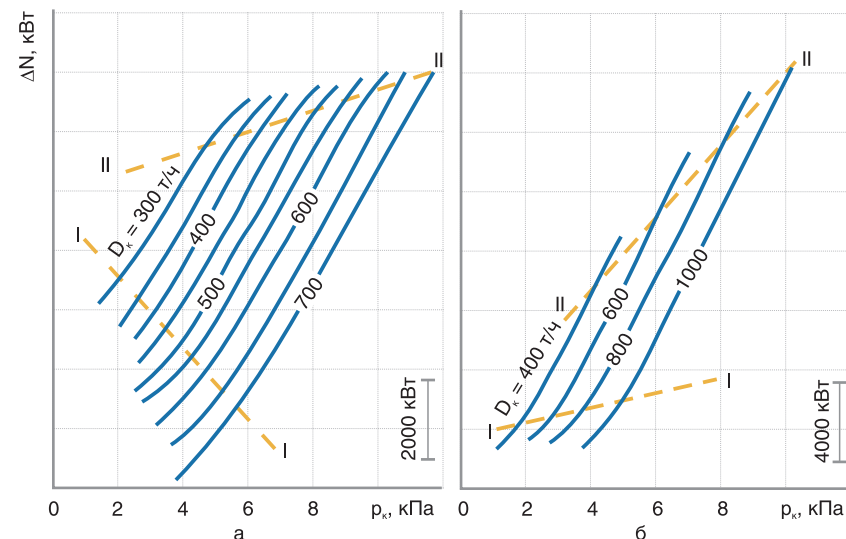


Рис. 2. Поправки к мощности турбин на отклонение давления пара в конденсаторе (I-I-II-II – зона линейной зависимости): а – турбина К-300-240 ХТЗ, б – турбина К-500-240 ХТЗ [2]

коррозионные процессы в конденсаторно-питательном тракте.

Список литературы

1. Методические указания по эксплуатации конденсационных установок паровых турбин электростанций: РД 34.30.501 (МУ 34-70-122-85).
2. Бродов, Ю.М. Справочник по теплообменным аппаратам паротурбинных установок / Ю.М. Бродов, К.Э. Аронсон,

А.Ю. Рябчиков, М.А. Ниренштейн; под общ. ред. Ю.М. Бродова. – М.: Издат. дом МЭИ, 2008. – 479 с.

3. Галустов, В.С. Энергетическая эффективность водооборотных систем и градиент / В.С. Галустов // Труды Академэнерго. – 2010. – № 2. – С. 104–112.
4. Попов, И.А. Промышленное применение интенсификации теплообмена – современное состояние проблемы (обзор) / И.А. Попов, Ю.Ф. Гортышов, В.В. Олимпиев // Теплоэнергетика. – 2012. – № 1. – С. 3–14.

В рамках
международного
выставочного
проекта

**БЕЛОРУССКИЙ
ПРОМЫШЛЕННО-
ИНВЕСТИЦИОННЫЙ
ФОРУМ**

BELPROMFORUM.BY

22-я МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА

ТЕХИННОПРОМ

ТЕХНОЛОГИИ И ИННОВАЦИИ
В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

17-20 СЕНТЯБРЯ 2019

ФУТБОЛЬНЫЙ МАНЕЖ
Минск, пр. Победителей, 20/2

- Промышленное оборудование, технологии и продукция
- Индустрия 4.0 – цифровая трансформация промышленности
- Энергетика в промышленности, энергосбережение, экология

ЭКСПОФОРУМ
выставочное предприятие

+375 17 314 34 35
@ pva@expoforum.by