

Жинов А.А.², Тарасов Е.В.¹,

¹К.т.н., доцент,

²магистрант, кафедра «Тепловые двигатели и теплофизика»,

Калужский филиал Московского государственного технического университета
имени Н.Э. Баумана

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ СМЕШИВАЮЩЕГО ТИПА В СХЕМАХ ПАРОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ

Аннотация

Рассмотрен перспективный способ оптимизации тепловых схем паротурбинных установок средней мощности с применением теплообменных аппаратов смешивающего типа. Изложены варианты оптимизации с модернизацией системы регенеративного подогрева за счет применения подогревателей низкого давления смешивающего типа, а также конденсатора смешивающего типа. Представлены достоинства и недостатки таких теплообменных аппаратов, основные типы их конструктивного исполнения. Рассмотрены варианты схемы включения смешивающих подогревателей низкого давления в систему регенеративного подогрева паротурбинной установки. Приведен сравнительный анализ тепловых схем со штатным поверхностным и разработанным смешивающим конденсатором для паротурбинной установки средней мощности.

Ключевые слова: паротурбинная установка, тепловая схема, система регенерации, бездеаэрационная схема, КПД, смешивающий подогреватель низкого давления, смешивающий конденсатор, эффективность.

Keywords: steam turbine, heat recovery system, efficiency, mixing condenser, mixing heater.

В отечественной энергетике значительная доля электрической энергии вырабатывается на паротурбинных энергоблоках, входящих в состав ТЭС, ТЭЦ и ГРЭС. В связи с этим повышению термодинамического КПД цикла паротурбинных установок уделяется особое внимание. Эффективность основных агрегатов таких энергоустановок близка к предельной для современного уровня конструкционных материалов и технологий, и повышение эффективности всей установки, при достигнутом в настоящее время уровне параметров пара на входе в турбину, в основном возможно за счет совершенствования вспомогательного оборудования и схем его включения.

Конденсирующее пар устройство оказывает существенное влияние на термический КПД всей паротурбинной установки. В стационарных установках обычно применяются поверхностные конденсаторы пара с охлаждением водой, но существуют и другие виды конденсаторов, например, с воздушным охлаждением [1, 2, 3] и конденсаторы смешивающего типа, в которых теплообмен между охлаждающей водой и конденсирующимся паром происходит при их непосредственном контакте – смешении.

Для отвода теплоты, выделяющейся при конденсации пара, в традиционных поверхностных конденсаторах, через трубки, образующие поверхность охлаждения, непрерывно прокачивается охлаждающая вода. При этом происходит пленочная конденсация отработавшего пара турбины на наружной поверхности труб. Существуют

также конденсаторы с конденсацией пара внутри труб и течением охлаждающей воды снаружи [1]. Количество теплоты, отведенной охлаждающей водой, составляет более половины от теплоты потока конденсирующего пара.

К недостаткам поверхностных конденсаторов можно отнести:

- большие габариты;
- большая металлоемкость конструкции;
- сложность изготовления и большая стоимость;
- наличие разделяющих поверхностей при теплообмене;
- большой расход охлаждающей воды.

Одним из недостатков поверхностных конденсаторов также является неизбежное переохлаждение конденсата. Переохлаждение зависит от многих факторов, таких как паровая нагрузка конденсатора, температура охлаждающей воды, эффективности работы эжектора и т.д. Переохлаждение конденсата снижает энтальпию рабочего тела, которое далее поступает в систему регенерации паротурбинной установки, а затем в паровой котел, что приводит к дополнительным затратам на нагрев питательной воды. Кроме того, следствием переохлаждения конденсата является насыщение его неконденсирующимися газами, которые активизируют коррозию конденсатного тракта. Также, присутствие в конденсаторе неконденсирующихся газов ухудшает условия теплообмена и приводит к повышению давления конденсации, и к ухудшению экономичности энергоустановки.

Недогрев охлаждающей воды в поверхностном конденсаторе до температуры насыщения определяется наличием термического сопротивления стенки между конденсирующимся паром и охлаждающей водой. В современных конденсаторах поверхностного типа нормированный недогрев охлаждающей воды до температуры насыщения находится в диапазоне от 3 до 10 °С. Величина недогрева зависит от коэффициента теплопередачи трубок конденсатора, их состояния и чистоты.

Вышеизложенных недостатков практически лишены смешивающие конденсаторы. В таких конденсаторах отсутствует трубчатая поверхность теплообмена и все связанные с этим элементы конструкции, характерные для поверхностных конденсаторов и определяющие в основном их высокую стоимость [5]. Конденсация пара в смешивающем конденсаторе происходит на струях охлаждающей жидкости. Из-за отсутствия разделяющей их поверхности, отсутствует термическое сопротивление стенок, следовательно, коэффициент теплоотдачи по пару у таких установок существенно выше [6, 7, 8, 9].

Основными преимуществами смешивающих конденсаторов перед поверхностными являются:

- простота конструкции, изготовления и обслуживания, а, следовательно, и снижение затрат на производство и эксплуатацию;
- отсутствие разделяющих поверхностей теплообмена;
- малые расходы охлаждающей воды;
- увеличенный температурный напор, при меньшей кратности охлаждения.

Несмотря на простоту конденсаторов смешивающего типа, физические процессы, протекающие в них, чрезвычайно сложны и остаются до сих пор актуальной задачей для исследования. Проектирование таких устройств представляет собой сложную научно-техническую задачу. Основной трудностью является создание корректной методики теплового и гидравлического расчета конденсирующих устройств данного типа.

Как правило, обобщенные закономерности теплообмена при конденсации пара на струях жидкости получены эмпирическим путем на экспериментальных стендах. При

проектировании же конкретных устройств требуется рассмотрение частных случаев, и, следовательно, требуется оптимизация и адаптация обобщенных методик расчета.

Задача проектирования конденсатора смешивающего типа для паротурбинной установки средней мощности с турбиной ПТ-40/50-8,8/1,3, имеющей развитую систему регенерации, выполненную по схеме 2ПВД+Д+3ПНД (два подогревателя высокого давления, деаэрактор, три подогревателя низкого давления), производства ПАО «КТЗ» была решена специалистами КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана и ПАО «КТЗ». Для этого предварительно была проведена оптимизация методик теплового и гидравлического расчета таких теплообменных устройств [6, 7, 8].

Разработанный смешивающий конденсатор состоит из двух секций, расположенных по бокам выхлопного патрубка турбины. Секции разделяются на зону массовой конденсации и зону газоохладителя, а также имеют общий конденсатосборник.

Для проведения сравнительного анализа характеристик штатного поверхностного и разработанного смешивающего конденсатора был рассмотрен конденсационный режим работы паротурбинной установки, при этом вырабатываемая ею электрическая мощность, составляла 50 МВт.

Некоторые сравниваемые характеристики штатного поверхностного и разработанного смешивающего конденсаторов для данной установки приведены в таблице 1.

Таблица 1.

	Поверхностный конденсатор	Смешивающий конденсатор
Давление в конденсаторе (конденсационный режим)	0,018 МПа	0,018 МПа
Расход пара	150 т/ч	150 т/ч
Температура охлаждающей воды	33°C	33°C
Расход охлаждающей воды	8000 т/ч	3100 т/ч

Расход охлаждающей воды в смешивающем конденсаторе в 2,6 раза меньше, чем в штатном поверхностном, при аналогичных режимах работы паротурбинной установки. Коэффициент теплоотдачи по пару у смешивающего конденсатора в десятки раз выше, чем у поверхностного. Недогрев охлаждающей воды у конденсатора смешивающего типа до температуры насыщения на порядок меньше, чем у поверхностного.

К преимуществам использования смешивающих конденсаторов, на примере рассмотренной паротурбинной установки, можно отнести:

- простоту конструкции, низкую металлоемкость;
- снижение затрат на производство и обслуживание;
- снижение расхода охлаждающей воды в 2,6 раза;
- отсутствие поверхности теплообмена;
- отсутствие термического сопротивления между конденсирующимся паром и охлаждающей водой;
- существенное увеличение среднего коэффициента теплоотдачи;
- существенное снижение недогрева охлаждающей воды до температуры насыщения пара.

Разработанный конденсатор смешивающего типа имеет и недостатки. К ним можно отнести необходимость в высококачественной подготовке охлаждающей воды, необходимость сооружения отдельной охлаждающей установки, соответствующей

жестким эксплуатационным требованиям. Не смотря на указанные недостатки, применение смешивающих конденсаторов в паротурбинных установках средней мощности является перспективным направлением их совершенствования.

Система регенерации паротурбинной установки тесно взаимосвязана с работой конденсатора и может оказывать существенное влияние на ее технико-экономические показатели [4].

Как правило, тепловые схемы паротурбинных установок средних и больших мощностей имеют развитую систему регенеративного подогрева. Обычно она включает в себя группы поверхностных теплообменных аппаратов – подогревателей низкого и высокого давления, в которых последовательно нагревается конденсат, в части низкого, а затем и питательная вода, в части высокого давления. Также в схемах обычно присутствует отдельный теплообменный аппарат – деаэратор.

На сегодняшний день, теплообменное оборудование, входящее в состав паротурбинных установок, сильно изношено и требует капитального ремонта или вовсе замены. В таком случае актуально проведение модернизации [10] системы регенеративного подогрева таких установок с применением подогревателей низкого давления смешивающего типа, так как по данным зарубежных и отечественных источников такие теплообменные аппараты вносят практически 55% от общей доли повышения экономичности за счет модернизации системы регенеративного подогрева [11].

Смешивающие подогреватели имеют наилучшие условия для протекания процессов теплообмена между греемой средой – конденсатом, и греющей – паром низкого давления из отбора турбины, за счет их непосредственного контакта. В таком случае наличие термического сопротивления исключено, оно присуще только традиционным, поверхностным подогревателям и является одним из основных их недостатков, существенно влияющих на экономичность системы регенеративного подогрева и паротурбинной установки в целом.

В отечественной теплоэнергетике установлена величина нормированного недогрева в поверхностных подогревателях. Она составляет порядка 2–4 °С. На практике, данная величина достигает значений 10–15 °С. Это означает, что часть тепловой энергии греющего пара является потерянной, что негативно сказывается на эффективности теплообменного аппарата. Вследствие отсутствия трубчатых поверхностей нагрева, а, следовательно, и термического сопротивления, данный параметр у смешивающих подогревателей близок к нулю.

Целесообразное и первоочередное применение смешивающих подогревателей – вакуумные отборы турбины, где содержание воздуха во влажном или слабо перегретом паре относительно высоко. В таком случае реализуется стабильный и максимально возможный нагрев конденсата, так как смешивающие подогреватели менее чувствительны к присутствию неконденсирующихся газов [12].

Конструктивно, смешивающие подогреватели низкого давления выполняются как горизонтального типа, данные конструктивные решения предложены ПАО «НПО ЦКТИ», так и вертикального.

К достоинствам смешивающих подогревателей низкого давления можно отнести:

- простота конструкции, изготовления и обслуживания, а, следовательно, и снижение затрат на производство;
- повышенная надежность (отсутствие трубчатой поверхности теплообмена);

- стабильный и максимально возможный нагрев конденсата при относительно высоком содержании неконденсирующихся газов;
- возможность деаэрирования конденсата.

Последнее из преимуществ было подробно изучено и реализовано специалистами ПАО «НПО ЦКТИ» и ПАО «ВТИ им. Дзержинского». Ими разработаны концепции бездеаэрационных тепловых схем с использованием смешивающих подогревателей, которые были применены на реально действующих установках [5,13,14]. Также, в [4] рассмотрено применение бездеаэрационных тепловых схем паротурбинных установок средней мощности на примере паротурбинной установки с турбиной производства ПАО «КТЗ».

Немаловажным фактором при внедрении смешивающих подогревателей низкого давления в систему регенеративного подогрева является выбор схемы их включения. Основными схемами являются: гравитационная, в которой группа смешивающих подогревателей располагается на различных высотах относительно друг друга и последовательная, с перекачивающими насосами. Рекомендации по выбору схем включения и расположения вспомогательного оборудования представлены в [5, 12].

Одним из главных недостатков контактной системы регенеративного подогрева является возможность заброса конденсата в проточную часть паровой турбины при несовершенной системе защиты и автоматики. Данная проблема подробно рассмотрена в [11, 15]. Попадание влаги в проточную часть обусловлено наличием обратного потока пара, возникающего при вскипании конденсата, вследствие сброса нагрузки паровой турбины. Это приводит к разгону ротора выше номинальных частот вращения. Вопросы набухания уровня воды, а также перспективные решения по системе защиты подробно освещены в [15].

На Рис.1 изображена принципиальная тепловая схема разработанной паротурбинной установки с теплообменными аппаратами смешивающего типа, а именно смешивающих подогревателей низкого давления (СПНД1, СПНД2), включенных по гравитационной схеме, а также смешивающий конденсатор с сухой градирней, рассчитанные по методике, разработанной совместно специалистами КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана и ПАО «КТЗ». Наличие данных теплообменных аппаратов в схеме позволяет перейти к бездеаэрационной схеме.

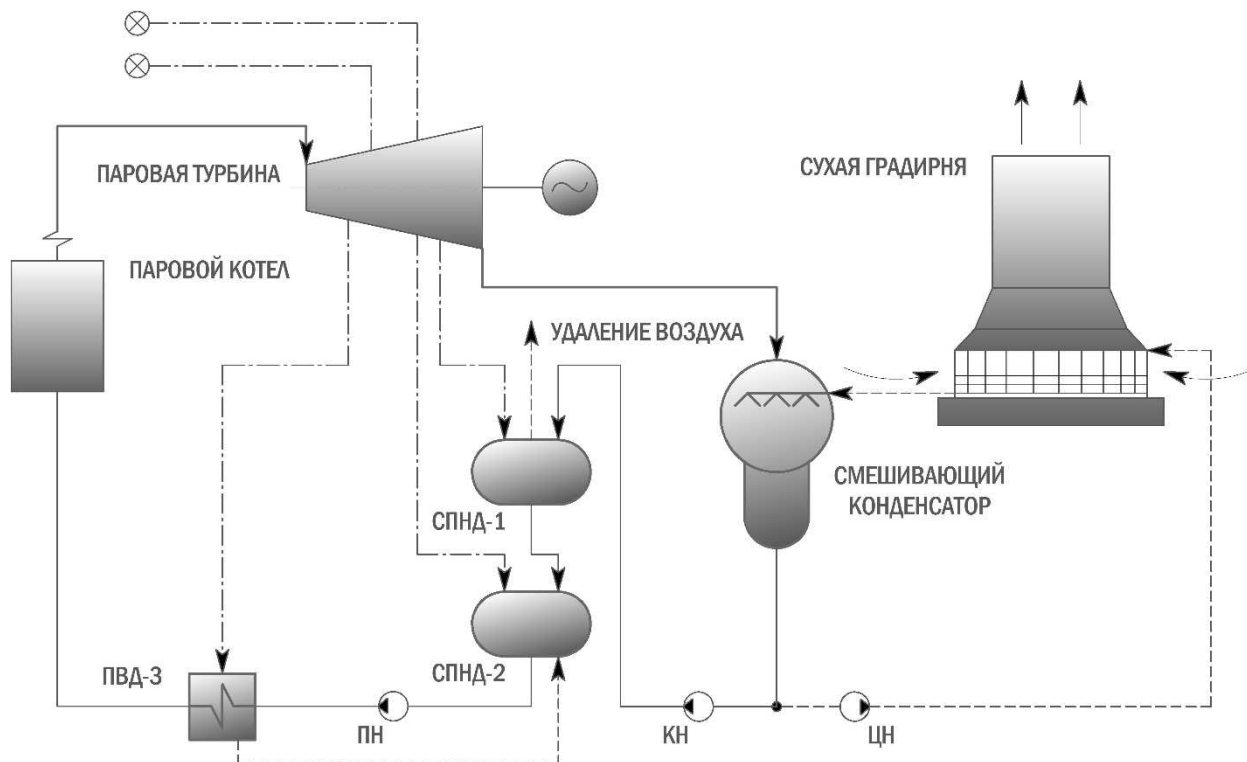


Рис. 1. Принципиальная тепловая схема паротурбинной установки средней мощности с теплообменными аппаратами смешивающего типа

Применение теплообменных аппаратов контактного типа в тепловых схемах паротурбинных установок средней мощности ведет к увеличению тепловой экономичности и эффективности термодинамического цикла установки в целом.

Таким образом, совместное или раздельное применение смешивающих подогревателей низкого давления, а также конденсаторов смешивающего типа является актуальным направлением при реконструкции, модернизации или строительстве новых тепловых электростанций. При этом требуется применение достоверных методик расчета таких теплообменных аппаратов, выбора рациональной схемы их включения, а также дополнительной проработки системы защиты и автоматики.

Литература

1. Федоров В.А., Мильман О.О. Конденсаторы паротурбинных установок. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. – 560 с.
2. Федоров В.А., Мильман О.О., Карышев А.К., Жинов А.А., Шевелев Д.В. и др. Результаты экспериментально-расчетных исследований воздушного потока в циркулах воздушных конденсаторов паротурбинных установок. –М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Машиностроение”, 2015, №5. - с.85-103
3. Жинов А.А., Шевелев Д.В. Исследование влияния ветра на производительность вентиляторов воздушно-конденсационной установки геотермальной электрической станции. –М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Машиностроение”, 2015, №1. - с.122-132

4. Тарасов Е.В., Жинов А.А. Исследование эффективности бездеаэрационных схем ПТУ со смешивающими подогревателями // Научные технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в вузе: материалы региональной научно-технической конференции, апрель 2016 г. – Калуга: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016.
5. Ермолов В.Ф., Пермяков В.А., Ефимочкин Г.И., Вербицкий В.Л. Смешивающие подогреватели паровых турбин. –М.: Энергоиздат, 1982. – 208 с.
6. Шкловер Г.Г., Родивилин М.Д. Обобщение опытных данных по конденсации пара на струях воды в условиях вакуума // Теплоэнергетика, 1970, №10
7. Шкловер Г.Г., Родивилин М.Д. Тепло- и массообмен при конденсации пара на струях воды // Теплоэнергетика, 1975, №11
8. Шкловер Г.Г., Родивилин М.Д. Конденсация на струях воды при поперечном движении пара // Теплоэнергетика, 1976, №4
9. Тарасов Е.В., Жинов А.А., Кирюхин А.А., Смирнов И.И. Возможность применения смешивающего конденсатора в паротурбинных установках средней мощности. Материалы XIV молодежной научно-технической конференции «Взгляд в будущее – 2016». СПб – АО «ЦКБ МТ «Рубин», 2016. – с. 524-528.
10. Тарасов Е.В., Жинов А.А. Перспективные способы повышения КПД паротурбинных установок // Научные технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в вузе: материалы всероссийской научно-технической конференции, 24-26 ноября 2015 г. – Калуга: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015.
11. Сухоруков Ю.Г., Ермолов В.Ф., Трифонов Н.Н. Некоторые вопросы повышения экономичности системы регенерации низкого давления паровых турбин. Теплоэнергетика, №12, 2008, с.62–65
12. Ефимочкин Г.И. Бездеаэрационные схемы паротурбинных установок. –М.: Энергоатомиздат, 1989. – 232 с.
13. Мороков В.Ф. Тепловой расчет систем контактной регенерации паровых турбин. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 136 с.
14. Сухоруков Ю.Г., Трифонов Н.Н., Ермолов В.Ф., Коваленко Е.В. Бездеаэрационные тепловые схемы: выбор решений. Энергетика и промышленность России, №19, 2008, с.17
15. Сухоруков Ю.Г., Ермолов В.Ф., Трифонов Н.Н. Методика расчета набухания уровня воды и защитных средств, исключаяющих ее попадание в проточную часть турбины с обратным потоком пара из смешивающих подогревателей. Теплоэнергетика, №2, 2008, с.72–77