

УДК 621.321

Повышение эффективности работы ТЭЦ при использовании байпасирования и рециркуляции сетевой воды в теплофикационных установках турбин

Ледуховский Г.В., Поспелов А.А., Зорин М.Ю., кандидаты техн. наук, Борисов А.А., асп.

Обосновано использование байпасирования и рециркуляции сетевой воды в теплофикационных установках турбин для расширения регулировочных диапазонов изменения тепловых и электрических нагрузок ТЭЦ, в которых возможна практическая реализация оптимальных режимов работы основного оборудования.

Ключевые слова: тепловая электрическая станция, энергосбережение, оптимизация режимов работы, теплофикационная установка, байпас, рециркуляция.

Increasing of the heat-electric generating plant overall performance while using the bypass line and recirculation of delivery water in a dual-purpose turbine plant

LEDUHOVSKY G.V., POSPELOV A.A., ZORIN M.J., candidates of science, BORISOV A.A., post-graduate

Using of the bypass line and recirculation of delivery water in dual-purpose turbine plant for regulation range extension of heat and electric loading variations is proved. In this case practical realization of optimum operating modes of the capital equipment is seemed to be possible.

Keywords: heat power station, energy saving, optimization of operating regime, dual-purpose turbine plant, bypass, recirculation.

Ранее нами разработаны методы и программное обеспечение для оптимизации состава и режима работы генерирующего оборудования тепловых электростанций, работающих на органическом топливе [1]. Программный комплекс «ТЭС-Эксперт» обеспечивает поиск оптимального состава работающего основного и вспомогательного оборудования, распределение суммарных тепловых и электрических нагрузок между отдельными агрегатами. При этом оптимизация режима работы турбинного оборудования выполняется совместно с оптимизацией тепло-гидравлического режима работы оборудования, участвующего в отпуске тепловой энергии с горячей водой [2]. Критерием оптимизации является минимум топливных затрат при обеспечении заданных графиков отпуски тепловой и электрической энергии потребителям.

Оптимизационный расчет выполняется с учетом имеющихся на конкретной электростанции ограничений по режиму работы различных технологических систем (технического водоснабжения, установок подогрева сетевой воды и др.). Во многих случаях невозможность практической реализации того или иного оптимального режима работы связана не с техническими ограничениями по основному оборудованию (энергетическим котлам, турбоагрегатам), а именно с ограничениями по режиму работы вспомогательных систем. При этом расчеты показывают, что ликвидация этих ограничений (часто не требующая больших капитальных затрат) приводит к повышению эффективности работы электростанции в целом. Нами разработаны способы расширения регу-

лировочных диапазонов изменения тепловых и электрических нагрузок ТЭЦ, в которых возможна практическая реализация оптимальных режимов работы генерирующего оборудования, с применением байпасирования и рециркуляции сетевой воды в теплофикационных установках турбоагрегатов. Рассмотрим эти способы на примере.

Примем для определенности, что группа оборудования ТЭЦ включает два одинаковых турбоагрегата типа Т-100/120-130. Теплофикационная установка группы состоит из параллельно подключенных по сетевой воде индивидуальных теплофикационных установок турбин, каждая из которых включает нижний и верхний сетевые подогреватели, включенные по сетевой воде последовательно. Сетевая вода после индивидуальных теплофикационных установок турбин может дополнительно подогреваться в пиковом бойлере, греющий пар в который подается от коллектора собственных нужд ТЭЦ давлением 8–13 кгс/см². Имеется байпас теплофикационной установки, позволяющий подавать сетевую воду с напора сетевых насосов непосредственно в коллектор прямой сетевой воды (рис. 1).

Каждый турбоагрегат может находиться в резерве, работать в конденсационном режиме, а также в режимах работы с одно- или двухступенчатым подогревом сетевой воды по тепловому или электрическому графику нагрузок. Для определенности примем значения основных параметров работы турбоагрегатов в соответствии с энергетическими характеристиками турбоагрегатов Т-100/120-130 Саранской ТЭЦ-2 Мордовского филиала ОАО «ТГК-6»:

давление и температура острого пара – 130 кгс/см² и 555 °С соответственно; минимальная и максимальная электрические нагрузки на уровне 30 и 120 МВт; давление пара в конденсаторе – 0,04 кгс/см². Диапазоны возможного изменения давления пара в камере регулируемого теплофикационного отбора составляют: [0,5...2,0] кгс/см² при одноступенчатом подогреве сетевой воды (нижний теплофикационный отбор); [0,6...2,5] кгс/см² при двухступенчатом подогреве сетевой воды (верхний теплофикационный отбор). Минимальный и максимальный расходы сетевой воды через сетевые подогреватели теплофикационной установки каждого турбоагрегата составляют соответственно 1500 и 5000 т/ч.

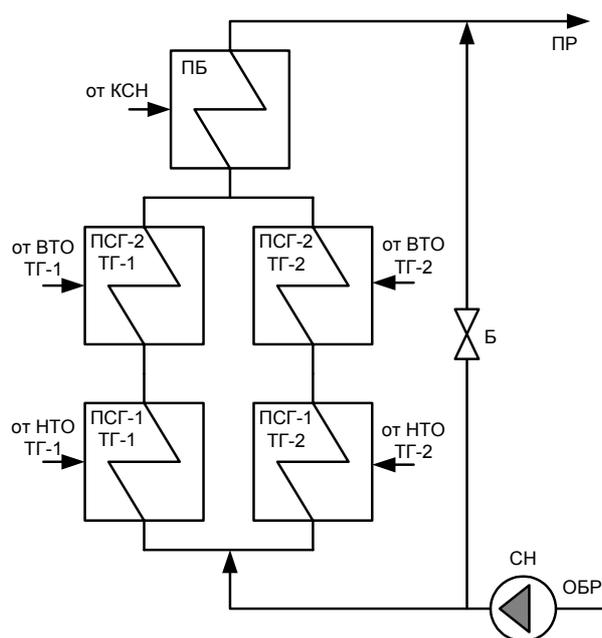


Рис. 1. Расчетная схема теплофикационной установки группы турбоагрегатов: ТГ-1 и ТГ-2 – турбоагрегаты № 1 и № 2 соответственно; ПСГ-1 и ПСГ-2 – нижний и верхний подогреватели сетевой воды соответственно; НТО и ВТО – нижний и верхний теплофикационные отборы пара турбоагрегатов; ПБ – пиковый бойлер; КСН – коллектор собственных нужд ТЭЦ давлением 8–13 кгс/см²; Б – байпас теплофикационной установки ТЭЦ; СН – сетевой насос; ОБР и ПР – трубопроводы соответственно обратной и прямой сетевой воды

Будем проводить оптимизационный расчет группы турбоагрегатов по критерию минимума суммарного расхода тепловой энергии с острым паром при обеспечении заданных значений суммарной вырабатываемой электрической мощности и суммарной тепловой нагрузки группы с горячей водой. Пусть температура обратной сетевой воды составляет 60 °С; расход сетевой воды через прямой и обратный сетевые трубопроводы (для простоты подпиткой тепловой сети пренебрегаем) равен 7000 т/ч. Рассмотрим несколько значений тепловой нагрузки группы с горячей водой от 0 до 200 Гкал/ч. Для сравнения будем рассчитывать оптимальный режим, характеризуемый мини-

мальным значением суммарного расхода тепловой энергии с острым паром на турбины, и самый неоптимальный режим, при котором значение указанного показателя максимально.

Результаты расчета при нулевом отпуске тепла из регулируемых отборов турбоагрегатов (рис. 2) свидетельствуют, что диапазон изменения удельного расхода тепла брутто на выработку электроэнергии по группе турбин при нахождении в работе обоих турбоагрегатов не существенен. Значительное ухудшение эффективности работы группы имеет место лишь при включении в работу двух турбин и суммарной электрической мощности, меньшей максимальной электрической нагрузки одного турбоагрегата при работе его в конденсационном режиме.

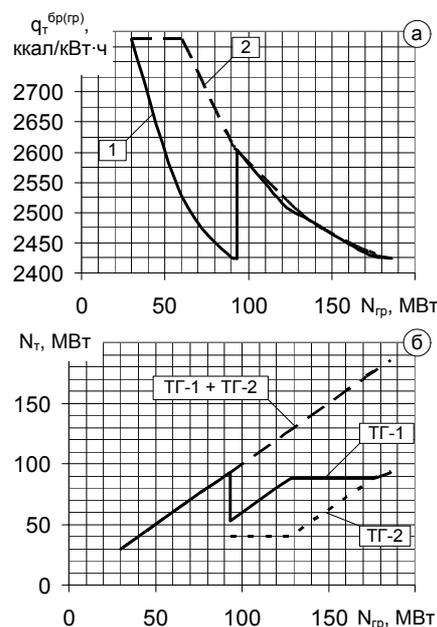


Рис. 2. Результаты оптимизации (суммарная тепловая нагрузка теплофикационных установок $Q_c = 0$): $N_{гр}$ – электрическая мощность группы турбоагрегатов, МВт; а – среднее по группе значение удельного расхода тепла брутто на выработку электроэнергии ($q_t^{бр(гр)}$, ккал/кВт·ч) при оптимальном (1) и самом неоптимальном (2) распределении нагрузок; б – диаграмма оптимальной загрузки турбоагрегатов ТГ-1, ТГ-2 по электрической мощности (N_t – электрическая мощность на клеммах генератора каждого турбоагрегата, МВт)

Результаты расчета при наличии тепловой нагрузки регулируемых отборов пара (рис. 3, 4) показывают, что практически при всех сочетаниях значений режимных параметров оптимальным является режим, при котором тепловые и электрические нагрузки распределены между турбоагрегатами неравномерно. Разница в экономичности работы группы турбин при различных вариантах распределения нагрузок может достигать 350 ккал/кВт·ч, что при переводе в удельный расход условного топлива на отпуск электроэнергии соответствует 40–50 г у.т./кВт·ч.

Анализ результатов расчета (рис. 3) показывает, что при относительно малых тепловых нагрузках с горячей водой возможно ис-

пользование байпаса теплофикационной установки для обеспечения оптимального режима работы турбоагрегатов. При этом в камерах

регулируемых теплофикационных отборов пара турбоагрегатов поддерживается минимально допустимое значение давления пара.

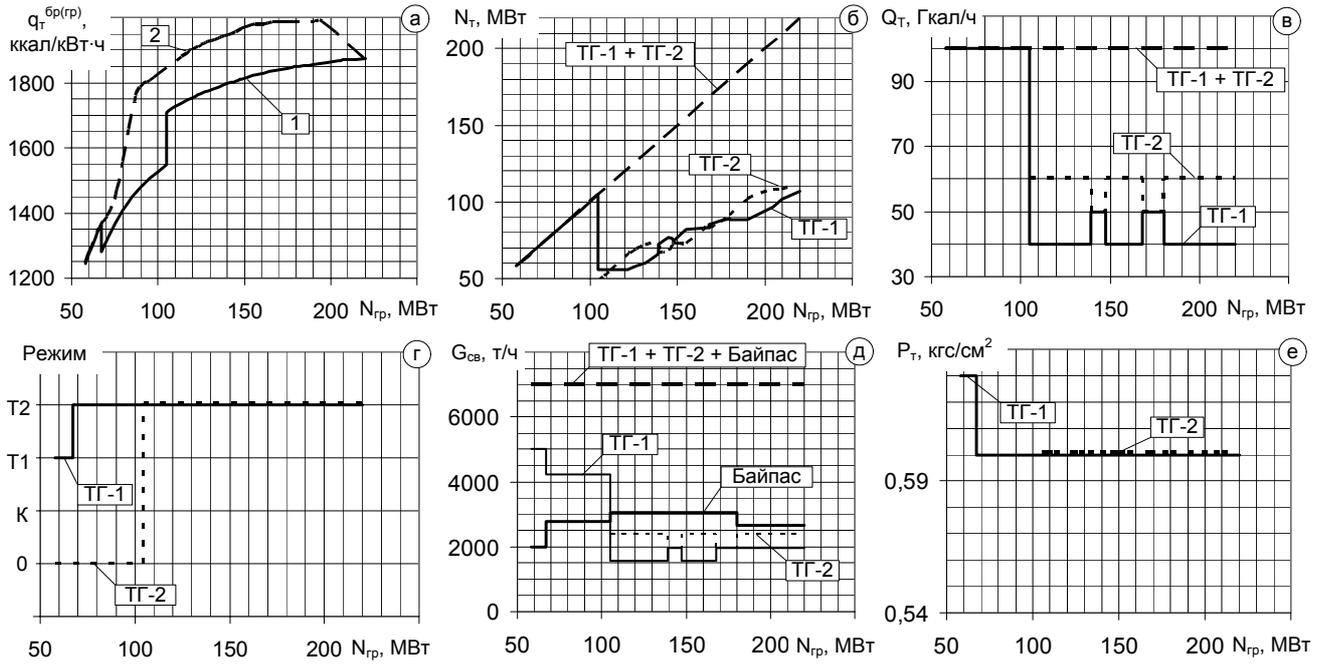


Рис. 3. Результаты оптимизации (суммарная тепловая нагрузка теплофикационных установок $Q_c = 100$ Гкал/ч): а, б – см. пояснения к рис. 2; в – диаграмма оптимальной загрузки регулируемых теплофикационных отборов пара турбоагрегатов (Q_t – тепловая нагрузка теплофикационного отбора, Гкал/ч); г – оптимальный режим работы турбоагрегатов (0 – резерв; К – конденсационный; T1 и T2 – соответственно с одно- и двухступенчатым подогревом сетевой воды); д – оптимальное распределение суммарного расхода сетевой воды ($G_{св}$, т/ч) между теплофикационными установками турбоагрегатов и байпасом теплофикационных установок по сетевой воде; е – абсолютное давление пара (P_t , кгс/см²) в камере теплофикационной (верхнего или нижнего, в зависимости от режима работы) отбора турбоагрегата

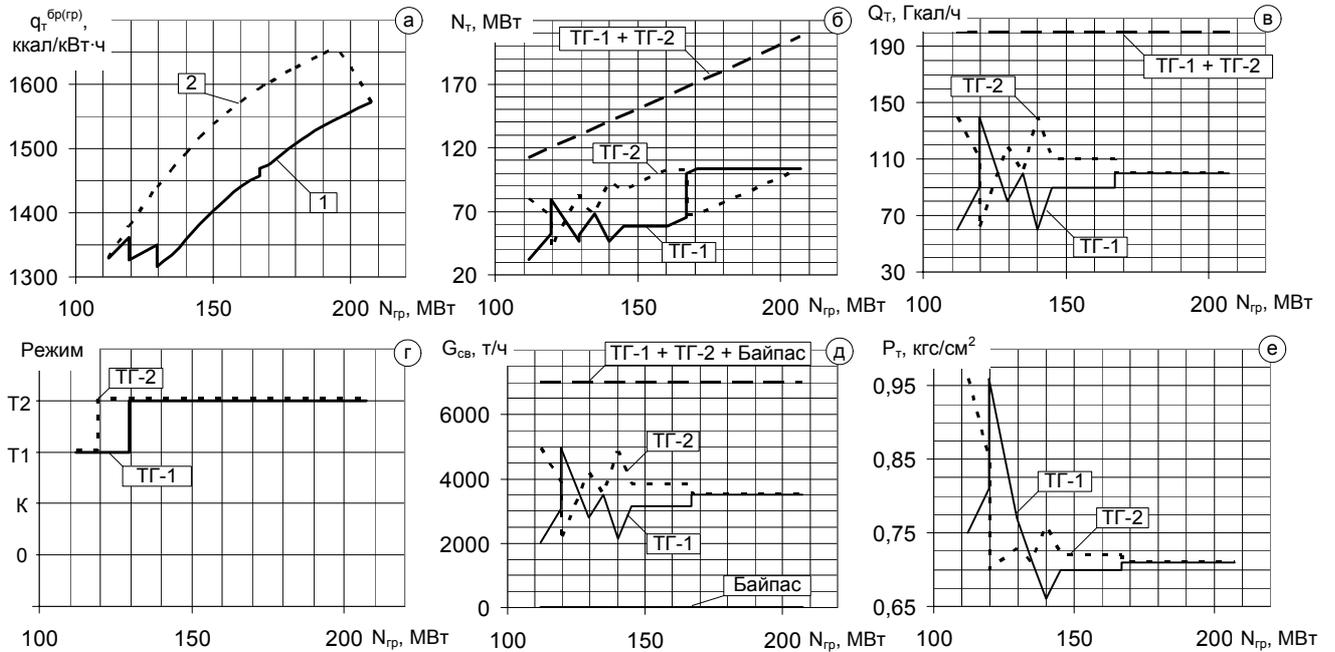


Рис. 4. Результаты оптимизации (суммарная тепловая нагрузка теплофикационных установок $Q_c = 200$ Гкал/ч): см. пояснения к рис. 2 и 3

Если при выполнении расчетов исключить возможность пропуска сетевой воды по байпасу, то расход сетевой воды через сетевые подогреватели турбин возрастет и расчетное давление пара в камерах регулируемых отборов будет меньше минимально допустимого, даже для режима с одноступенчатым подогревом сетевой воды турбоагрегатами. В таком случае заданные графики отпуска тепловой и электрической энергии можно обеспечить лишь при подогреве сетевой воды в пиковом бойлере (или другом стороннем источнике) и работе одного или двух турбоагрегатов в конденсационном режиме. При этом эффективность работы группы заметно ухудшится.

Таким образом, при повышенной циркуляции сетевой воды в тепловой сети и относительно малых тепловых нагрузках с горячей водой целесообразно использовать регулируемый байпас теплофикационной установки ТЭЦ для расширения регулировочных диапазонов изменения тепловой и электрической нагрузок, в которых возможна практическая реализация оптимальных режимов работы генерирующего оборудования. Такие режимы характерны для летнего периода работы многих ТЭЦ с закрытыми тепловыми сетями (Владимирская ТЭЦ-2, Ивановская ТЭЦ-3, Саранская ТЭЦ-2 и др.).

Для определения оптимального расхода сетевой воды через байпас теплофикационной установки ТЭЦ не требуется проведения оптимизационного расчета, что существенно сокращает затраты машинного времени на выполнение оптимизации распределения нагрузок между турбоагрегатами. Указанный расход может быть получен по специально разрабатываемой для каждого турбоагрегата диаграмме (рис. 5). Диаграммы разрабатываются для ряда значений температуры сетевой воды на входе в теплофикационную установку отдельно для режимов с одноступенчатым и двухступенчатым подогревом сетевой воды.

На диаграмме (рис. 5) можно видеть рабочую область турбоагрегата и его теплофикационной установки, а также область эффективного использования байпаса теплофикационной установки. Если на некоторой итерации оптимизационного расчета режима работы турбоагрегата известна планируемая тепловая нагрузка теплофикационного отбора Q_{Ti} и расход сетевой воды $G_{св i}$, который теоретически может быть подан в теплофикационную установку данной турбины, по диаграмме могут быть определены оптимальные значения расходов сетевой воды через подогреватели $G_{ТФУ i}$ и через байпас $G_{Б i}$. Суммирование $G_{Б i}$ по каждому работающему турбоагрегату позволяет определить общий расход сетевой воды по байпасу для ТЭЦ в целом.

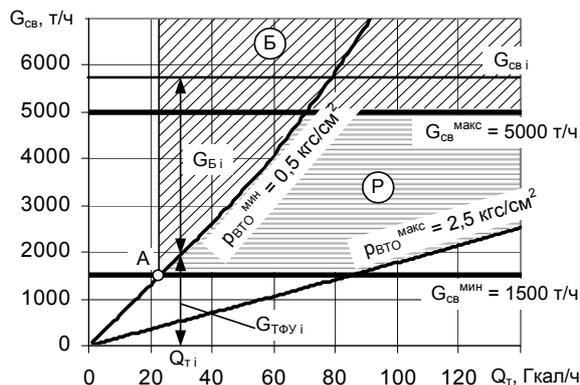


Рис. 5. Диаграмма определения оптимального расхода сетевой воды по байпасу теплофикационной установки турбины Т-100/120-130 (температура обратной сетевой воды $t_2 = 70^\circ\text{C}$, двухступенчатый подогрев сетевой воды): Q_T – тепловая нагрузка теплофикационного отбора, Гкал/ч; $G_{св}$ – расход сетевой воды на теплофикационную установку турбоагрегата, т/ч; $p_{вто}$ – давление пара в камере верхнего теплофикационного отбора, кгс/см²; $G_{ТФУ}$ – оптимальный расход сетевой воды через подогреватели теплофикационной установки, т/ч; $G_{Б}$ – расход сетевой воды через байпас теплофикационной установки, т/ч; P – рабочая область турбоагрегата и его теплофикационной установки; B – область целесообразного использования байпаса теплофикационной установки; A – режим, соответствующий минимально возможной тепловой нагрузке теплофикационного отбора пара

Область оптимального использования режимов работы теплофикационной установки с байпасированием сетевой воды ограничена минимально допустимой тепловой нагрузкой регулируемого отбора пара турбоагрегата – режим, соответствующий точке A на диаграмме (рис. 5). Значение этой нагрузки определяется значениями $p_{вто}^{мин}$ (или $p_{нто}^{мин}$ для режима работы с одноступенчатым подогревом сетевой воды), $G_{св}^{мин}$, t_2 и режимом подогрева сетевой воды (одно- или двухступенчатый) (рис. 6). Первые два показателя при этом определяют тип турбоагрегата.

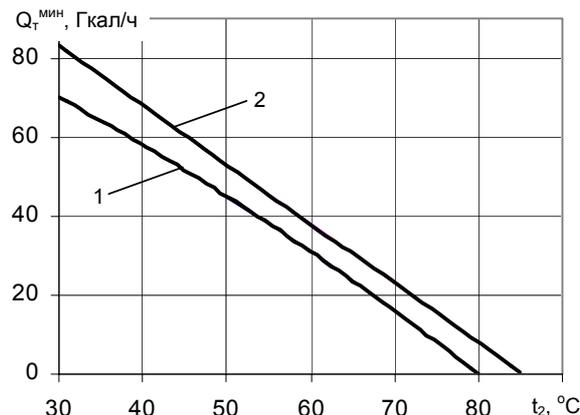


Рис. 6. Зависимость минимально допустимой тепловой нагрузки теплофикационного отбора пара турбины Т-100/120-130 ($Q_T^{мин}$, Гкал/ч) от температуры сетевой воды на входе в теплофикационную установку (t_2 , $^\circ\text{C}$): 1 – одноступенчатый подогрев сетевой воды; 2 – двухступенчатый подогрев сетевой воды

Используя зависимости, аналогичные представленным на рис. 6, можно заранее определить, возможен ли режим работы теплофикационной установки каждого турбоагрегата с байпасированием сетевой воды, т. е. выполняется ли условие $Q_{T1} > Q_{T \text{ мин}}(t_2)$.

Необходимо отметить, что при увеличении температуры сетевой воды на входе в теплофикационную установку турбоагрегата линии $p_{\text{ВТО}}^{\text{мин}}$ и $p_{\text{ВТО}}^{\text{макс}}$ (или $p_{\text{НТО}}^{\text{мин}}$ и $p_{\text{НТО}}^{\text{макс}}$ для режима работы с одноступенчатым подогревом сетевой воды) (рис. 5) смещаются влево. Это обстоятельство позволяет рекомендовать еще один способ расширения регулировочных диапазонов изменения тепловых и электрических нагрузок ТЭЦ, в которых возможна практическая реализация оптимальных режимов работы турбоагрегатов, – рециркуляцию горячей сетевой воды на вход в нижний сетевой подогреватель теплофикационной установки (например, на всас сетевого насоса). Покажем это на примере.

Предположим, рассматривается режим работы оборудования ТЭЦ при температуре обратной сетевой воды 50 °С (рис. 7). По результатам оптимизационного расчета турбоагрегатов станции выявлено, что оптимальному режиму работы данной турбины соответствует значение тепловой нагрузки теплофикационного отбора Q_{T1} . Анализ диаграммы (рис. 7) показывает, что при заданном значении температуры сетевой воды на входе в теплофикационную установку такой режим не реализуем. Поскольку расход сетевой воды через сетевые подогреватели много меньше максимально допустимого значения, существует возможность увеличения этого расхода и организации рециркуляции горячей сетевой воды на вход нижнего сетевого подогревателя. В этом случае границы регулировочного диапазона турбоагрегата смещаются и режим работы с оптимальным значением тепловой нагрузки становится реализуемым.

Необходимо учитывать, что при организации рециркуляции сетевой воды с выхода теплофикационной установки на вход нижнего сетевого подогревателя давление пара в камере теплофикационного отбора также увеличивается. Это обусловлено увеличением температурного напора (недогрева сетевой воды до температуры насыщения) подогревателя из-за увеличения расхода сетевой воды. Увеличение давления пара в камере регулируемого отбора, в свою очередь, снижает экономичность работы турбоагрегата. В связи с этим целесообразно организовать рециркуляцию сетевой воды с выхода пикового бойлера, поскольку при этом для увеличения температуры сетевой воды перед нижним сетевым подогревателем теплофикационной установки требуется (при нахождении пикового бойлера в работе) меньшее приращение расхода сетевой

воды. В этом случае увеличение давления пара теплофикационного отбора также будет меньше.

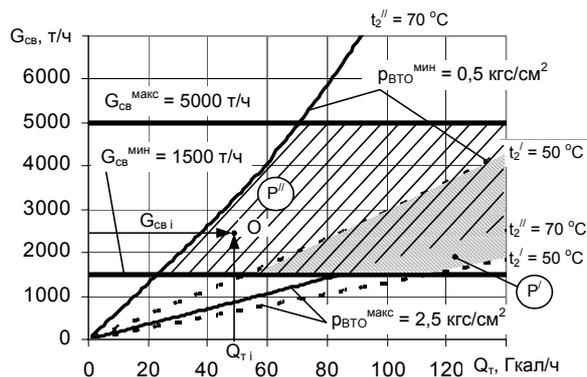


Рис. 7. К обоснованию целесообразности использования рециркуляции сетевой воды для теплофикационной установки турбины Т-100/120-130 (двухступенчатый подогрев сетевой воды, температуры обратной сетевой воды $t_2' = 50$ °С и $t_2'' = 70$ °С): О – точка, соответствующая оптимальному режиму работы турбоагрегата; P' и P'' – рабочая область турбоагрегата и его теплофикационной установки при значениях температуры сетевой воды на входе в теплофикационную установку соответственно 50 и 70 °С; прочие обозначения – см. пояснения к рис. 5

Несмотря на ухудшение экономичности работы турбоагрегата из-за увеличения давления пара в камере регулируемого отбора и увеличение затрат электроэнергии на привод сетевых насосов, в ряде случаев без применения рециркуляции возникает необходимость кардинального изменения состава или режима работы турбоагрегатов (например, перевод их в конденсационный режим). Экономичность работы ТЭЦ в таком режиме может быть хуже, чем в режиме работы с рециркуляцией сетевой воды.

Таким образом, при относительно малых значениях циркуляции сетевой воды в тепловой сети и малых тепловых нагрузках с горячей водой в ряде случаев эффективно использование рециркуляции сетевой воды для расширения регулировочных диапазонов изменения тепловой и электрической нагрузок, в которых возможна практическая реализация оптимальных режимов работы генерирующего оборудования.

Для определения необходимой степени рециркуляции сетевой воды каждый раз требуется проводить специальный расчет, что несколько снижает быстродействие программного комплекса.

Заключение

Характеристики тепловой сети оказывают существенное влияние на границы регулировочных диапазонов изменения тепловой и электрической мощности ТЭЦ с теплофикационными турбоагрегатами. Невозможность практической реализации расчетных оптимальных режимов работы турбоагрегатов во многих слу-

чаях связана с ограничениями по режиму работы оборудования, участвующего в отпуске тепловой энергии с горячей водой.

Расширение регулировочных диапазонов изменения тепловой и электрической нагрузок ТЭЦ, в которых возможна практическая реализация оптимальных режимов работы генерирующего оборудования, обеспечивается следующими способами:

– использованием регулируемого байпаса теплофикационных установок турбоагрегатов при повышенной циркуляции сетевой воды в тепловой сети и относительно малых тепловых нагрузках с горячей водой;

– применением рециркуляции нагретой сетевой воды на вход в нижние сетевые подогреватели теплофикационных установок турбоагрегатов при относительно малых значениях циркуляции сетевой воды в тепловой сети и малых тепловых нагрузках с горячей водой.

Список литературы

1. **Борисов А.А.** Программный комплекс для оптимального ведения режима работы теплоэлектроцентрали // Вестник ИГЭУ. – 2008. – Вып. 4. – С. 24–27.

2. **Оптимизация** многоступенчатых теплофикационных установок / А.А. Борисов, В.П. Жуков, Г.В. Ледуховский и др. // Вестник ИГЭУ. – 2008. – Вып. 2. – С. 38–41.

Ледуховский Григорий Васильевич,
Ивановский государственный энергетический университет,
кандидат технических наук, ассистент кафедры тепловых электрических станций,
телефон 8-910-698-99-90,
e-mail: lgv83@yandex.ru

Поспелов Анатолий Алексеевич,
Ивановский государственный энергетический университет,
кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций,
телефон 8-910-698-99-87
e-mail: admin@tes.ispu.ru

Зорин Михаил Юрьевич,
Ивановский государственный энергетический университет,
кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций,
телефона: 8-910-698-99-86
e-mail: admin@tes.ispu.ru

Борисов Антон Александрович,
Ивановский государственный энергетический университет,
аспирант кафедры прикладной математики,
телефон 8-910-698-99-89,
e-mail: borisov_ant@mail.ru

