
ТЕПЛОФИКАЦИЯ
И ТЕПЛОВЫЕ СЕТИ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АККУМУЛИРУЮЩИХ СВОЙСТВ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ И ЗДАНИЙ ДЛЯ РАСШИРЕНИЯ РЕГУЛИРОВОЧНОГО ДИАПАЗОНА ПО ОТПУСКУ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ТЭЦ

© 2021 г. Р. З. Аминов^а, *, Е. Ю. Бурденкова^а, **, А. Б. Москаленко^а, ***

^аСаратовский научный центр Российской академии наук, Политехническая ул., д. 77, г. Саратов, 410054 Россия

*e-mail: oepnan@inbox.ru

**e-mail: lena.burdenkova@yandex.ru

***e-mail: Aleksandr.moskalenko1@gmail.com

Поступила в редакцию 03.04.2020 г.

После доработки 12.10.2020 г.

Принята к публикации 21.10.2020 г.

В связи с дефицитом маневренных мощностей и увеличением доли АЭС в европейской части России уже сегодня требуется разгрузка теплоэлектростанций в период спада электропотребления. При регулировании электрической нагрузки в часы пик возникает необходимость дополнительно увеличивать электрическую мощность энергоблоков, а в ночной период ее снижать. Существующие способы повышения мощности теплоэлектростанций имеют ряд существенных недостатков. Снижение электрической мощности в отопительный период, как правило, ограничено загрузкой теплофикационных отборов. В данной работе показана возможность увеличения регулировочного диапазона по отпуску электроэнергии на ТЭЦ благодаря использованию аккумуляющих свойств тепловых сетей и зданий и соответствующему изменению режимов работы теплофикационной установки. Рассмотрено несколько вариантов (режимов) работы теплофикационной установки. Проведенные расчеты показали, что учет аккумуляющих свойств тепловых сетей и зданий позволяет ночью, разгрузив ТЭЦ по электроэнергии, увеличить выработку тепловой энергии, чтобы в дневной период, разгрузив ее по теплу, повысить выработку электроэнергии. Важным фактором теплоснабжения зданий является соблюдение комфортных условий в помещении. Оптимальный температурный диапазон для жилых помещений в холодный период года составляет 20–22°C. Обеспечение комфортных условий в помещении подтверждается данными расчета температуры воздуха внутри помещения по предложенной ранее авторами методике с учетом аккумуляющих свойств тепловых сетей и зданий. Температура воздуха в помещении к концу процесса разряда, т.е. расхода аккумулированного тепла, снижается примерно до 19°C, таким образом, она не выходит за пределы допустимого диапазона. Следует отметить, что это происходит в основном благодаря аккумуляющим свойствам зданий. Материал трубопроводов магистральных тепловых сетей обладает низкой аккумуляющей способностью, т.е. их стенки очень быстро отдают тепло воде, которая поступает в трубопровод с более низкой, чем у них, температурой. Но благодаря большой протяженности трубопроводов тепловой сети в начальный период времени после температурного возмущения на источнике температура прямой сетевой воды, поступающей к потребителю, остается постоянной.

Ключевые слова: аккумулярование тепла, теплофикационная установка, пиковый водогрейный котел, прямая сетевая вода, регулировочный диапазон, схема теплоснабжения

DOI: 10.1134/S0040363621050039

Суточные графики потребления электрической энергии крайне неравномерны, что обусловлено ростом бытовых нагрузок и уменьшением числа предприятий, работающих в ночное время. Вследствие дефицита маневренных мощностей и увеличения доли АЭС в европейской части России уже сегодня требуется разгрузка теплоэлектростанций (ТЭЦ) в период спада электропотребления

(ночное время). Для ТЭЦ режим работы по тепловому графику является наиболее экономичным. При работе по нему с постоянным минимальным пропуском пара в конденсатор электрическая нагрузка определяется потреблением тепла, уменьшаются потери тепла с циркуляционной водой, что повышает экономичность турбины. Если поворотная диафрагма нижнего теплофикационного

отбора закрыта, турбина превращается в противодавленческую и пар в конденсатор пропускается через зазоры поворотной диафрагмы в минимальном количестве, необходимом для охлаждения ее последних ступеней [1]. Электрическую мощность турбины в классической тепловой схеме нельзя снизить ниже той, которая создается с помощью теплофикационного потока пара, и повысить выше той, которая вырабатывается максимальным конденсационным потоком пара, т.е. при увеличении расхода свежего пара вплоть до максимального [2].

В условиях рыночных отношений в электроэнергетике введение дифференцированных тарифов на электроэнергию становится экономическим стимулом для разгрузки генераторов в период спада электропотребления. В пределах такое изменение тарифов может повторять конфигурацию графика электропотребления. В том случае, когда отпускной тариф оказывается ниже себестоимости производимой электроэнергии, становится оправданной разгрузка турбоагрегата. В противном случае производство электроэнергии будет убыточным. В условиях ограниченного регулировочного диапазона электрической мощности на многих ТЭЦ выработка электроэнергии уже стала убыточной. Свои убытки они вынуждены компенсировать повышением тарифов на отпускаемое тепло. Это удается сделать благодаря отсутствию рынка в области теплоснабжения.

При регулировании электрической нагрузки в часы пик возникает необходимость дополнительно увеличивать электрическую мощность энергоблоков следующими способами:

увеличением паропроводительности котла сверх номинального значения;

повышением начальных параметров пара в пределах допустимых значений;

отключением части регенеративных подогревателей питательной воды;

организацией питания котла с помощью электронасоса и отключением турбонасоса с прекращением подачи пара в турбопривод;

увеличением расхода пара через цилиндры среднего (ЦСД) и низкого (ЦНД) давления путем впрыска питательной воды в промежуточный пароперегреватель при соблюдении допустимых температур вторичного пара.

Отключение всех подогревателей высокого давления (ПВД) может обеспечить увеличение расхода пара в ЦСД и ЦНД на 18–20%, что приводит к повышению давления по ступеням турбины и росту изгибающих напряжений в направляю-

щих и рабочих лопатках и дисках. Получение пиковой мощности путем увеличения начальных параметров пара не находит широкого применения, так как предельные температура и давление ограничены возможностью достижения предела прочности металла. Повышение температуры пара на 10°C обычно с одновременным увеличением давления обеспечивает прирост мощности на 1.2–1.5% для оборудования докритического давления [3]. Получение дополнительной мощности на ТЭЦ возможно благодаря внедрению обособленных технологических мероприятий. Проблема совершенствования технологий производства, транспортирования и распределения тепловой энергии вошла в число наиболее актуальных, что отражается в большом числе публикаций по данной тематике [4–9].

В работе [9] приведены результаты внедрения и освоения режимов работы турбин с глубокой разгрузкой по тепловой и электрической мощности на примере Минской ТЭЦ-4 и Гомельской ТЭЦ-2. Предложена методика ограничения тепловой нагрузки с использованием теплоаккумулирующей способности тепловых сетей и зданий, которая является эффективным способом выработки дополнительной энергии генератором турбины (при этом суточный отпуск тепла от ТЭЦ остается постоянным). Достоверность полученных аналитических зависимостей была подтверждена экспериментально снижением температуры прямой сетевой воды в теплосети № 6 Приаргунской ТЭЦ ОАО ТГК-14.

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ РЕГУЛИРОВОЧНОГО ДИАПАЗОНА ПО ОТПУСКУ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

В данной работе рассмотрены вопросы расширения регулировочного диапазона по отпуску электроэнергии на ТЭЦ (увеличение максимальной и снижение минимальной нагрузок) на основе использования аккумуляющих свойств тепловых сетей и отапливаемых зданий. В работах [10–12] представлены данные по аккумуляющим свойствам тепловых сетей и зданий. Использование аккумуляющих свойств трубопроводов тепловой сети (прямых и обратных) и зданий позволяет изменять потребляемую тепловую мощность в системе теплоснабжения в течение суток.

На рис. 1 показаны схемы теплоснабжения турбоустановки с турбиной Т-100-12.8. В схеме на рис. 1, а для аккумулярования тепла ночью в верхние сетевые подогреватели направляется свежий пар через редукционно-охладительную установку (РОУ), при этом отбор 6 из ЦСД отключа-

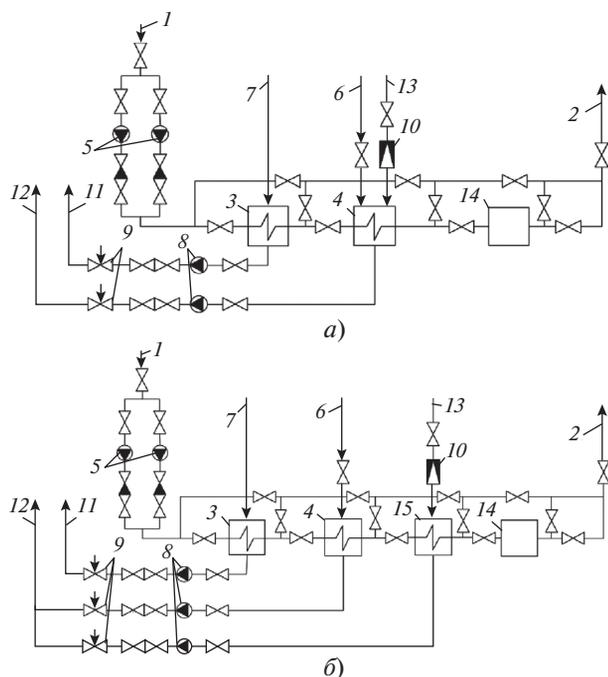


Рис. 1. Схема теплоснабжения турбоустановки Т-100-12.8 без ДБУ (а) и с ДБУ (б).

1, 2 – обратная и прямая сетевая вода; 3, 4 – сетевой подогреватель СП1 и СП2; 5 – сетевой насос; 6, 7 – пар из отборов 6 и 7 ЦСД; 8 – дренажный насос; 9 – регулирующий клапан; 10 – РОУ; 11 – в линию основного конденсата между подогревателями низкого давления ПНД-5 и ПНД-6; 12 – в линию основного конденсата между ПНД-6 и ПНД-7; 13 – дросселируемый свежий пар в голову турбины; 14 – пиковый водогрейный котел (ПВК); 15 – ДБУ

ется. В схеме на рис. 1, б с этой же целью свежий пар через РОУ направляется в дополнительную бойлерную установку (ДБУ), при этом отбор б из ЦСД также отключается.

Далее рассмотрены режимы загрузки и разгрузки системы теплоснабжения теплофикационной установки (ТФУ) на базе Т-100-12.8 для четырех вариантов увеличения регулировочного диапазона по отпуску электроэнергии.

В варианте 1 ТФУ недогружена по теплу, максимально возможная по условиям эксплуатации температура прямой сетевой воды не достигнута. Ночью отключаются нижние и верхние сетевые подогреватели, включаются ДБУ и ПВК. Днем включается только нижний сетевой подогреватель.

Вариант 2 аналогичен варианту 1. Отличие состоит в том, что ночью ПВК не включается.

В варианте 3 ТФУ загружена по теплу, ПВК включен. Максимально возможная по условиям эксплуатации температура прямой сетевой воды достигнута. Ночью отключаются нижние и верхние сетевые подогреватели. Включаются резерв-

ный сетевой насос и ДБУ, увеличивается мощность ПВК. Днем включается только нижний сетевой подогреватель.

Вариант 4 аналогичен варианту 3. Отличие состоит в том, что ночью мощность ПВК не повышается.

Следует отметить, что в тепловых сетях могут присутствовать потребители, у которых теплофикационный режим полностью автоматизирован. С повышением температуры теплоносителя автоматически уменьшается его расход при неизменной температуре наружного воздуха. Однако в этом случае отсутствуют какие-либо технологические ограничения возможной настройки оборудования у потребителей таким образом, чтобы аккумулировать тепло в зданиях и сооружениях в ночные часы. Также наблюдается тенденция, когда в административных зданиях происходит переход на собственное суточное регулирование теплоснабжения со снижением потребления тепла и температуры в помещениях в ночное время. В этих случаях может произойти некоторое увеличение суточного потребления тепла. Вопросы оптимизации режимов использования тепла такими потребителями потребуют дополнительного изучения, и тариф на тепло благодаря достигнутой экономии на ТЭЦ может быть снижен.

Необходимо добавить, что возможны аномальные колебания температуры наружного воздуха в течение одних суток, а также прохождение различных атмосферных фронтов, которые приведут к быстрому изменению температуры окружающей среды. Как правило, такие явления сопровождаются снижением температуры наружного воздуха в ночные часы. Использование аккумулирующих свойств системы теплоснабжения в этих случаях приводит к сглаживанию колебаний температуры воздуха внутри отапливаемых помещений, что благоприятно сказывается на показателях их комфортности.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА И ИХ АНАЛИЗ

Расчеты параметров ТФУ были выполнены в соответствии с диаграммой режимов работы турбоустановки с турбиной Т-100-12.8 и ее техническими характеристиками [13, 14] с применением основ теории теплообмена [15] и методов расчета теплофикационного оборудования ТЭЦ [16]. Продолжительность ночного периода была принята равной 8 ч.

На рис. 2 представлено изменение общей тепловой мощности ТФУ Q в течение суток для всех вариантов. Из данных рис. 2 видно, что в режиме

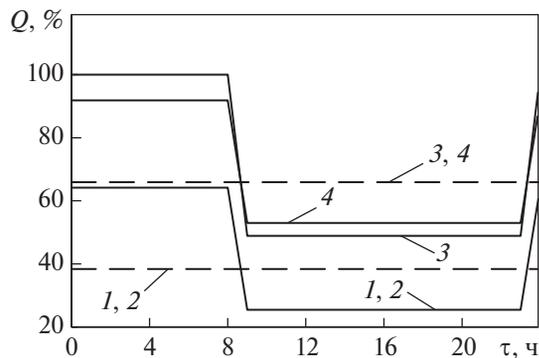


Рис. 2. Зависимость общей тепловой мощности ТФУ от времени в течение суток. Режим: сплошная линия — с аккумуляцией; штриховая линия — без аккумуляции. Номера кривых соответствуют номерам вариантов

без аккумуляции тепла мощность ТФУ составляет 38.38% для вариантов 1, 2, 65.92% для вариантов 3, 4 (за 100% принят максимальный часовой расход тепла на отопление при расчетной температуре наружного воздуха).

В режиме с аккумуляцией в вариантах 1, 2 общая тепловая мощность ТФУ ночью составляет 64.16% благодаря дросселированию свежего пара в ДБУ и включению ПВК, днем она снижается до 25.5%, так как включен только нижний сетевой подогреватель. Тепловая мощность нижнего сетевого подогревателя в этих вариантах увеличивается на 37.04%. В этом режиме в варианте 3 общая тепловая мощность ТФУ ночью равна 100.0%, в варианте 4 — 91.85%, днем в варианте 3 она снижается до 48.88%, в варианте 4 — до 52.96%. Тепловая мощность нижнего сетевого подогревателя увеличивается в вариантах 1, 2 на 32.04%, в варианте 3 на 15.21%, в варианте 4 на 36.42%.

На рис. 3 представлено суточное изменение расхода пара из котла D_k и в голову турбины D_t для всех вариантов. Из рис. 3 следует, что в режиме без аккумуляции для всех вариантов расход пара из котла составляет ночью 393.23 т/ч, днем повышается до 460.0 т/ч для увеличения выработки электроэнергии. В режиме с аккумуляцией расход пара из котла ночью составляет 303.09 т/ч для варианта 1, 460.0 т/ч для вариантов 2–4. Расход пара в голову турбины для всех вариантов ночью в режиме без аккумуляции равен 393.23 т/ч, в режиме с аккумуляцией — 97.0 т/ч за счет направления большей части пара из котла в ДБУ, днем он одинаков для всех вариантов во всех режимах и составляет 460.0 т/ч.

В режиме без аккумуляции электрическая мощность турбины $N_э$ для всех вариантов составля-

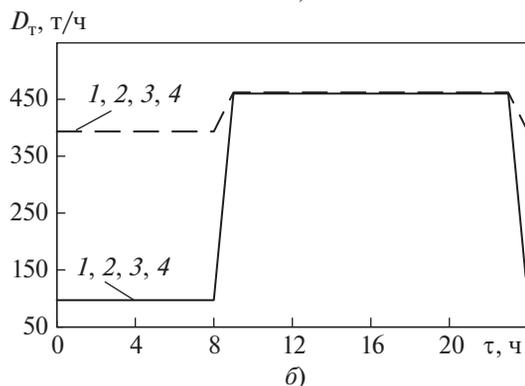
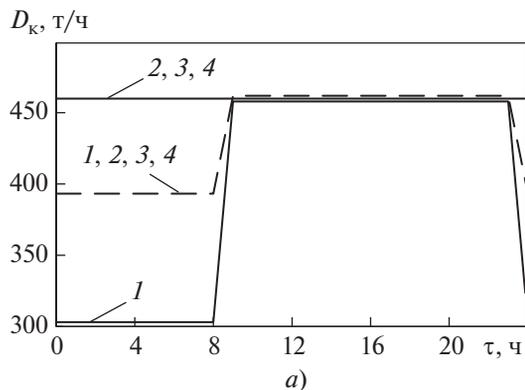


Рис. 3. Зависимость расхода пара из котла (а) и в голову турбины (б) от времени в течение суток. Обозначения см. рис. 2

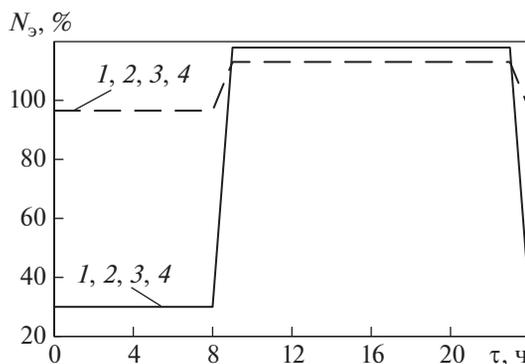


Рис. 4. Зависимость электрической мощности турбины от времени в течение суток. Обозначения см. рис. 2

ет ночью 96.5 МВт, днем повышается до 113.0 МВт благодаря увеличению расхода пара из котла (рис. 4). В режиме с аккумуляцией для всех вариантов вырабатываемая электрическая мощность турбины ночью снижается до 30.0 МВт благодаря дросселированию свежего пара в ДБУ. Днем она повышается для всех вариантов до 117.9 МВт вследствие того, что включен только нижний се-

тевой подогреватель и увеличивается расход пара в конденсатор. Таким образом, регулировочный диапазон вырабатываемой электрической мощности турбины ΔN_3 в режиме без аккумулирования составляет 16.5%, в режиме с аккумулированием – 87.9%.

В настоящее время ТЭЦ работают по пониженному температурному графику, так как открытые системы теплоснабжения, которыми по преимуществу являются системы теплоснабжения ТЭЦ, не обладают соответствующими мощностями по подготовке подпиточной сетевой воды требуемого качества.

В 90-е годы прошлого века вескими причинами, которыми объясняли радикальное снижение проектного температурного графика, считались изношенность тепловых сетей, арматуры и компенсаторов, а также невозможность обеспечить необходимые параметры тепловых источников в связи с неудовлетворительным состоянием теплообменного оборудования. Несмотря на большие объемы ремонтных работ, проводимых постоянно в тепловых сетях и на тепловых источниках в последние десятилетия, эта причина остается актуальной и сегодня для значительной части практически любой системы теплоснабжения [17, 18].

На рис. 5 показано изменение температуры сетевой воды в прямом $t_{пр}$ и обратном $t_{обр}$ трубопроводах в течение суток. В режиме без аккумулирования температура прямой сетевой воды составляет 80°C в вариантах 1, 2 и 100°C в вариантах 3, 4. В режиме с аккумулированием ночью она повышается до 100°C за счет дросселирования свежего пара в ДБУ для всех вариантов, днем снижается до 65°C в вариантах 1, 2, до 86.8°C в варианте 3, до 89.87°C в варианте 4.

Температура сетевой воды в обратном трубопроводе для нестационарного процесса днем может быть рассчитана по формуле [11]

$$t_{обр} = dt_{пр} + et_v + ft_{эл},$$

где t_v – температура воздуха в помещении; $t_{эл}$ – температура сетевой воды после элеватора; d, e, f – коэффициенты, зависящие от характеристик отопительной системы здания.

В режиме без аккумулирования температура сетевой воды в обратном трубопроводе в течение суток не меняется и составляет 50.5°C в вариантах 1, 2 и 52.0°C в вариантах 3, 4. В режиме с аккумулированием ночью температура равна 51.8°C в вариантах 1, 2, 61.0°C в варианте 3 и 60.1°C в варианте 4. Днем средняя температура сетевой воды в обратном трубопроводе составляет 45.85°C в ва-

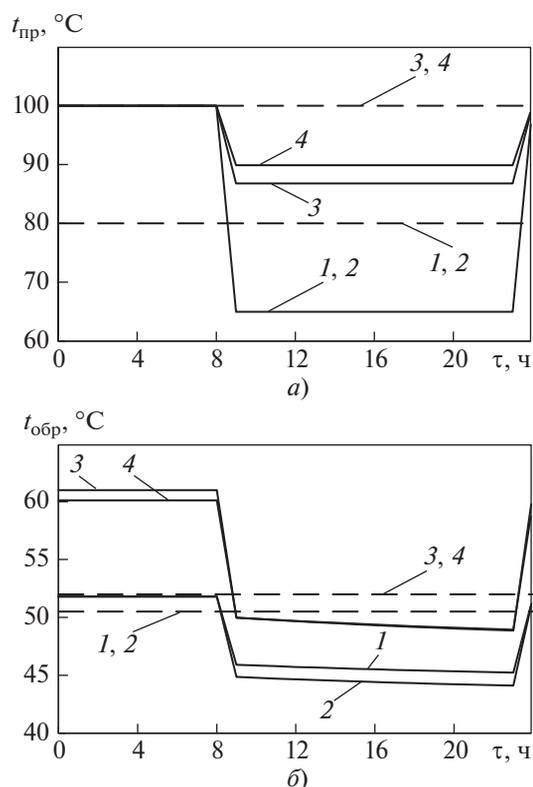


Рис. 5. Зависимость температуры сетевой воды в прямом (а) и обратном (б) трубопроводах от времени в течение суток. Обозначения см. рис. 2

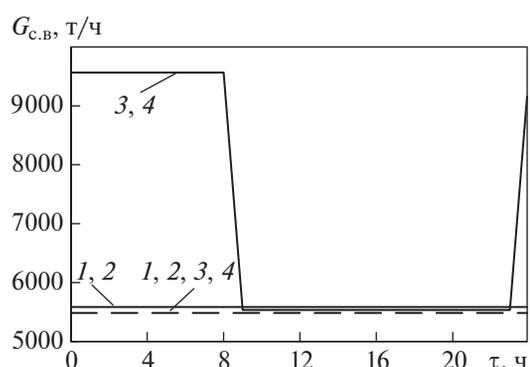


Рис. 6. Зависимость расхода сетевой воды от времени в течение суток. Обозначения см. рис. 2

рианте 1, 44.87°C в варианте 2 и 50.09°C в вариантах 3, 4 (см. рис. 5).

Расход сетевой воды $G_{с.в.}$ в течение суток для всех вариантов в режиме без аккумулирования составляет 5533.57 т/ч (рис. 6). В режиме с аккумулированием он не изменяется в течение суток в

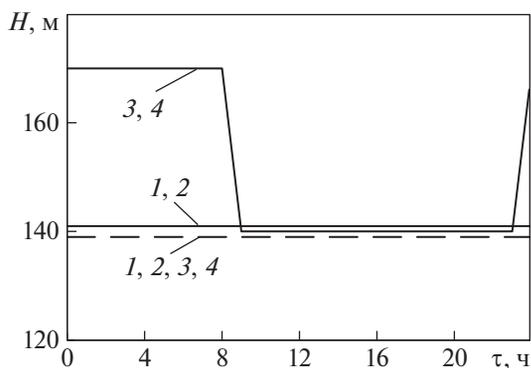


Рис. 7. Зависимость напора сетевой воды от времени в течение суток. Обозначения см. рис. 2

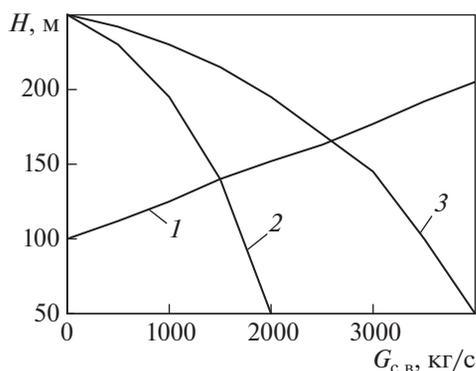


Рис. 8. Характеристики сети (1), сетевого насоса (2) и двух параллельно работающих насосов (3) по данным [19]

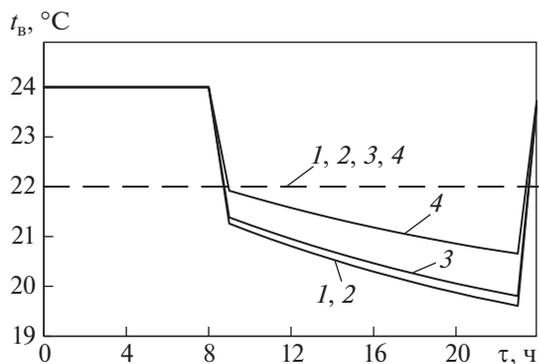


Рис. 9. Зависимость температуры воздуха в помещении от времени в течение суток. Обозначения см. рис. 2

вариантах 1, 2 и увеличивается ночью до 9563.66 т/ч в вариантах 3, 4 благодаря включению резервного сетевого насоса ТФУ.

Напор H , создаваемый сетевым насосом СЭ-5000-160 в режиме без аккумуляции, со-

ставляет 140 м для всех вариантов (рис. 7). В режиме с аккумуляцией ночью напор увеличивается до 170 м в вариантах 3, 4, так как подача каждого насоса в отдельности снижается (рис. 8).

В таблице приведены данные расчетов параметров режима работы ТФУ.

Важным фактором теплоснабжения зданий является соблюдение комфортных условий в помещении. Допустимая температура для жилых помещений в зимний период года составляет 18–24°C (для домов инвалидов и престарелых 20–24°C), оптимальным для этого периода является диапазон 20–22°C [20]. Температура воздуха в помещении t_b при нестационарном процессе может быть рассчитана по формуле [11]

$$t_b = (1 - k_1 A) C_1 e^{k_1 \tau} + (1 - k_2 A) C_2 e^{k_2 \tau} + c,$$

где k_1, k_2 – корни характеристического уравнения; C_1, C_2 – постоянные, получающиеся при решении характеристического уравнения; A – коэффициент, зависящий от технических характеристик конструкций, ограждающих здание; c – коэффициент, зависящий от технических характеристик конструкций, ограждающих здание, а также от расхода и температуры сетевой воды в прямом и обратном трубопроводах и температуры наружного воздуха.

Результаты расчетов температуры воздуха внутри помещения представлены на рис. 9. Для расчетов принято здание с коэффициентом аккумуляции равным 50 ч. Из данных рис. 9 видно, что температура воздуха в помещении в конце суток снижается до примерно 19°C, т.е. не выходит за пределы допустимого диапазона. Следует отметить, что это происходит в основном благодаря аккумуляционным свойствам здания. Материал трубопроводов магистральных тепловых сетей обладает низкой аккумуляционной способностью, т.е. их стенки очень быстро отдают тепло воде, которая поступает в трубопровод с более низкой, чем у них, температурой. Но благодаря большой протяженности трубопроводов тепловой сети после температурного возмущения на источнике продлевается время, в течение которого температура прямой сетевой воды, поступающей к потребителю, сохраняется постоянной. Для стальных трубопроводов тепловых сетей протяженностью 4 км и внутренним диаметром 1192 мм с двумя слоями изоляции время, когда температура прямой сетевой воды не изменяется после температурного возмущения на источнике, составляет около 1 ч при скорости ее движения 1.0 м/с.

Значения параметров режима работы ТФУ

Параметр	Без аккумулирования тепла		С аккумулированием тепла	
	ночь	день	ночь	день
Вариант 1				
Q , %	38.38	38.38	64.16	25.5
D_K , Т/ч	393.23	460.0	303.09	460.0
D_T , Т/ч	393.23	460.0	97.0	460.0
$N_{Э}$, МВт	96.5	113.0	30.0	117.9
$\Delta N_{Э}$, %	16.5		87.9	
$t_{пр}$, °С	80.0	80.0	100.0	65.0
$t_{обр}$, °С	50.5	50.5	51.8	45.85
$G_{с.в.}$, Т/ч	5533.57			
H , м вод. ст.	140.0			
Вариант 2				
Q , %	38.38	38.38	64.16	25.5
D_K , Т/ч	393.23	460.0	460.0	460.0
D_T , Т/ч	393.23	460.0	97.0	460.0
$N_{Э}$, МВт	96.5	113.0	30.0	117.9
$\Delta N_{Э}$, %	16.5		87.9	
$t_{пр}$, °С	80.0	80.0	100.0	65.0
$t_{обр}$, °С	50.5	50.5	51.8	44.87
$G_{с.в.}$, Т/ч	5533.57			
H , м вод. ст.	140.0			
Вариант 3				
Q , %	65.92	65.92	100.0	48.88
D_K , Т/ч	393.23	460.0	460.0	460.0
D_T , Т/ч	393.23	460.0	97.0	460.0
$N_{Э}$, МВт	96.5	113.0	30.0	117.9
$\Delta N_{Э}$, %	16.5		87.9	
$t_{пр}$, °С	100.0	100.0	100.0	86.8
$t_{обр}$, °С	52.0	52.0	61.0	50.09
$G_{с.в.}$, Т/ч	5533.57	5533.57	9563.66	5533.57
H , м вод. ст.	140.0	140.0	170.0	140.0
Вариант 4				
Q , %	65.92	65.92	91.85	52.96
D_K , Т/ч	393.23	460.0	460.0	460.0
D_T , Т/ч	393.23	460.0	97.0	460.0
$N_{Э}$, МВт	96.5	113.0	30.0	117.9
$\Delta N_{Э}$, %	16.5		87.9	
$t_{пр}$, °С	100.0	100.0	100.0	89.87
$t_{обр}$, °С	52.0	52.0	60.1	50.09
$G_{с.в.}$, Т/ч	5533.57	5533.57	9563.66	5533.57
H , м вод. ст.	140.0	140.0	170.0	140.0

ВЫВОДЫ

1. Учет аккумулирующих свойств тепловых сетей и зданий позволяет разгрузить ТЭЦ в дневной период по теплу в целях увеличения выработки электроэнергии. В ночной период обеспечивается увеличение отпуска тепла путем повышения температуры прямой сетевой воды, если в системе теплоснабжения не достигнуто ее максимально допустимое значение. В том случае, если максимальная температура прямой сетевой воды достигнута, аккумулирование обеспечивается увеличением расхода прямой сетевой воды благодаря включению резервного сетевого насоса. При этом становится возможным снижение электрической мощности вследствие отпуска тепла с помощью дросселирования свежего пара.

2. Регулировочный диапазон по отпуску электроэнергии на ТЭЦ для схемы с турбоустановкой Т-100-12.8 может быть увеличен от 6.4% без аккумулирования до 79.4–90.0% при аккумулировании для рассматриваемых вариантов.

3. Повышение доли АЭС в структуре генерирующих мощностей приводит к необходимости участия в ней тепловых электростанций на органическом топливе, включая ТЭЦ, для покрытия неравномерной части графика электрических нагрузок и увеличения их регулировочного диапазона по отпуску электроэнергии. С одной стороны, использование аккумулирующих свойств систем теплоснабжения ТЭЦ приводит к некоторому снижению выработки электроэнергии на тепловом потреблении, с другой стороны, это обеспечивает прибыль вследствие увеличения выработки дорогостоящей пиковой электроэнергии и снижения ее отпуска в период пониженных тарифов. В каждом конкретном случае итоговая экономическая эффективность таких режимов должна определяться технико-экономическими расчетами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- https://studopedia.net/13_35499_rezhim-raboti-poteplovomu-grafiku.html
- Трухний А.Д., Ломакин Б.В. Теплофикационные паровые турбины и турбоустановки. М.: Изд-во МЭИ, 2017.
- <https://vunivere.ru/work24639/page36>
- Гиршфельд В.Я. Анализ режимов отпуска тепла на отопительной ТЭЦ с учетом неопределенности исходной информации // Теплоэнергетика. 1988. № 8. С. 48–52.
- Панферов В.И. Идентификация тепловых режимов трубопроводных систем // Вестник ЮУрГУ. Сер.: Строительство и архитектура. 2005. № 13 (53). С. 85–90.
- Иванов С.А., Батухтин А.Г., Горячих Н.В. Некоторые методы повышения маневренности ТЭЦ // Теплоэнергетика. 2010. № 10. С. 69–73.
- Гиршфельд В.Я., Князев А.М., Куликов В.Е. Режимы работы и эксплуатация ТЭС: учеб. для вузов. М.: Энергия, 1980.
- Аминов Р.З. Векторная оптимизация режимов работы электростанций. М.: Энергоатомиздат, 1994.
- Яковлев Б.В. Повышение эффективности систем теплофикации и теплоснабжения. М.: Новости теплоснабжения, 2008.
- Аминов Р.З., Бурденкова Е.Ю. Оценка влияния аккумулирующих свойств тепловых сетей на запаздывание температурных изменений у потребителя // Труды Академэнерго. 2016. № 2. С. 38–45.
- Аминов Р.З., Бурденкова Е.Ю. Оценка влияния аккумулирующих свойств отапливаемых зданий на изменение температуры воздуха внутри помещений // Труды Академэнерго. 2018. № 2. С. 45–52.
- Aminov R.Z., Burdenkova E.Yu. Studying of possible operating modes in graphics of electric loads of combined heat and power plants taking into account heat-sink properties of thermal networks // Intern. Multi-Conf. on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon-2019). Vladivostok: IEEE, 2019. P. 1–6.
<https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2019.8934127>
- Типовая нормативная характеристика турбоагрегата Т-100-130. М.: СЦНТИ ОРГРЭС, 1971.
- Бененсон Е.И., Иоффе Л.С. Теплофикационные паровые турбины. М.: Энергоатомиздат, 1986.
- Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М.: Энергоатомиздат, 1981.
- Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. М.: Изд-во МЭИ, 2001.
- Петрущенко В.А. Обоснование пониженного температурного графика регулирования централизованных систем теплоснабжения // Новости теплоснабжения. 2015. № 8. С. 30–37.
- Тихомиров А.К. Теплоснабжение района города: учеб. пособие. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2006.
- Наладка и эксплуатация водяных тепловых сетей: справ. / В.И. Манюк, Я.И. Каплинский, Э.Б. Хиж, А.И. Манюк, В.К. Ильин. М.: Стройиздат, 1988.
- ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. М.: Стандартиформ, 2013.

The Use of the Heat-Accumulation Properties of Heat-Supply Networks and Buildings for the Extension of the Electric Power Output Control Range at Combined Heat and Power Plants

R. Z. Aminov^{a, *}, E. Yu. Burdenkova^{a, **}, and A. B. Moskalenko^{a, ***}

^a Saratov Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Saratov, 410054 Russia

*e-mail: oepnan@inbox.ru

**e-mail: lena.burdenckova@yandex.ru

***e-mail: Aleksandr.moskalenko1@gmail.com

Abstract—As a result of the lack of flexible capacities and an increase in the fraction of nuclear power plants in European Russia, the combined heat and power (CHP) plants currently need offloading during the off-peak hours of electric power demand. The adjustment of electric power demand necessitates additionally increasing the electric power of the power-generating units in the on-peak hours and decreasing it at nighttime. The existing methods for increasing the power of combined heat and power plants suffer from a number of serious drawbacks. The reduction in the electric power in the heating period is restricted, as a rule, by high heat demand. In this work, we show the possibility of extending the control range of the electric power output at CHP plants through the use of the heat-accumulation properties of the heat-supply networks and buildings and, accordingly, through the changeover of the operating modes of the cogeneration plant. Several operating-mode variants of the cogeneration plant are considered. The calculations conducted show that the consideration of the heat-accumulation properties of the heat-supply networks and buildings allows, having reduced the electric output of the CHP plant at nighttime, for an increase in the thermal output to increase the electric output in the day reducing the thermal output. An important requirement for the heat supply to buildings is the maintenance of comfortable indoor conditions. The optimal permissible temperature range for living space in the cold period of the year is 20–22°C. The possibility of ensuring the comfortable conditions indoors is confirmed by the calculations of the indoor air temperature by the method previously proposed by the authors that considers the heat-accumulation properties of the heat-supply networks and buildings. The indoor air temperature decreases by the end of the discharge period, i.e., the time when the accumulated heat has been consumed, to approximately 19°C; consequently, it does not go down below the permissible range. It should be noted that this is predominantly due to the heat-accumulation properties of the buildings. The material of the main heating system pipelines has a low accumulation capacity, i.e., the pipe walls transfer heat rapidly to the water that enters the pipeline at a temperature lower than that of the pipes. However, due to the considerable length of the heat system's pipelines, the temperature of the heating-system water that arrives at the consumer remains constant at the time moment after the temperature perturbation on the heat source.

Keywords: heat accumulation, cogeneration plant, peak hot-water boiler, supply heating-system water, control range, heat-supply system layout

Свидетельство о регистрации средства массовой информации
 ПИ № ФС77-79408 от 27 ноября 2020 г., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи,
 информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Подписано к печати 10.12.2019 г.

Формат 60 × 88¹/₈

Тираж 301 экз.

Усл. печ. л. 9.53

Дата выхода в свет 28.02.2020 г.

Уч.-изд. л. 9.75

Цена свободная

Учредители: Российская академия наук,
 Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»

Издатель: ООО «ТЕМАТИЧЕСКАЯ РЕДАКЦИЯ»,
 125252, г. Москва, ул. Зорге, д. 19, этаж 3, помещ. VI, комн. 44
 Отпечатано в типографии «Book Jet» (ИП Коняхин А.В.),
 390005, г. Рязань, ул. Пушкина, 18, тел. (4912) 466-151