

УДК 69.003

DOI: 10.22213/2410-9304-2023-1-33-44

## Энергоэффективные решения при проектировании, строительстве, эксплуатации тепловых электрических станций и тепловых сетей

Н. Л. Тарануха, доктор экономических наук, профессор,  
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

С. Н. Панков, магистрант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

И. Д. Канаков, магистрант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

*В статье рассматриваются актуальные вопросы, связанные с внедрением энергоэффективных мероприятий в энергетической отрасли России. Осуществлено комплексное изучение и исследование существующего положения в сфере технологических процессов выработки электрической и тепловой энергии тепловых электрических станций (далее ТЭС), транспортирования и распределения энергии в тепловых сетях. Выполнен анализ влияния основного оборудования и параметров рабочей среды на коэффициент полезного действия ТЭС с учетом технологических особенностей и потерь энергии паросилового цикла выработки тепловой и электрической энергии. Рассмотрены основные существующие проблемы и источники потерь энергии в системах теплоснабжения. Приведены рекомендации для внедрения и развития энергоэффективных решений и технологий при проектировании, строительстве и эксплуатации ТЭС и тепловых сетей. Предложены к рассмотрению перспективные мероприятия, направленные на обеспечение максимального эффекта энергосбережения, в том числе проектирование и строительство нового или модернизация существующего оборудования ТЭС, внедрение парогазовых энергетических установок, применение частотных приводов ответственных вращающихся механизмов, внедрение систем автоматического либо удаленного ручного управления технологическими процессами, внедрение цифрового производства, в том числе цифровых двойников объектов, цифровых тепловых пунктов и электрических подстанций, установка дополнительных датчиков и приборов учета с внедрением систем мониторинга и предиктивной прогностики оборудования, использования геоинформационных систем с визуализацией пространственных схем и разработкой математических моделей тепловых сетей, проведения полномасштабного инструментального контроля металла ответственных трубопроводов с применением роботизированных комплексов. Приведены практические примеры применения энергоэффективных мероприятий на действующих ТЭС и тепловых сетях.*

**Ключевые слова:** энергоресурсы, энергосбережение, энергоэффективность, ТЭС, тепловые сети.

### Введение

Российская Федерация является одним из крупнейших участников глобального энергетического рынка. Ключевая задача отечественного топливно-энергетического комплекса состоит прежде всего в работе на национальную экономику, на повышение ее конкурентоспособности, на развитие и благоустройство регионов, населенных пунктов, на улучшение качества жизни граждан страны.

Одной из точек роста национальной экономики и обеспечения конкурентоспособности России является ресурсосбережение и применение энергоэффективных технологий [1, 2]. Функционирование и развитие любой отрасли экономики связано с потреблением электрической и тепловой энергии, источником которой являются топливно-энергетические ресурсы. В существенную долю себестоимости продукции, товаров и услуг входят затраты на использованные энергоресурсы. К примеру, рост цен на энергоносители в незначительной степени диктует рост цен на сырье

и строительные материалы, а это ведет к увеличению стоимости строительства [3].

Актуальность проблемы бережного и рационального потребления энергоресурсов и энергосбережения Российской Федерации придает ей уникальное положение в мире по самой большой территории и самому холодному климату: 65 % территории покрыты вечной мерзлотой, основная часть территории страны лежит севернее 50° северной широты. В России самая низкая среднегодовая температура воздуха среди всех стран мира, составляющая  $-5,5$  °С. Для обеспечения жизнедеятельности населения требуется значительное количества тепла и электроэнергии в длительные отопительные периоды. Следует отметить, что основная часть энергии в размере 68 % производится на тепловых электрических станциях (далее ТЭС), сжигающих невозобновляемое углеводородное топливо, как правило природный газ, каменный уголь, сланец, топочный мазут [4]. Именно внедрение и развитие энергоэффективных технологий ТЭС и тепловых

сетей способно принести максимально быстрый и осязаемый результат в масштабах страны.

### Используемые подходы

Целью исследования является разработка рекомендаций для внедрения и развития энергоэффективных решений и технологий при проектировании, строительстве и эксплуатации тепловых электрических станций и тепловых сетей.

Предметом исследования являются внедрение и развитие энергоэффективных технологий при проектировании, строительстве и эксплуатации тепловых электрических станций и тепловых сетей.

### Материалы и методы

Статья сформирована на личном опыте авторов, изучении научных публикаций и действующих нормативно-правовых актов по тематике энергосбережения и энергоэффективности. Выводы авторов выполнены на основе метода системного анализа.

### Исследование сложившейся ситуации в сфере энергоэффективности и ресурсосбережения

Процессы, происходящие при производстве, распределении, потреблении электрической и тепловой энергии, неразрывно взаимосвязаны. Также взаимосвязаны и объединены в единый непрерывный технологический процесс установки по выработке, передаче, распределению и преобразованию электрической и тепловой энергии. Такие объединения называются электроэнергетическими системами и являются составной частью энергетической системы. Энергетическая система представляет из себя совокупность электрических станций, котельных, электрических и тепловых сетей, потребителей, соединенных между собой и связанных общностью режима в непрерывном процессе производства, преобразования, распределения и потребления электроэнергии и теплоты при общем управлении этими режимами (рис. 1) [5].

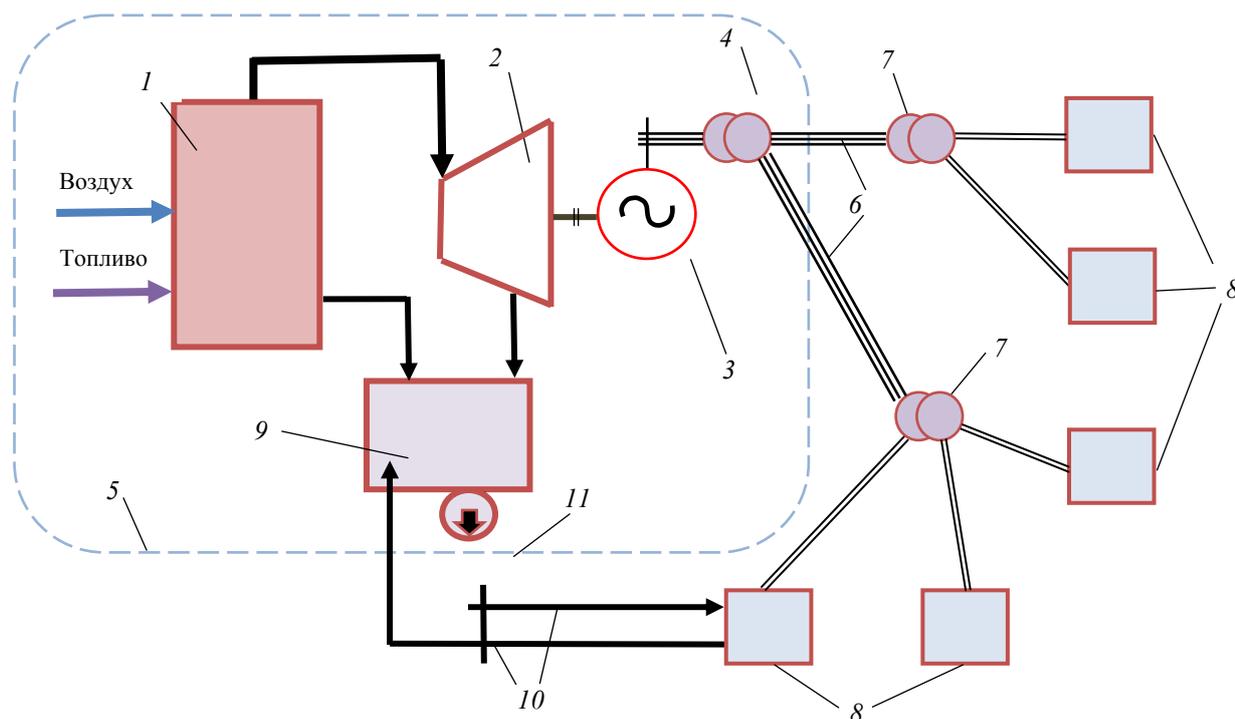


Рис. 1. Схема выработки, передачи, потребления тепловой и электроэнергии: 1 – котлоагрегат; 2 – турбина; 3 – электрический генератор; 4 – трансформатор; 5 – тепловая электрическая станция ТЭС; 6 – линии электропередач; 7 – электрические подстанции; 8 – потребители; 9 – бойлерная тепловых сетей; 10 – тепловые сети; 11 – сетевой насос

Fig. 1. Scheme of generation, transmission, consumption of heat and electricity: 1. Boiler unit; 2. Turbine; 3. Electric generator; 4. Transformer; 5. Thermal power plant of thermal power plant; 6. Power lines; 7. Electrical substations; 8. Consumers; 9. Boiler room of heating networks; 10. Heating networks; 11. Network pump

К основному оборудованию ТЭС, оказывающему базовое влияние на экономичность пароводяного цикла, относятся котлоагрегаты и турбоагрегаты. Основным параметром, харак-

теризующим эффективность работы котлоагрегата, является коэффициент полезного действия КПД, рассчитываемый как соотношение полезной выработанной теплоты к полученной тепло-

те от сжигания топлива. Для парового котла КПД брутто по прямому балансу вычисляется по формуле

$$\eta_{бр} = \frac{Q_{п.г}}{Q_p^p B_{п.г}} \cdot 100.$$

Для водогрейного котла:

$$\eta_{бр} = \frac{Q_{в.к}}{Q_p^p B_{в.к}} \cdot 100,$$

где  $Q_{п.г}$  – полезная мощность парового котла кВт;  $Q_{в.к}$  – полезная мощность водогрейного котла кВт;  $B_{п.г}$ ,  $B_{в.к}$  – расход топлива парового или водогрейного котла кг/с или м<sup>3</sup>/с;  $Q_p^p$  – располагаемая теплота топлива, кДж/кг или кДж/м<sup>3</sup>.

Составление обратного теплового баланса котла заключается в установлении равенства между поступившим в котел количеством тепла, называемым располагаемым теплом  $Q_p$ , и суммой полезно использованного тепла  $Q_1$  и тепловых потерь  $Q_2$ ,  $Q_3$ ,  $Q_4$ ,  $Q_5$  и  $Q_6$ . На основании обратного теплового баланса вычисляются КПД и необходимый расход топлива.

Общее уравнение теплового баланса имеет следующий вид:

$$Q_p = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 \text{ кДж/кг (кДж/м}^3\text{)},$$

где  $Q_2$  – потери с уходящими газами;  $Q_3$  – потери с химическим недожогом топлива;  $Q_4$  – потери с механическим недожогом топлива;  $Q_5$  – потери тепла в окружающую среду;  $Q_6$  – потери тепла шлака. Учитывается при сжигании угля.

Основной вклад в снижение КПД вносят потери тепла с уходящими газами  $Q_2$ . Для организации экономичного режима работы котла с максимальным КПД требуется сокращение потерь с уходящими газами  $Q_2$  за счет:

- снижения температуры уходящих газов;
- снижения объема уходящих газов за счет уменьшения количества подаваемого воздуха для сжигания топлива. Вследствие этого процесса снижается количество остаточного кислорода в уходящих газах, что также благоприятно влияет на технико-экономические и экологические параметры технологического процесса сжигания топлива.

Потери с уходящими газами  $Q_2$  зависят от технического состояния и режима работы котлоагрегата. При достаточном количестве подаваемого в горелочные устройства воздуха и при полном сгорании топлива уходящие дымовые газы содержат основные компоненты – углекис-

лый газ  $CO_2$  и водяные пары  $H_2O$ , инертный газ азот  $N_2$ . При снижении объема подаваемого воздуха для сгорания топлива в какой-то момент в дымовых газах появляется продукт неполного сгорания топлива – угарный газ  $CO$ , вызывающий потери тепла с химическим недожогом  $Q_3$ . Потери тепла с механическим недожогом  $Q_4$  и потери тепла шлака  $Q_5$  характерны для сжигания угля.

Потери  $Q_3$ ,  $Q_4$ ,  $Q_6$  полностью зависят от режима работы котла. Потери тепла в окружающую среду  $Q_5$  зависят от технического состояния ограждающих конструкций котла, в том числе обмуровки и тепловой изоляции топки, газоходов, конвективной шахты, трубопроводов.

Коэффициент полезного действия современных энергетических котлов тепловых электрических станций (далее ТЭС) соответствует лучшим мировым стандартам и составляет 93–94,8 % при сжигании природного газа, 90,5–93,5 % при сжигании мазута, 90,5–92 % при сжигании угля. КПД водогрейных котлов составляет 92–92,5 % при сжигании природного газа, 89–91 % при сжигании мазута.

С точки зрения анализа мероприятий по обеспечению энергоэффективной работы котлоагрегатов с максимальным КПД выделяются основные виды типовых воздействий эксплуатационного и ремонтного характера. Эксплуатационные мероприятия прежде всего направлены на обеспечение оптимального режима работы с минимальными потерями в соответствии с утвержденной режимной картой:

- горение топлива с минимальными коэффициентами избытка воздуха и остаточного содержания кислорода  $O_2$  в дымовых газах;
- обеспечение минимально допустимых потерь тепла с уходящими газами  $Q_2$ ;
- отсутствие химического  $Q_3$  и механического недожога  $Q_4$ ;
- обеспечение оптимального количества тягодутьевых механизмов;
- обеспечение минимального допустимого количества токсичных окислов азота в дымовых газах;
- нагрев поступающей питательной воды в системе регенерации пароводяного цикла до установленных режимной картой значений;
- обеспечение химического состава питательной воды в соответствии с нормативными требованиями для исключения заноса внутренних поверхностей нагрева отложениями.

К типовым ремонтным воздействиям относятся:

– ежегодные вырезки образцов поверхностей нагрева с проведением количественного и качественного химического контроля отложений;

– анализ динамики роста отложений с оценкой эффективности работы водоподготовки и водно-химического режима;

– механические и химические очистки поверхностей нагрева;

– ремонт и замена обмуровки ограждающих конструкций для обеспечения нормативных присосов воздуха и сокращения потерь тепла  $Q_5$ ;

– замена труб поверхностей нагрева.

Отечественные энергетические паровые турбины, выпускающиеся фирмами АО «Уральский турбинный завод», г. Екатеринбург; АО «Силовые машины», г. Санкт-Петербург; ПАО «Калужский турбинный завод», г. Калуга, по нормируемым показателям экономного использования энергии, в частности удельного расхода теплоты брутто и удельного расхода пара на выработку электроэнергии, соответствуют лучшим значениям мирового турбостроения. Требуется отметить, что число стран в мире, выпускающих энергетические паровые турбины по разработанной ими технической документации,

не превышает десяти. Это вызвано сложностью создания проточной части, которая определяется не только высокими требованиями к изготовлению, материалам, монтажу, но главным образом чрезвычайной наукоемкостью: нельзя создать даже посредственную турбину, не обладая академическими знаниями в таких областях науки, как механика, гидрогазодинамика, теория автоматического регулирования, механика разрушения, другие специальные дисциплины [6].

Наибольшее влияние на КПД электростанции оказывает КПД турбоустановки, связанное с фундаментальной особенностью всех термодинамических циклов тепловых двигателей: наличием основной потери теплоты рабочего тела в холодном источнике на конденсацию пара в конденсаторе  $q_2$ . Теплота  $q_2$  передается в конденсаторе турбины циркуляционной воде. Нагретая циркуляционная вода далее охлаждается в специальных водоемах либо градирнях, после чего подается вновь на конденсацию отработанного в турбине пара. Потеря  $q_2$  достигает 45–50 % от общего объема затрачиваемой теплоты пароводяного цикла (рис. 2).

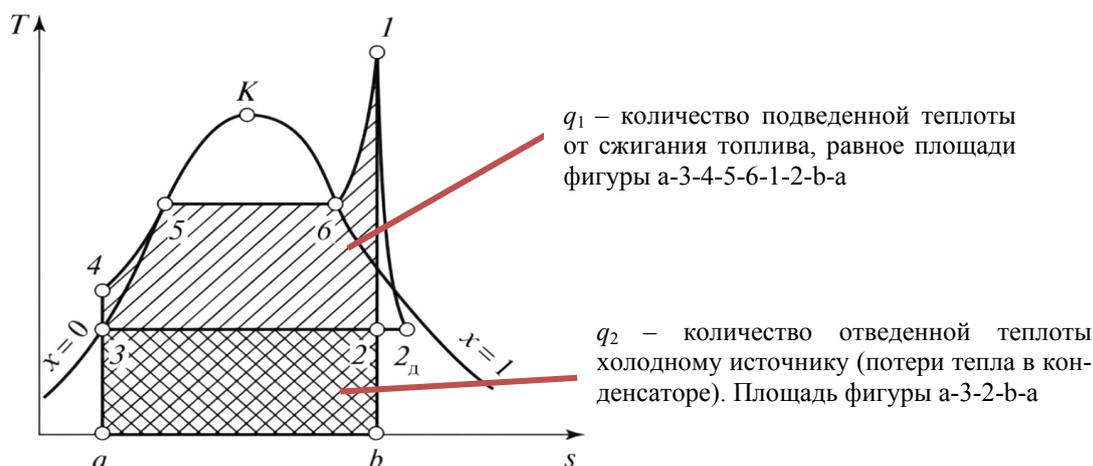


Рис. 2. Простой идеальный пароводяной цикл в TS-диаграмме

Fig. 2. A simple ideal steam-water cycle in the TS diagram

Простой паросиловой цикл включает в себя следующие термодинамические процессы:

«3 – 4» перекачка питательным насосом воды в котлоагрегат;

«4 – 5» нагрев воды в котлоагрегате до температуры кипения (насыщения);

«5 – 6» процесс парообразования воды в котлоагрегате;

«6 – 1» процесс повышения температуры пара в пароперегревателе котлоагрегата;

«1 – 2» процесс расширения пара в турбине с выработкой энергии;

«2 – 3» процесс конденсации пара в конденсаторе с отдачей теплоты циркуляционной воде.

КПД пароводяного цикла рассчитывается по следующей формуле:

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1},$$

где  $q_1$  – количество подведенной теплоты от сжигания топлива, равное площади фигуры a-3-

4-8-6-1-2-b-a;  $q_2$  – количество отведенной теплоты холодному источнику, то есть теплота конденсации пара, переданная в конденсаторе паровой турбины циркуляционной воде. Площадь фигуры 2-3-a-b-2.

Эксплуатационные мероприятия паровых турбин для обеспечения эффективной работы направлены прежде всего на строгую работу в соответствии с режимными картами, приоритетную загрузку теплофикационных отборов с целью нагрева сетевой воды теплосети и сокращения потерь тепла в конденсаторе, поддержание нормативного вакуума в конденсаторе [7]. Ремонтные мероприятия направлены на минимизацию протечек пара в концевых и диафрагменных уплотнениях турбин, обеспечение чистоты проточной части, своевременную замену лопаточного аппарата, ежегодные чистки трубок конденсаторов и сетевых подогревателей.

Коэффициент полезного действия паросиловых ТЭС рассчитывается по формуле

$$\eta_c = \eta_t \eta_{oi} \eta_m \eta_g \eta_{тр} \eta_{п.к.}$$

Принимаем:

$\eta_t = 0,55$  – термический КПД брутто турбоустановки (КПД идеального цикла водяного пара);

$\eta_{oi} = 0,85$  – внутренний относительный КПД турбины, характеризующий степень совершенства проточной части и потери мощности (технической работы) при работе турбины;

$\eta_m = 0,99$  – механический КПД турбины, учитывающий потери мощности за счет механического трения в подшипниковых узлах;

$\eta_g = 0,985$  – электрический КПД генератора, характеризующий степень совершенства генератора с точки зрения преобразования механической энергии вращения ротора в электроэнергию;

$\eta_{тр} = 0,99$  – КПД трубопроводов, учитывающий гидравлические потери пароводяного цикла на регулирование и транспортировку конденсата, питательной воды, перегретого пара;

$\eta_{п.к.} = 0,94$  – КПД котла, характеризующего степень совершенства термодинамических процессов преобразования химической энергии топлива в выработанную энергию перегретого пара.

Таким образом, КПД электростанции составляет 42,4 %.

Реальный КПД действующих паросиловых ТЭС, то есть отношение полезно выработанной тепловой и электрической энергии к потреблен-

ной энергии от сжигания топлива, зависит от режима работы, технического состояния оборудования, вида сжигаемого топлива и составляет порядка 33–44 % [8].

В процессе транспортировки и распределения тепловой энергии доля потерь российских тепловых сетей достигает 20 % при общемировом стандарте потерь 6–7 %.

К основным источникам потерь систем теплоснабжения относятся:

- потери тепловой энергии через некачественную тепловую изоляцию трубопроводов;
- потери теплоносителя (сетевой воды) через неплотности штоков арматуры, уплотнений валов насосов, коррозионные повреждения металла трубопроводов;
- гидравлические потери на транспортировку теплоносителя, затраты электроэнергии на привод сетевых насосов ТЭЦ и перекачивающих насосных станций.

Экспертным профессиональным сообществом выделяются следующие основные проблемы систем теплоснабжения:

- большой физический износ магистральных и квартальных трубопроводов со сроком эксплуатации более 25 лет;
- износ подземных строительных конструкций, вызывающих попадание грунтовых вод на трубопроводы через негерметичные стыки каналов и камер, что приводит к увлажнению тепловой изоляции и интенсивной наружной коррозии стальных труб из-за большого содержания активного кислорода в грунтовых водах;
- отсутствие либо недостаточную развитость системы учета ресурсов. Зачастую в теплоснабжающей организации нет приборного контроля для учета потерь на различных участках систем теплоснабжения. Отсутствие системы учета ресурсов существенно затрудняет борьбу с потерями: корректного выявления причины и источника потерь, определения и локализации проблемного участка теплосети, точечного решения задачи замены ненадежных участков трубопроводов;
- неточное грубое регулирование отпуска и потребления тепловой энергии. Как правило, установлены элеваторные присоединения домовых систем отопления к теплосети, что вызывает сложности в контроле, регулировании и управлении системой теплообеспечения, особенно в переходные осенне-весенние периоды.

#### **Анализ результатов исследования**

Методология решения фундаментальных задач энергосберегающих технологий основана на базе и алгоритме поиска энергосберегающих

решений. Многочисленные исследования показали, что максимальный результат от энергосбережения может быть получен в сферах производства, транспортировки и распределения электрической, тепловой энергии. Основная роль в увеличении эффективности использования энергии принадлежит современным энергосберегающим технологиям [9].

Рассмотрим сферу производства тепловой и электрической энергии на ТЭС. С точки зрения повышения термодинамического КПД ТЭС перспективным направлением развития энергетики является применение парогазовых энергетических установок (ПГУ) с основным оборудованием: газовой энергетической турбиной, котлом-утилизатором, паровой турбиной. ПГУ – единственные в мире энергетические установки, которые при работе в конденсационном режиме вырабатывают электроэнергию с КПД 55–60 %, что в абсолютном объеме дает значительную экономию сжигаемого топлива [10]. В качестве примера подобных энергетических установок могут послужить блоки ПГУ Ижевской ТЭЦ-1, Кировской ТЭЦ-3, Пермской ТЭЦ-9, Владимирской ТЭЦ-2, построенные по договорам поставки мощности в 2012–2014 годах.

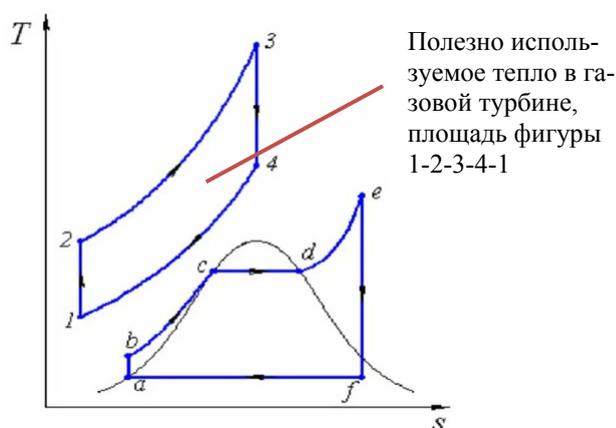


Рис. 3. Термодинамический цикл блока ПГУ в TS-диаграмме

Fig. 3. Thermodynamic cycle of the CCGT unit in the TS diagram

Увеличение КПД термодинамического цикла блока ПГУ по сравнению с традиционными ТЭС происходит за счет прибавления полезно используемого тепла в газовой турбине. На рис. 3 термодинамического цикла блока ПГУ прибавление полезно используемого тепла в газовой турбине характеризуется площадью фигуры 1-2-3-4-1.

Эффективность термодинамического цикла ПГУ зависит в первую очередь от температуры

газа перед турбиной. Чем выше температура газа перед турбиной, тем выше эффективность термодинамического цикла. При этом возможность достижения высокой температуры газа перед турбиной ограничена особенностями конструкции турбины, критичным элементом которой являются рабочие лопатки, являющиеся одними из наиболее нагруженных частей турбины. Лопатки газовых турбин работают при температурах 700–1200 °С, испытывая при этом значительные механические нагрузки от действия центробежных сил вращающегося ротора и направленного потока газов [11]. Для сравнения, в серийных паровых энергетических турбинах максимальная температура пара составляет 540–560 °С, при которой допускается длительная работа рабочих лопаток, выполненных из специальных окалиностойких жаропрочных сплавов сталей аустенитного класса с легированием титаном, никелем и прочими металлами. Лопатки газовых турбин производят всего шесть стран в мире, учитывая чрезвычайную сложность и наукоемкость процесса изготовления. Для обеспечения безаварийной работы лопатки газовых турбин изготавливаются из специальных суперсплавов на основе никеля. С целью охлаждения лопаток применяется специальное термобарьерное покрытие наружных поверхностей. В теле лопаток формируются развитые вентиляционные каналы для охлаждения металла лопаток отбираемым от компрессора турбины сжатым воздухом.

К проблемам внедрения парогазовых установок относятся [12, 13]:

- значительная стоимость капитальных затрат на реализацию проекта, исчисляемая миллиардами рублей;
- санкционные ограничения западных стран в виде запрета на поставку газовых турбин и запасных частей к ним;
- отсутствие надежных отечественных энергетических газовых турбин;
- высокая операционная стоимость содержания и обеспечения технического состояния газовых турбин.

По паросиловой генерации ТЭС выделяются следующие приоритетные направления энергоэффективных технологий и энергосберегающих решений:

1. Проектирование новых либо модернизация существующих котлоагрегатов ТЭС в части:

- повышения температуры и давления острого перегретого пара с применением современных жаропрочных и жаростойких сталей с легированием титаном и никелем с целью повыше-

ния термодинамического КПД за счет увеличения количества подводимой теплоты  $q_1$  к рабочему телу;

– применения газоплотных ограждающих конструкций и плавниковых труб поверхностей нагрева с целью исключения присосов воздуха и минимизации потерь теплоты с уходящими газами  $Q_2$  [14];

– применения развитых конвективных поверхностей нагрева с целью интенсификации теплообмена и снижения потерь тепла с уходящими газами  $Q_2$ ;

– применения низко эмиссионных горелок с целью сокращения выбросов токсичных окислов азота  $NO_x$  и обеспечения оптимального режима горения топлива;

– внедрения мероприятий для обеспечения качества подпиточной воды основного паросилового цикла. В качестве примера можно привести водоподготовку Нижнекамскую ТЭЦ, где для приготовления подпиточной воды применяется технология обратного осмоса. Применение данного современного высокотехнологического решения позволяет на фундаментальном уровне решить проблему заноса отложениями поверхностей нагрева котлов, создает условия для обеспечения нормативных теплообменных процессов, исключает вероятность пережога и возникновения свищей металла труб, исключает вероятность заноса солевыми отложениями элементов проточной части паровых турбин [15].

2. Проектирование новых либо модернизация существующих паровых турбоагрегатов в части:

– увеличения номинальной электрической мощности и тепловой выработки с повышением внутреннего КПД за счет комплексных замен цилиндров высокого и низкого давлений, модернизации части высокого давления с применением лопаточного аппарата из современных материалов с улучшенным геометрическим профилем;

– увеличения внутреннего КПД и снижения потерь с утечками пара за счет замены лабиринтовых концевых, диафрагменных уплотнений на современные уплотнения сотового типа;

– установки электрогидравлических систем управления, построенных на современной элементной базе и микропроцессорной технике.

Вышеприведенные мероприятия позволяют увеличить внутренний КПД турбоагрегата на 2,5 %, восстановить ресурс на 200 тыс. часов, значительно повысить тепловую нагрузку паровых турбоагрегатов.

3. В Российской Федерации до 75 % всей потребляемой электроэнергии в производственной отрасли используется для приведения в действие всевозможных вращающихся механизмов от электродвигателей. Для ТЭС это тягодутьевые механизмы котлоагрегатов, питательные, циркуляционные, конденсатные и сетевые насосы большой единичной мощности с приводом от асинхронных электродвигателей. Как правило, на большинстве предприятий установлены электродвигатели с большим запасом по мощности в расчете на максимальную производительность оборудования, несмотря на то что часы пиковой нагрузки составляют от 15 до 40 % общего времени его работы. В результате электродвигателями с постоянной скоростью вращения ротора расходуется значительно больше энергии, чем это необходимо. По данным европейских экспертов, стоимость электроэнергии, которая потребляется каждый год средним двигателем в промышленности, почти в 5 раз превосходит его собственную стоимость. В связи с этим очевидна необходимость применения современных энергосберегающих решений при проектировании и эксплуатации электроприводов [16].

Для качественного регулирования производительности вращающегося механизма при помощи изменения частоты вращения ротора применяется частотное регулирование электродвигателя (ЧРП) либо регулирование гидромурфтой. Суть данных методов регулирования заключается в гибком изменении частоты вращения ротора в зависимости от реальной нагрузки, что позволяет сэкономить до 40 % расходуемой электроэнергии.

Гидромурфта представляет из себя гидротрансформатор вариатора скоростей, позволяющий проводить изменение частоты вращения механизма (насоса) при постоянной частоте вращения двигателя.

Частотный регулирующий преобразователь ЧРП преобразует напряжение промышленной частоты 50 Гц при помощи диодного или тиристорного выпрямителя в постоянное. Затем при помощи инвертирующего блока постоянное напряжение инвертируется в переменное требуемой частоты. Управляющая схема ЧРП построена на базе микропроцессора с выполнением основной функции выработки и поддержанием частоты выходного напряжения и тока. Частота тока на выходе инвертора определяется шириной или длительностью управляющих импульсов со схемы управления с применением широтно- или частотно-импульсной модуляции.

При мощностях приводимого механизма больше 500 кВт экономически и технологически целесообразно применять гидромурфу. При меньших значениях мощности электродвигателей выгодно применять ЧРП. Примером практического применения качественного регулирования производительности насосов изменением частоты вращения является оборудование блока ПГУ-230 Ижевской ТЭЦ-1, где внедрено:

- регулирование с использованием гидромурфт фирмы Voit Германия питательных насосов высокого давления и сетевых насосов второго подъема. Тип насосов HGC 5/8 производства KSB, Германия. Марка гидромурфты 562 SVTL 12. Мощность электродвигателя 1.6 МВт, напряжение 6 кВ;

- частотное регулирование двигателей сетевых насосов первого подъема. Тип насосов TP-300-590/4 производства Grundfos Дания. Марка ЧРП LSMV-060F400-G1 Корея. Мощность электродвигателя 200 кВт, напряжение 6 кВ.

В системах транспортировки и распределения тепловой энергии выделяются следующие приоритетные направления внедрения энергосберегающих технологий и энергоэффективных решений:

1. Минимизация гидравлических потерь в теплосетях за счет оптимального подбора парка насосного оборудования для обеспечения экономичной работы в переходных и базовом режимах, обеспечения эксплуатации насосов в рабочей зоне напорных характеристик с номинальным КПД.

2. Применение частотного регулирования насосов с помощью гидромурфт или ЧРП [17].

3. Использование предизолированных трубопроводов, на которые тепловая изоляция нанесена в заводских условиях. Как правило на трубопроводных заводах наносится полимерная тепловая изоляция с защитным покровным слоем из оцинкованного металла. Подобные трубопроводы оснащаются системами контроля наличия протечек и увлажнения тепловой изоляции [18].

Значительные перспективы развития энергосбережения несут в себе цифровые технологии. С целью повышения качества управляемости технологическими процессами ТЭС и тепловых сетей, энергоэффективности выделяются следующие направления цифровизации [19]:

1. Установка дополнительных приборов учета, внедрение телемеханизации за счет исполнительных механизмов с внедрением систем автоматического либо удаленного ручного управления технологическими процессами.

2. Внедрение цифрового двойника ТЭС – компьютерного представления тепловой электрической станции, полностью повторяющего ее физический прообраз, в том числе представление физической среды и текущих условий эксплуатации, обеспечение возможности моделирования различных эксплуатационных режимов [20, 21].

Цифровой двойник ТЭС должен включать:

- подсистему мониторинга состояния физического производственного объекта на основе замкнутого цикла информационного обмена между ним и его виртуальной моделью, в том числе обеспечение ситуационной осведомленности;

- подсистему диагностики устойчивости управляемых процессов, которая будет идентифицировать ситуацию с системных позиций и определять текущее состояние идентифицируемых единиц оборудования ТЭС;

- подсистему анализа текущих изменений технического состояния оборудования;

- интеллектуального агента, осуществляющего перепланирование или корректировку алгоритмов работы интегрированной мультидоменной системы симуляции, которая отражает жизненный цикл и реальные условия эксплуатации оборудования ТЭС путем использования не просто логических алгоритмов, а более сложных интеллектуальных алгоритмов нейронного управления.

3. Внедрение цифровых тепловых пунктов и электрических подстанций – энергообъектов для трансформации, распределения тепловой и электрической энергии с функциями самодиагностики технического состояния его оборудования и вторичных систем, создания архива данных, анализа и составления протоколов об их функционировании в соответствии с электронными стандартами в онлайн-режиме с использованием информации в цифровом виде, обучающего адаптивного управления, в том числе для прогнозирования и самоликвидации аварийных ситуаций. Цифровые ЦТП и подстанции будут работать в автоматическом режиме с возможностью удаленного ручного управления без постоянного присутствия оперативного персонала на объекте [22].

4. Системы предиктивной прогностики, включающиеся в установку дополнительных датчиков и приборов, выработке математической модели объекта, сравнении текущих эксплуатационных параметров с математической идеальной моделью, расчете значений остаточного ресурса оборудования с определением его крити-

ческих элементов, выдаче информационных предупреждений [23]. В качестве примера можно привести систему предиктивной аналитики и удаленного мониторинга ПРАНА газовых энергетических турбин ГТЭ-160, в том числе Ижевской ТЭЦ-1, Пермской ТЭЦ-9, Кировской ТЭЦ-3, Владимирской ТЭЦ-2. Система ПРАНА прогнозирует возможные аварии благодаря раннему выявлению дефектов за 2–3 месяца до того, как они повлияют на работоспособность оборудования. Цифровые данные в непрерывном режиме поступают с ТЭС в ситуационный центр, в котором выполняется анализ и вырабатываются рекомендации эксплуатационному персоналу.

5. Использование геоинформационных систем ГИС с целью формирования и визуализации пространственной модели тепловых сетей с указанием протяженности и диаметров трубопроводов. К примеру, ГИС Zulu создает актуальную, доступную и детализированную цифровую схему тепловой сети, позволяет сформировать тепло-гидравлическую схему и разработать математическую копию тепловой сети, смоделировать теплогидравлические режимы в любой точке тепловой сети, выполнить расчет тепловых балансов, выполнить оценку эффективности управления системой теплоснабжения, ввести в действие систему мониторинга повреждения тепловых сетей с фиксацией дефектов с высокой точностью.

6. Установка системы мониторинга на трубопроводах тепловых сетей с применением акустических датчиков. Основной элемент системы – линейное оборудование, состоящее из измерительного блока, блока связи и питания, которое устанавливается на существующие трубопроводы и арматуру. Данные, зафиксированные линейным оборудованием, передаются на сервер по GSM-каналу для дальнейшего анализа и визуализации полученных данных в программном обеспечении, определения текущего технического состояния и расчета остаточного ресурса трубопроводов.

7. Проведение полномасштабного инструментального контроля состояния металла ответственных трубопроводов с применением роботизированных комплексов. Существующие традиционные методы контроля, такие как визуально-измерительный контроль, цветная и магнитопорошковая дефектоскопия, радиография, выполняются в большинстве случаев локально, не охватывая всего объема исследуемого объекта. На практике нередко происходят случаи повреждения трубопроводов, на кото-

рых, несмотря на проведение инструментального контроля металла, не были выявлены все скрытые дефекты. Отличительная особенность обследования роботизированными комплексами заключается в полном 100%-м мониторинге состояния металла всего исследуемого объекта, что позволяет более точно определить техническое состояние объекта и выявить все проблемные неблагополучные места и участки.

### Выводы

Решение задачи энергосбережения позволит решить комплекс экономических, социальных, технологических и экологических задач: рационально использовать и сохранить будущим поколениям жителей нашей страны невозобновляемые природные ресурсы, сократить рост стоимости электрической и тепловой энергии, повысить качество и надежность энергоснабжения, улучшить комфортность и качество проживания населения, улучшить экологическую обстановку в населенных пунктах, обеспечить качественное развитие технологической сферы и увеличить конкурентоспособность бизнеса. От внедрения энергосберегающих технологий получают выгоду все стороны процесса выработки и потребления ресурсов: население, бизнес-сообщество, страна в целом. В России созданы реально действующие рыночные механизмы, побуждающие коммерческие генерирующие и теплоснабжающие компании получать конкурентные преимущества за счет повышения энергоэффективности производства, в том числе проведения модернизации существующего энергогенерирующего и сетевого оборудования, внедрения парогазовых технологий, цифровизации технологических процессов.

Все вышеизложенное свидетельствует о поступательном развитии генерирующей энергетической отрасли, что создает перспективы для укрепления и развития экономики страны.

### Библиографические ссылки

1. Тарануха Н. Л., Папунидзе П. Н. Комплексная оценка и выбор проектных решений в строительстве. Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2009. С. 81.
2. Тарануха Н. Л., Семенова С. В., Панков С. Н. Энергосберегающие решения при проектировании, строительстве, эксплуатации объектов жилой недвижимости // Управленческий учет. 2022. № 7-2. С. 345–359.
3. Тарануха Н. Л., Якушев Н. М., Панков С. Н. Обзор строительного рынка жилой недвижимости Удмуртской Республики // Управленческий учет. 2022. № 7-3. С. 575–587.
4. Фильченкова М. В. современное состояние и перспективы развития энергетики России // Эконо-

мика и управление: анализ тенденций и перспектив развития. 2015. № 22. С. 150–161.

5. *Крежевский Ю. С.* Общая энергетика. Ульяновск : УлГТУ, 2014. С. 6.

6. *Трухний А. Д., Макаров А. А., Клименко В. В.* Основы современной энергетика. Москва : МЭИ, 2002. С. 149.

7. *Максимов М. О.* Повышение эффективности комбинированного производства тепла и электроэнергии // *Globus: Технические науки.* 2021. Т. 7, № 2 (38). С. 58–66.

8. Стертюков К. Г., Стародубцева О. А. Проблемы внедрения новых технологий и технических средств с целью увеличения КПД в энергетической отрасли // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления.* 2018. № 25. С. 58–73.

9. *Косухин М. М., Косухин А. М., Соколовская Д. М.* Энергосберегающие технологии и способы энергосбережения в строительстве и жилищно-коммунальном хозяйстве // *Наука и инновации в строительстве.* Белгород : БГТУ им. В. Г. Шухова, 2017. С. 237–247.

10. *Цанев С. В., Буров В. Д., Ремезов А. Н.* Газотурбинные и парагазовые установки тепловых электростанций. М. : МЭИ, 2006. С. 271.

11. *Верхоланцев А. А., Злобин В. Г.* Газотурбинные установки. конструкция ГТУ и их элементов. СПб. : ВШТЭ СПбГУПТД, 2021. 47 с.

12. *Фаворский О. Н., Батенин В. М., Филиппов С. П.* Развитие энергетика: выбор стратегических решений и их реализация // *Вестник Российской академии наук.* 2020. Т. 90, № 5. С. 415–424.

13. *Зайко А. Г.* Обзор основных тенденций, сложившихся на российском рынке энергетического машиностроения // *Вестник евразийской науки.* 2018. Т. 10, № 5. С. 17.

14. *Бирюков А. Б., Семергей В. А., Шевелева И. И.* Исследование увеличения КПД котла, сжигающего пылеугольное топливо, при повышении степени газоплотности топки // *Вестник Ивановского государственного энергетического университета.* 2018. № 3. С. 14–19.

15. *Николаева Л. А.* Водоподготовка на тепловых электростанциях. Мембранные технологии. Челябинск : ЧФ ПЭИПК, 2015. С. 31–32.

16. *Арипов Н. М., Усмонов Ш. Ю.* Исследование работы энергосберегающего асинхронного электропривода с вентиляторной нагрузкой // *Энергетическая безопасность : сборник научных статей III Международного конгресса : в 2 т.* Курск, 2020. С. 327–333.

17. Проектирование энергоэффективной тепловой сети при количественном способе регулирования с использованием частотно-регулируемого привода сетевого насоса / И. А. Клементьев, С. М. Кулагин, М. Е. Гевак, К. Д. Розникова // *Поколение будущего: Взгляд молодых ученых – 2018 : сборник научных статей 7-й Международной молодежной научной конференции: в 4 т.* 2018. С. 186–190.

18. *Валиуллин К. И.* Автоматизация систем оперативного дистанционного контроля в предизолированных трубах // *XXV Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный Дню энергетика : материалы конференции.* В 3 т. / под общ. ред. Э. Ю. Абдуллазянова. Казань, 2022. С. 114–116.

19. *Бушуев В. В., Новиков Н. Л., Новиков А. Н.* Цифровизация экономики и энергетика: перспективы и проблемы // *Экономические стратегии.* 2019. Т. 21, № 6 (164). С. 96–105.

20. *Булатов Ю. Н., Короткова К. Е.* Применение технологий цифровых двойников в энергетике // *Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки.* 2021. Т. 1. С. 103–112.

21. *Мостовенко Л. В., Белоглазов В. П.* Анализ эффективности внедрения нейронных сетей на объектах промышленной теплоэнергетики // *Актуальные проблемы науки и образования в условиях современных вызовов : сборник материалов XIII Международной научно-практической конференции.* Москва, 2022. С. 266–277.

22. Основы построения цифровых подстанций в рамках концепции «Цифровая трансформация – 2030» / Л. П. Андрианова, З. Х. Павлова, М. И. Хакимьянов, Р. Т. Хазиева // *Всероссийский педагогический форум. Сборник статей II Всероссийской научно-методической конференции.* 2020. С. 348–360.

23. *Щербатов И. А.* Методологические основы создания автоматизированных систем диагностики и предиктивной аналитики объектов энергетика // *Математические методы в технологиях и технике.* 2021. № 5. С. 92–100.

## References

1. Taranukha N.L., Papunidze P.N. *Kompleksnaya otsenka i vybor proektnykh reshenii v stroitel'stve* [Comprehensive assessment and selection of design solutions in construction]. Izhevsk: IzhSTU, 2009. P. 81 (in Russ.).

2. Taranukha N.L., Semenova S.V., Pankov S.N. [Energy-saving solutions in the design, construction, operation of residential real estate]. *Upravlencheskii uchet.* 2022. No. 7-2. Pp. 345-359 (in Russ.).

3. Taranukha N.L., Yakushev N.M., Pankov S.N. Review of the construction market of residential real estate of the Udmurt Republic. *Upravlencheskii uchet.* 2022. No. 7-3. Pp. 575-587 (in Russ.).

4. Filchenkova M.V. The current state and prospects for the development of Russian energy // *Ekonomika i upravlenie: analiz tendentsii i perspektiv razvitiya.* 2015. No. 22. Pp. 150-161 (in Russ.).

5. Krezhevsky Yu. S. *Obshchaya energetika* [General energy]. Ulyanovsk: UISTU, 2014. P. 6 (in Russ.).

6. Trukhny A.D., Makarov A.A., Klimenko V.V. *Osnovy sovremennoi energetiki* [Fundamentals of modern energy]. Moscow: MEI, 2002. P. 149 (in Russ.).

7. Maksimov M.O. [Improving the efficiency of combined heat and electricity production]. *Globus:*

Technical Sciences. 2021. Vol. 7, no. 2. Pp. 58-66 (in Russ.).

8. Stertyukov K.G., Starodubtseva O.A. [Problems of introduction of new technologies and technical means in order to increase efficiency in the energy industry] *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya*. 2018. No. 25. Pp. 58-73 (in Russ.).

9. Kosukhin M.M., Kosukhin A.M., Sokolovskaya D.M. [Energy-saving technologies and methods of energy saving in construction and housing and communal services] // Science and innovations in construction. Belgorod: V.G. Shukhov BSTU, 2017. pp. 237-247.

10. Tsanev S.V., Burov V.D., Remezov A.N. *Gazoturbinnnye i paragazovye ustanovki teplovykh elektrostantsii* [Gas turbine and steam-gas installations of thermal power plants]. Moscow: MEI, 2006. P. 271 (in Russ.).

11. Verkholantsev A.A., Zlobin V.G. *Gazoturbinnnye ustanovki. konstruksiya GTU i ikh elementov* [Gas turbine installations. the design of gtu and their elements]. Saint Petersburg: HSE SPbGUPTD, 2021. 47 p. (in Russ.).

12. Favorsky O.N., Batenin V.M., Filippov S.P. [Energy development: the choice of strategic decisions and their implementation]. *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk*. 2020. Vol. 90, no. 5. Pp. 415-424 (in Russ.).

13. Zaiko A.G. [Review of the main trends in the Russian market of power engineering]. *Vestnik evraziiskoi nauki*. 2018. Vol. 10. No. 5. P. 17 (in Russ.).

14. Biryukov A.B., Semergey V.A., Sheveleva I.I. [Investigation of increasing the efficiency of a boiler burning pulverized coal fuel with increasing the degree of gas density of the furnace]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2018. No. 3. Pp. 14-19 (in Russ.).

15. Nikolaeva L.A. *Vodopodgotovka na teplovykh elektrostantsiyakh. Membrannye tekhnologii* [Water treatment at thermal power plants. membrane technologies]. Chelyabinsk: BSF PEIpk, 2015. Pp. 31-32 (in Russ.).

16. Aripov N.M., Usmonov Sh.Yu. *Issledovanie raboty energosberegayushchego asinkhronnogo elektroprivoda s ventilyatornoi nagruzkoi* [Investigation of the operation of an energy-saving asynchronous electric drive with a fan load]. *Energeticheskaya bezopasnost' : sbornik nauchnykh statei III Mezhdunarodnogo kongressa : v 2 t.* [Proc. Energy security. collection of scientific articles of the III International Congress : in 2 vols]. Kursk, 2020. Pp. 327-333 (in Russ.).

17. Klementyev I.A., Kulagin S.M., Gevak M.E., Roznikova K.D. *Proektirovanie energoeffektivnoi teplovoi seti pri kolichestvennom sposobe regulirovaniya s ispol'zovaniem chastotno-reguliruemogo privoda setevogo nasosa* [Designing an energy-efficient heat network with a quantitative method of regulation using a

frequency-controlled drive of a network pump]. *Pokolenie budushchego: Vzglyad molodykh uchenykh – 2018 : sbornik nauchnykh statei 7-i Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii: v 4 t* [Proc. Generation of the future: The view of young scientists- 2018. collection of scientific articles of the 7th International Youth Scientific Conference: in 4 vols]. 2018. Pp. 186-190 (in Russ.).

18. Valiullin K.I. *Avtomatizatsiya sistem operativnogo distantsionnogo kontrolya v predizolirovannykh trubakh* [Automation of operational remote control systems in pre-insulated pipes]. *XXV Vserossiiskii aspirantsko-magisterskii nauchnyi seminar, posvyashchenniy Dnyu energetika : materialy konferentsii. V 3 t.* [Proc. XXV All-Russian postgraduate and Master's scientific seminar dedicated to the Day of the Power engineer. Conference materials. In 3 volumes. Under the general editorship of E.Y. Abdullazyanov]. Kazan, 2022. Pp. 114-116.19 (in Russ.).

19. Bushuev V.V., Novikov N.L., Novikov A.N. [Digitalization of economy and energy: prospects and problems]. *Economic strategies*. 2019. Vol. 21, no. 6. Pp. 96-105 (in Russ.).

20. Bulatov Yu.N., Korotkova K.E. *Primenenie tekhnologii tsifrovyykh dvoynikov v energetike* [Application of digital twins technologies in power engineering]. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki* [Proceedings of the Bratsk State University. Series: Natural and Engineering Sciences]. 2021. Vol. 1. Pp. 103-112 (in Russ.).

21. Mostovenko L.V., Beloglazov V.P. *Analiz effektivnosti vnedreniya neironnykh setei na ob'ektakh promyshlennoi teploenergetiki* [Analysis of the effectiveness of the introduction of neural networks at industrial heat power facilities]. *Aktual'nye problemy nauki i obrazovaniya v usloviyakh sovremennykh vyzovov : sbornik materialov XIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Actual problems of science and education in the conditions of modern challenges. Collection of materials of the XIII International Scientific and Practical Conference]. Moscow, 2022. Pp. 266-277 (in Russ.).

22. Andrianova L.P., Pavlova Z.H., Khakimyanov M.I., Khazieva R.T. *Osnovy postroeniya tsifrovyykh podstantsii v ramkakh kontseptsii «Tsifrovaya transformatsiya – 2030»* [Fundamentals of building digital substations within the framework of the concept "Digital transformation 2030"]. *Vserossiiskii pedagogicheskii forum. Sbornik statei II Vserossiiskoi nauchno-metodicheskoi konferentsii* [Proc. All-Russian Pedagogical Forum. Collection of articles of the II All-Russian Scientific and Methodological Conference]. 2020. Pp. 348-360 (in Russ.).

23. Shcherbatov I.A. [Methodological foundations for the creation of automated diagnostic systems and predictive analytics of energy facilities]. *Mathematical methods in technologies and engineering*. 2021. No. 5. Pp. 92-100 (in Russ.).

## Energy-Efficient Solutions in Design, Construction and Operation of Thermal Power Plants and Heating Networks

*N. L. Taranukha*, Doctor of Economics, Professor, Director of the Institute of Additional Professional Education, Professor of the Department of Industrial and Civil Engineering of Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

*S. N. Pankov*, Master Degree Student, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

*I. D. Kanakov*, Master Degree Student, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

*The article deals with topical issues related to the introduction of energy-efficient measures in the energy sector of Russia. A comprehensive study and research of the current situation in the field of technological processes for generating electric and thermal energy of thermal power plants (hereinafter TPP), transportation and distribution of energy in thermal networks has been carried out. The analysis of the main equipment and the parameters of the working environment influence on the efficiency of the thermal power plant, taking into account the technological features and energy losses of the steam power cycle of heat and electric power generation, was carried out. The main existing problems and sources of energy losses in heat supply systems are considered. Recommendations are given for introduction and development of energy-efficient solutions and technologies in the design, construction and operation of thermal power plants and heating networks. Promising measures aimed at maximum effect of energy saving are proposed for consideration, including the design and construction of new or modernization of existing thermal power plant equipment, the introduction of combined-cycle power plants, the use of frequency drives of critical rotating mechanisms, the introduction of automatic or remote manual process control systems, the introduction of digital production, including digital counterparts of objects, digital heating points and electrical substations, installation of additional sensors and metering devices with the introduction of monitoring systems and predictive prognostics of equipment, the use of geo-information systems with visualization of three-dimensional schemes and the development of mathematical models of heating networks, carrying out a full-scale instrumental control of critical pipelines metal using robotic complexes. Practical examples of energy-efficient measures application at existing thermal power plants and heating networks are given.*

**Keywords:** energy resources, energy conservation, energy efficiency, thermal power plants, thermal networks.

Получено: 27.12.22

### Образец цитирования

*Тарануха Н. Л., Панков С. Н., Канаков И. Д.* Энергоэффективные решения при проектировании, строительстве, эксплуатации тепловых электрических станций и тепловых сетей // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т. 21, № 1. С. 33–44. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-1-33-44.

### For Citation

Taranukha N.L., Pankov S.N., Kanakov I.D. [Energy-efficient solutions in design, construction and operation of thermal power plants and heating networks]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2023, vol. 21, no. 1, pp. 33-44 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2023-1-33-44.