

По данным Федеральной службы государственной статистики около 109 млн. человек или 75 % населения России проживает в городах, для энергообеспечения которых начиная с 1930-х годов и наиболее массово в 1950 – 1980-е годы были созданы и введены в эксплуатацию крупные централизованные теплофикационные системы на базе тепловых электростанций. Применяемые при их проектировании и строительстве концептуальные технические и технологические решения были одними из самых передовых в мире, однако в настоящее время во многом устарели и требуют модернизации.

В выдвигаемой на соискание Премии Правительства Российской Федерации работе представлены результаты диссертационных исследований (см. «Дополнительные материалы», приложение 1), научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ (там же, приложение 2), выполненных участниками авторского коллектива (или под их научным руководством) в Ульяновском государственном техническом университете на кафедрах «Тепловая и топливная энергетика» и «Теплогазоснабжение и вентиляция имени В.И. Шарапова» в период с 2000 по 2023 гг., которые обобщены в виде комплекса апробированных и используемых в производстве филиала «Ульяновский» ПАО «Т Плюс» (ранее ОАО «Волжская ТГК», ОАО «Ульяновскэнерго») научно-технических решений, направленных на повышение эффективности и расширение функциональности тепловых электрических станций и подключенных к ним городских систем теплоснабжения. Представленный в работе комплекс содержит четыре группы научно-технических решений, в совокупности обеспечивающих технологический задел для перехода к устойчивой экологически чистой энергетике урбанизированных территорий и связанных с совершенствованием горелочных устройств и топочных камер (1-й раздел работы), с тепловой защитой и диагностикой лопаточного аппарата турбомашин (2-й раздел), с оптимизацией технологических схем и режимов работы теплоэлектростанций (ТЭС), водоподготовительных установок и си-

стем теплоснабжения (3-й раздел), а также с использованием производственной инфраструктуры тепловых электростанций в городском коммунальном хозяйстве (4-й раздел).

**Основная научно-техническая идея** заключается в создании и отработке предлагаемых научно-технических решений по совершенствованию устройств и агрегатов тепловых электростанций и подключенных к ним систем посредством детального математического моделирования с разработкой цифровых двойников прототипных решений для всестороннего исследования и параметрической оптимизации в вычислительном эксперименте. На основе этой идеи созданы цифровые двойники, получены и апробированы новые научно-технические решения (всего более 60 патентов РФ на изобретения и полезные модели, 26 оригинальных программ для ЭВМ, см. «Дополнительные материалы», приложение 3), которые обеспечивают в совокупности формирование технологического задела для перехода к цифровым интеллектуальным технологиям экологически чистого ресурсосберегающего производства тепловой и электрической энергии.

**Научная новизна** работы заключается в разработке положений, расчётных методик и вычислительных технологий, определяющих общую направленность повышения эффективности тепловых электростанций и подключенных к ним теплофикационных систем, в рамках которой предложены и научно обоснованы технические и технологические решения по совершенствованию тепловых схем и режимов работы отдельных элементов теплофикационного оборудования и станции в целом, расширению их функциональности в составе единого энергетического комплекса городского коммунального хозяйства. Научные положения и результаты работы представлены в 12 защищённых диссертациях (см. «Дополнительные материалы», приложение 1), опубликованы в ведущих рецензируемых отечественных и зарубежных научных жур-

налах и в виде монографий (см. там же, приложение 4). Новизна и оригинальность отдельных разработок комплекса отмечена наградами авторитетных научных и инновационных мероприятий и сообществ (см. там же, приложение 5).

### **Раздел 1. Цифровые двойники топочных камер и горелочных устройств**

В соответствии с современными представлениями, реализация устойчивого развития энергетики урбанизированных территорий связана с последовательной экологизацией технологических процессов производства тепловой и электрической энергии и увеличением доли производства энергии из местных и возобновляемых источников (включая растительные и биотоплива, органические и синтетические топлива, в том числе получаемые из бытовых и промышленных отходов). Перспективными и активно разрабатываемыми в настоящее время решениями являются мультитопливные и «всеядные» энергоустановки на основе малоэмиссионного сжигания ультрабедных топливных смесей. Устойчивое горение и полноту сгорания таких смесей, особенно в условиях неоднородности и вариабельности химического состава топлив, обеспечивают технологии вихревого горения и горения в массивах закрученных струй, надёжная и эффективная реализация которых зависит от совокупности взаимно влияющих факторов, в том числе скорости диффузии компонентов реагирующего рабочего тела и кинетики химического реагирования, факторов тепловой и динамической нестационарности, форм-факторов топочной камеры и образующихся реакционных зон. Для отработки этих технологий и получения эффективных технических решений были созданы (с применением современных средств вычислительной газодинамики и оригинальных программных продуктов) цифровые двойники репрезентативных и перспективных топочных камер и горелочных устройств. По результатам комплексных исследований созданных цифровых двойников разработаны и запатентованы эффективные технические решения (пат. №№ 2783213, 2807227 на изобретения, №№ 170277, 173450, 208400, 208401, 210008, 201164, 215037, 215191, 201848, 220517, 221910 на полезные модели).

С использованием цифрового двойника серийного энергетического котла ТГМЕ-464 разработаны и реализованы на Ульяновской ТЭЦ-1 и Чебоксарской ТЭЦ-2 мероприятия, направленные на решение актуальных производственных задач по повышению эффективности горения и снижению эмиссии в атмосферу оксидов азота и углерода за счёт отладки режимов горения посредством режимных испытаний. Режимные испытания проводили на основе серии вычислительных экспериментов, моделирующих горение метано-воздушной смеси с учётом закрутки и взаимного влияния факелов в массиве при многоярусной компоновке горелок, а также рециркуляции дымовых газов в топочной камере. Проведённые режимные испытания и последующая их натурная верификация подтвердили возможность нейтрализовать вредную эмиссию оксидов азота путём внедрения комплекса мероприятий, включающего применение горелок с изменяемым углом факела (пат. № 215191) и устройства для рециркуляции дымовых газов энергетических котлов (пат. № 210008) совместно с программой для управления блоком перераспределения газов рециркуляции (свид. о гос. рег. № 2022684874), нивелировав при этом возникающее из-за рециркуляции дымовых газов снижение КПД парового котла.

## **Раздел 2. Тепловая защита и диагностика лопаточного аппарата турбомашин**

С 2001 года в УлГТУ развивается оригинальный программно-информационный комплекс (свид. о гос. рег. №№ 50200200478, 2014616247, 2017661244, 2018611067, 2020660230, 2022616894) для моделирования теплонапряжённого состояния и прогнозирования остаточного ресурса лопаточного аппарата турбомашин. С его использованием разработаны и предложены решения газотурбинных двигателей с организацией эффективной тепловой защиты лопаточного аппарата, в том числе с использованием газодинамической температурной стратификации рабочего тела (пат. №№ 2557793, 2629304, 2629305, 2629309).

В интересах Ульяновского филиала ПАО «Т Плюс» с использованием разработанного программно-информационного комплекса проведено исследование по выявлению и локализации наиболее теплонапряжённых участков рабочих лопаток ротора высокого давления паровых турбин Т-100/120-130 Ульяновской ТЭЦ-1. По результатам исследования по согласованию с заводом-изготовителем, выполнены дополнительные «каналы» в корпусе для дефектоскопии ротора высокого давления, что обеспечило возможность проводить дефектоскопию без вскрытия цилиндра и снизить сроки его ремонта на 10 дней. Учитывая, что указанный турбоагрегат является наиболее распространённым на отечественных ТЭЦ, экономический эффект, связанный с сокращением сроков ремонта на 10 дней, в расчёте на один турбоагрегат с турбиной Т-100/120-130 в масштабах страны составляет около 28 млн. рублей.

### **Раздел 3. Технические решения по совершенствованию тепловых схем, теплофикационных систем и режимов их работы**

#### *3.1. Повышение эффективности работы систем теплоснабжения при различных способах регулирования отпуска теплоты*

Проведённый анализ показал, что в отечественных системах теплоснабжения всё большее распространение получают способы количественного и качественно-количественного регулирования отпуска теплоты. В связи с этим смоделированы и разработаны схемы ТЭЦ с количественным и качественно-количественным регулированием тепловой нагрузки (пат. №№ 2159393, 2174610). Новизна предложенных схем заключается в регулировании тепловой нагрузки систем теплоснабжения количеством параллельно включенных пиковых водогрейных котлов и сетевых подогревателей, что позволяет снизить затраты на водоподготовку более чем в 15 раз, увеличить выработку электроэнергии на тепловом потреблении на 9 %, снизить расход топлива водогрейными котлами на 9 %, вдвое уменьшить затраты на транспорт теплоносителя.

#### *3.2. Совершенствование структуры и повышение надёжности теплофикационных систем за счёт комбинированного теплоснабжения*

Разработан и исследован ряд технологий комбинированного теплоснабжения, которые объединяют в себе структурные элементы централизованных и децентрализованных систем теплоснабжения (пат. №№ 2235249, 2235250, 2467255, 2495330, 2509958, 2574972). Основным отличием предложенных структурных схем систем комбинированного теплоснабжения является параллельное размещение пиковых и основных теплоисточников, размещение пиковых теплоисточников в непосредственной близости от потребителя и использование зонированного температурного графика по трём периодам регулирования: переходному, базовому и пиковому. При этом в базовом периоде осуществляется центральное качественное регулирование, в пиковом и переходных периодах осуществляется комбинирование центрального качественного и местного количественного регулирования.

В системе теплоснабжения города Ульяновска на ряде центральных тепловых пунктов с установленной тепловой мощностью более 143 Гкал/ч с 2008 года реализовано комбинированное регулирование тепловой нагрузки в переходные периоды отопительного периода. В результате регулирования температура сетевой воды в системе теплоснабжения понизилась на 5...8 °С, что дало годовой экономический эффект до 5 млн. рублей.

### *3.3. Совершенствование технологических схем и режимов работы водоподготовительных установок*

Предложены и обоснованы усовершенствованные схемные и режимные решения по работе водоподготовительных установок ТЭЦ, прежде всего установок термической деаэрации, позволяющие обеспечить требуемое качество обрабатываемой воды и увеличить теплофикационную выработку электроэнергии за счёт изменения режима работы (пат. №№ 2291970, 2293852, 2269010, 2269654, 2275509, 2278981, 2278982, 2287699, 2287701, 2287702, 2287703). Выполнено моделирование и экспериментальная оценка энергетической эффективности новых технологий использования регенеративных от-

боров пара турбин ТЭЦ в системах водоподготовки. Установлены совокупности режимных параметров теплофикационных турбин типа Т-100/120-130, обеспечивающие необходимый для реализации разработанных технических решений регулировочный диапазон изменения давления пара в камере пятого нерегулируемого отбора. Установлено, что для водоподготовительной установки ТЭЦ производительностью 400 м<sup>3</sup>/ч, восполняющей потери пара и конденсата из цикла станции, реализация разработанного технологического решения вакуумной деаэрации с использованием пара пятого нерегулируемого отбора позволяет экономить более 7900 тонн условного топлива в год (снижение выбросов углекислого газа при этом составляет 12759 тонн).

Идея многопараметрического управления реализована в серии новых технологий термической деаэрации воды (пат №№ 2224174, 2224950, 2220289), позволяющих повысить надёжность, качество и экономичность работы теплоэнергетических установок за счёт глубокого удаления коррозионно-активных газов при минимальных энергетических затратах. Установлено, что управление термическими деаэраторами по нескольким регулирующим и регулируемым параметрам позволяет повысить надёжность и экономичность работы тепловой электрической станции за счёт обеспечения заданной концентрации удаляемого газа (кислорода O<sub>2</sub> или диоксида углерода CO<sub>2</sub>) в деаэрированной воде при оптимальном режиме работы турбоустановки с максимальной выработкой электроэнергии на тепловом потреблении.

#### **Раздел 4. Расширение функциональности тепловых электростанций путём использования в городском коммунальном хозяйстве**

##### *4.1. Использование низкопотенциальных источников теплоты ТЭЦ для утилизации вывозимого с городских улиц снега*

Анализ решений по утилизации вывозимого с городских улиц снега показал, что на сегодняшний день отсутствуют энергоэффективные решения, позволяющие использовать для этого энергетический потенциал ТЭЦ. Впервые разработаны технологии (пат №№ 165483, 165883), позволяющие производить

утилизацию снега в стационарной снегоплавильной установке, представляющей собой железобетонный резервуар с установленным внутри поверхностным теплообменником, в который направляют низкопотенциальные источники теплоты от ТЭЦ, например, основной конденсат турбины, либо конденсат сетевых подогревателей, либо обратную сетевую воду, либо охлаждающую циркуляционную воду. С учётом производительности снегоплавильной установки 650 т/ч выручка энергокомпании за утилизацию снега на Ульяновской ТЭЦ-1 оценивается в 145 млн. рублей за один зимний сезон.

#### *4.2. Применение городских ТЭЦ в схеме подготовки питьевой воды системы централизованного холодного водоснабжения*

Обоснована возможность и разработаны технологии применения отработавшего пара турбин ТЭЦ в схемах подготовки воды для целей централизованного холодного водоснабжения. В зависимости близости ТЭЦ и водопроводных очистных сооружений предложены две технологии подогрева холодной воды (пат. № 165933). Для реализации первой технологии регулируемого (до 30 °С) подогрева питьевой воды предлагается установка мини-ТЭЦ на территории или в непосредственной близости от водоочистных сооружений водоканала. В случае расположения действующих ТЭЦ на значительном расстоянии от водоочистных сооружений водоканала, согласно второй технологии, предлагается осуществлять регулируемый подогрев (до 20 °С) питьевой воды системы централизованного холодного водоснабжения во встроенном пучке конденсатора выделенной паровой турбины. Применительно к реальным условиям работы ТЭЦ ВАЗа Самарского филиала ПАО «Т Плюс», экономический эффект от применения новой технологии составляет более 6000 т условного топлива в год. В расчёте учитывали, что предложенная схема эксплуатируется в течение 5 месяцев (с мая по сентябрь), а среднечасовой расход питьевой воды через конденсатор выделенной турбины составляет 1300 м<sup>3</sup>/ч.

#### *4.3. Использование инфраструктуры ТЭЦ для термической переработки и энергетической утилизации коммунальных и производственных отходов*



Разработаны и запатентованы технические и технологические решения, направленные на энергетическую утилизацию твёрдых бытовых отходов (пат. №№ 2783213 и 2789945), а также на энергоэффективную термическую переработку коммунальных и производственных отходов (преимущественно пластика) с использованием инфраструктуры ТЭЦ (пат. № 193148). Экономический эффект от реализации проекта переработки пластика на ТЭЦ для условий города Ульяновска и прилегающих населённых пунктов складывается из экономии энергоресурсов на переработку и прибыли от реализации вторичного переработанного пластика в виде гранул.

Предложенные обоснованные и запатентованные решения по расширению функциональности и использованию производственной инфраструктуры являются актуальным направлением развития городских ТЭЦ с учётом климатических условий и особенностей коммунального хозяйства на большей части территории Российской Федерации.

### **Заключение**

Зapatентованные технические решения используются в филиале «Ульяновский» ПАО «Т Плюс», а также в филиалах «Марий Эл и Чувашия» и «Самарский». Созданные цифровые двойники внедрены в образовательный процесс подготовки инженерных кадров и кадров высшей квалификации для теплоэнергетики региона в УЛГТУ и в Ульяновском филиале ПАО «Т Плюс».

Подтверждённый годовой экономический эффект от использования разработок составил 186 млн. рублей (см. «Дополнительные материалы», приложение 6). Внедрение разработок в масштабах страны позволит повысить топливную эффективность централизованного производства тепловой и электрической энергии и экономить не менее 700 тыс. тонн условного топлива в год. Социальный эффект заключается в подготовке квалифицированных кадров для региональной теплоэнергетики и создании высокотехнологичных рабочих мест, а также в формировании научно-технологического задела для перехода к устойчивой экологически чистой энергетике урбанизированных территорий.