АННОТАЦИЯ

диссертационной работы Сейтбековой Айнагуль Манарбековны на тему: «Исследование и разработка методов оптимизации потребления топлива системы теплоснабжения района на основе обнаружения аномалий в больших данных», представленный на соискание степени доктора философии (PhD) по образовательной программе 8D07103 – «Автоматизация и управление»

Актуальность исследования. Системы централизованного теплоснабжения являются одним из ключевых элементов энергетической и социальной инфраструктуры Казахстана. Продолжительный отопительный период, значительные изменения температуры наружного воздуха, суточная и сезонная неравномерность потребительской нагрузки требуют точного согласования процессов производства, транспортирования и потребления тепловой энергии. По статистическим данным, рассмотренным в диссертации, общая протяжённость тепловых сетей достигает 13,4 тыс. км; в 2025 году отремонтировано и реконструировано 323 км сетей, на 2026 год запланировано обновление 377 км, а до 2029 года предусмотрена модернизация 1,6 тыс. км. Число источников теплоснабжения в 2025 году составило 2688 единиц. Эти показатели отражают масштаб отрасли и необходимость непрерывного контроля её технического состояния.

Износ сетей и оборудования, повышенные тепловые потери, недостаточность измерительных каналов, несовместимость информационных систем и разрозненное хранение технологических данных ограничивают эффективное использование топлива. При неполных и несинхронизированных сведениях о температуре, давлении, расходе теплоносителя, тепловой мощности, наружной температуре и состоянии оборудования снижается оперативность диспетчерских решений. Смещение датчика, зависание сигнала или потеря связи могут внешне совпадать с технологической неисправностью, тогда как закономерное изменение нагрузки может быть ошибочно классифицировано как аномалия. Поэтому контроля по одиночным пороговым значениям недостаточно.

Задачи цифровизации теплоэнергетики Республики Казахстан предусматривают развитие систем сбора, обработки, мониторинга и анализа данных, контроль температуры и давления в реальном времени, интеграцию результатов учёта тепловой энергии и прогнозирование потребления ресурсов на основе больших данных. Для выполнения этих задач необходимо объединить физические модели, программируемый логический контроллер, SCADA, архивы, алгоритмы машинного обучения и средства оптимизации в одном расчётно-управляющем контуре.

Степень разработанности проблемы и научное противоречие. В существующих исследованиях достаточно развиты теплогидравлические расчёты, автоматизированное управление, цифровые двойники, обнаружение аномалий и оптимизация расхода топлива. Специализированные программные комплексы рассчитывают топологию сети, стационарные и динамические режимы, распределение давления и температуры, а также тепловые потери. В машинном обучении применяются статистические пороги, методы изоляции, одноклассовые классификаторы, автоэнкодеры и временные модели. Однако эти задачи часто решаются раздельно: физическая модель не связана с системой управления, а детектор на основе данных не полностью учитывает физические закономерности и режимный контекст.

Недостаток размеченных производственных данных о реальных отказах, различная частота опроса датчиков, сезонность и неоднородное качество измерений затрудняют объективную оценку алгоритмов. Кроме того, обнаружение аномалии само по себе не обеспечивает экономию топлива: диагностический признак должен преобразовываться в безопасное решение об изменении мощности источника, температуры подачи, дифференциального давления, режима насосов или распределения нагрузки. Это противоречие определило направление работы: необходим комплексный метод, объединяющий физические закономерности и интеллектуальный анализ данных и проверяющий решение в Software-in-the-Loop до его передачи реальному оборудованию.

Цель, объект и предмет исследования. Цель исследования состоит в разработке методов и средств автоматизированного управления для оптимизации потребления топлива

районной системой централизованного теплоснабжения на основе выявления отклонений в больших массивах режимных и технологических данных. Предусматривается не только регистрация аномалии, но и расчётная оценка её влияния на производство тепла, давление и температуру в сети, мощность, доставляемую потребителю, и расход топлива.

Объект исследования – районная система теплоснабжения, включающая источник тепловой энергии, подающий и обратный трубопроводы, насосное оборудование, тепловые пункты, потребителей, средства измерения и автоматизированную систему управления. Предмет исследования – сбор, синхронизация и предварительная обработка технологических данных; закономерности нормальных и нештатных режимов; теплогидравлические модели; алгоритмы обнаружения аномалий; методы снижения расхода топлива при ограничениях по качеству и безопасности теплоснабжения.

Задачи исследования. Для достижения цели проанализированы современное состояние и уровень цифровизации теплоэнергетики Казахстана; определены факторы, влияющие на расход топлива, включая наружную температуру, нагрузку, температуры подачи и возврата, давление, расход, сетевые потери и эффективность оборудования; разработана архитектура цифрового двойника, объединяющая данные ПЛК, SCADA, архива и расчётных моделей; создана модель реального участка сети в Fluidit Heat; построена независимая физическая модель в MATLAB/Simulink/Simscape; в Software-in-the-Loop проверены нормальный режим, повышенная нагрузка, отказ датчика, потеря связи и процессное отклонение; посредством UPPAAL верифицированы логическая и временная согласованность компонентов; сопоставлены шесть детекторов аномалий и сформировано решение по большинству голосов; разработаны алгоритм расчёта тепловой энергии и лабораторный образец теплосчётчика.

Методы исследования и экспериментальная база. В работе применены системный анализ, балансы массы и энергии, оценка гидравлического сопротивления по Дарси–Вейсбаху, зависимость Колбрука–Уайта, расчёт теплообмена, характеристики насосов, имитационное моделирование, статистическая обработка, сравнительный анализ, машинное обучение и временные автоматы. Диагностические признаки формировались из остатков между измеренными и расчётными параметрами, невязок массового и энергетического балансов и отклонений многомерных временных рядов от нормальной структуры.

Экспериментальная Software-in-the-Loop среда объединила TIA Portal V20, виртуальный контроллер SIMATIC S7-1500, сконфигурированный как CPU 1513F-1, S7-PLCSIM Advanced V7.0, WinCC Runtime Advanced V20, OPC UA, Python и Fluidit Heat 2.8. Сервис Python считывал теги ПЛК по OPC UA, проверял тип, единицу измерения, полноту, временную метку и инженерный диапазон, сопоставлял входы с параметрами Fluidit Heat, запускал расчёт, обрабатывал результаты и возвращал их в контроллер. MATLAB/Simulink/Simscape использовался для независимой перекрёстной проверки, UPPAAL – для формальной оценки логики управления и временных ограничений.

Достоверность результатов обеспечивалась сопоставлением двух независимых физических моделей, повторными SIL-испытаниями при неизменной конфигурации, оценкой всех детекторов на одном разбиении данных, формальной верификацией и лабораторными испытаниями средства измерения. Одновременно определены границы применимости: детекторы аномалий проверены на синтетических данных, поэтому промышленная точность и фактическая экономия топлива требуют архива полного отопительного сезона и контролируемых полевых испытаний.

Основное содержание диссертации. Диссертация включает введение, четыре раздела, заключение, 115 использованных источников и четыре приложения; содержит 45 рисунков и 21 таблицу. Логика исследования последовательно переходит от оценки состояния отрасли к созданию цифрового двойника, проверке математических и имитационных моделей, затем к обнаружению аномалий и обоснованию управляющих решений.

Содержание первого раздела. В первом разделе рассмотрены мировые и казахстанские тенденции теплоэнергетики, концепции районного теплоснабжения четвёртого и пятого поколений, цифровизация сетей, интеллектуальный учёт и прогнозное управление. Выполнен статистический анализ производства, передачи и потребления тепла в Казахстане;

систематизированы сведения об износе сетей, потерях, объёмах ремонта, числе источников теплоснабжения и состоянии измерительной инфраструктуры.

Установлено, что режим теплоснабжения зависит от наружной температуры, тепловой инерции зданий, графика потребления, технического состояния трубопроводов, работы насосов и коэффициента полезного действия теплогенерирующего оборудования. Их совместное влияние изменяет нормальное состояние системы во времени. Поэтому один фиксированный порог увеличивает число ложных тревог; необходимо одновременно учитывать температуру, давление, расход, тепловую мощность и состояние оборудования.

Обзор показал результативность цифровых двойников с обменом данными с реальным объектом, адаптации параметров модели по измерениям, выявления утечек по модельным остаткам, машинного обучения и модельно-прогнозного управления. Вместе с тем физическая модель, система автоматизации, детектор аномалий и модуль оптимизации топлива редко объединяются в замкнутом контуре. Этот вывод стал основанием архитектурного решения второго раздела.

Архитектура цифрового двойника во втором разделе. Во втором разделе разработан функциональный цифровой двойник районной системы теплоснабжения. Архитектура включает уровень физического процесса, уровень ПЛК и SCADA, интеграционно-аналитический сервис Python, архив SQL и теплогидравлическое ядро Fluidit Heat. В эксперименте функции производственного контроллера выполнял виртуальный ПЛК в PLCSIM Advanced. WinCC визуализировал параметры, команды и состояние выполнения; OPC UA использовался как основной канал реального времени, а архив предназначался для долговременных трендов и последующего обучения.

Для двунаправленного обмена в ПЛК созданы выходной блок рабочих параметров и входной блок результатов модели. Python проверял обязательные переменные и сопоставлял теги ПЛК с граничными условиями Fluidit Heat. После успешного расчёта в контроллер возвращались давление, температура, расход, доставленное тепло, дефицит и сетевые потери. При неполных данных, выходе за инженерный диапазон или несоответствии результата технологическим ограничениям запись блокировалась и формировался код ошибки.

Структура информационного обмена сохраняется при замене реального контроллера виртуальным. Для перехода к объекту требуется адаптировать адреса контроллера, карту технологических тегов и параметры модели сети. Таким образом, архитектура позволяет безопасно проверять диспетчерские команды, аварийные сценарии и результаты оптимизации без воздействия на действующее оборудование.

Расчётные и экспериментальные результаты второго раздела. В Fluidit Heat исследованы шесть режимов: отопление помещений, горячее водоснабжение, совместное отопление и ГВС, снижение температуры подачи до 90 °C, снижение дифференциального давления до 3 бар и повышение спроса до 120%. В базовом совместном режиме потребителям доставлено 2369,84 кВт, мощность источника составила 2377,14 кВт, расход – 12,288 л/с, минимальный перепад давления – 4,0 бар, сетевые потери – 7,298 кВт; дефицит тепла отсутствовал.

При температуре подачи 90 °C доставленная мощность сохранилась на уровне 2369,83 кВт, расход увеличился до 13,664 л/с, а сетевые потери снизились до 6,820 кВт. При спросе 120% доставленное тепло составило 2843,79 кВт, мощность источника – 2850,80 кВт, расход – 14,737 л/с; сетевые потери равнялись 6,996 кВт, дефицит оставался нулевым. Скорость потока на выбранном критическом направлении выросла примерно на 19,2%, удельные потери давления – на 41,5%. Поскольку абсолютные потери оставались близкими, их относительная доля снизилась с 0,307 до 0,245%. Это подтвердило необходимость совместной оценки тепловых и гидравлических ограничений.

Цикл Software-in-the-Loop десять раз выполнялся при одинаковой конфигурации. Средняя длительность составила 23,509 с, стандартное отклонение – 0,907 с. Около 98,5% общего времени занимала симуляция Fluidit Heat, а чтение OPC UA, проверка и сопоставление данных, постобработка и подтверждённая запись в ПЛК вместе составляли около 1,5%. Следовательно, основной резерв производительности связан с загрузкой и расчётом модели, а не с каналом связи.

Результаты формальной верификации. В UPPAAL построена сеть параллельных временных автоматов Scenario, Plant, PLC, HMI, Archive, Integration, Twin и Observer. Рассмотрены отказ датчика, потеря OPC UA, недоступность архива, отказ расчётного сервиса Fluidit и процессная неисправность. Символическими временными параметрами заданы дедлайн команды, время подтверждения ответа и верхняя граница вычисления модели.

Верификация подтвердила переход в безопасное состояние, блокирование оптимизированной команды при недостоверных данных, выдачу безопасной команды при вычислительном или коммуникационном отказе и отсутствие тупиковых состояний в заданных условиях. Результат характеризует не статистическую точность детектора, а логику и временную дисциплину взаимодействия TIA Portal–Python–Fluidit Heat. Поскольку формальная модель проверяет проектные границы, а не измеренные секунды, она применяется совместно с временными результатами SIL.

Математическая модель третьего раздела. В третьем разделе построена модель, минимизирующая расход топлива при обеспечении заданной тепловой нагрузки и соблюдении ограничений по температуре, давлению и качеству услуги. Сеть представлена ориентированным графом; описаны массовый баланс в узлах, гидравлическое сопротивление и тепловые потери в трубопроводах, энергетический баланс в узлах смешения, энтальпийный перепад на тепловых пунктах и связь полезного тепла источника с расходом топлива. Частота насосов, сопротивление клапанов, температура сетевой воды, давление и нагрузка потребителей рассматриваются как управляющие или ограничиваемые переменные.

Критерий оптимизации направлен на снижение суммарного расхода топлива с учётом коэффициентов полезного действия источников и теплоты сгорания. Ограничения включают удовлетворение спроса, допустимую температуру подачи, минимальный перепад давления, скорость в трубопроводах, рабочие области насосов и арматуры и отсутствие дефицита тепла. Физические нарушения задаются дополнительной утечкой, изменением сопротивления, теплопроводности или эффективности оборудования; измерительные неисправности – отдельным смещением и шумом. Такое разделение не позволяет автоматически отождествлять отказ датчика с технологическим дефектом.

Перекрёстная проверка моделей третьего раздела. В MATLAB/Simulink/Simscape создана независимая модель трубопроводов, потока теплоносителя, потерь давления, теплообмена и потребительских нагрузок. Её результаты сопоставлены с Fluidit Heat при нагрузках 100% и 120%. Относительное расхождение по доставленной тепловой мощности не превысило 0,003%, по мощности источника было ниже 0,025%. MAPE для расхода и скорости теплоносителя составила 1,92–1,99%, по перепаду давления у потребителей – менее 0,25%.

По фактическим потерям давления результат MATLAB был приблизительно на 5,6% ниже Fluidit Heat. Сетевые тепловые потери в MATLAB оказались выше на 6,21% при 100%-ной нагрузке и на 10,81% при 120%-ной. Различие связано с постановкой уравнений теплообмена, температурой грунта и согласованием параметров. Основные гидравлические и энергетические показатели подтвердили совместимость моделей, но выявили необходимость калибровки теплообмена перед промышленным применением.

Методика обнаружения аномалий в четвёртом разделе. В четвёртом разделе цифровой двойник дополнен шестью алгоритмами: Z-score, Isolation Forest, One-Class SVM, Local Outlier Factor, Elliptic Envelope и MLP-автоэнкодером. Единицей исследования являлось состояние одного потребителя с интервалом 15 минут. Вектор признаков включал отопительную нагрузку, нагрузку ГВС, давления подачи и возврата, температуры подачи и возврата и объёмный расход. Для каждого потребителя обучалась отдельная модель; признаки стандартизировались только по параметрам обучающего периода.

Для пяти потребителей создан синтетический ряд длительностью 30 суток: 14 400 наблюдений, из которых 10 080 нормальных составили обучающую выборку, 4320 – тестовую. В тест введено 669 управляемых аномалий: снижение температуры подачи приблизительно до 90 °C, уменьшение перепада до 3 бар, рост нагрузки до 120%, имитация утечки и отказ датчика. Повышенный спрос отмечался как статистическое отклонение, но не трактовался автоматически как нарушение эксплуатации.

Для Z-score использован порог три стандартных отклонения; для Isolation Forest – 250

деревьев и contamination 0,03; для One-Class SVM – ядро RBF и nu 0,03; для LOF – 35 соседей; для Elliptic Envelope – support fraction 0,90. MLP-автоэнкодер имел архитектуру 7–14–4–14–7, активацию tanh и раннюю остановку. Для моделей, кроме Z-score, порог определялся по 97-му процентилю обучающих оценок. Итоговая метка формировалась при согласии не менее четырёх алгоритмов.

Результаты обнаружения аномалий. На 4320 тестовых наблюдениях решение по большинству голосов обеспечило precision 92,26%, recall 98,06%, F1 95,07% и ROC AUC 99,58%; зарегистрировано 55 ложных тревог и 13 пропущенных аномалий. Лучший отдельный алгоритм Elliptic Envelope получил F1 91,66%, поэтому прирост объединённого решения составил 3,41 процентного пункта. F1 для Z-score равнялся 91,06%, MLP-автоэнкодера – 90,34%, LOF – 90,23%, One-Class SVM – 89,68%, Isolation Forest – 73,11%. Различные математические принципы взаимно дополнили друг друга и уменьшили избыточные тревоги чувствительных моделей.

Матрица ошибок показала правильную классификацию 3596 нормальных и 656 аномальных наблюдений. В производственной системе стоимость 13 пропущенных событий с точки зрения безопасности и влияние 55 ложных тревог на нагрузку оператора должны оцениваться отдельно. Поэтому решение модели не преобразуется непосредственно в автоматическую команду: на первом этапе оно используется как рекомендательный сигнал, после которого сценарий Fluidit Heat оценивает влияние возможной неисправности на давление, температуру, расход и дефицит тепла.

Результаты в области учёта тепловой энергии. В четвёртом разделе разработаны алгоритм расчёта тепловой энергии с учётом сезона и режима работы и лабораторный образец электромагнитного теплосчётчика «Сайман-АУЭС». При испытании контрольный объём составил 180,960 м³, показание прибора — 181,101 м³, расхождение — 0,141 м³ и не превысило допустимый предел; тип средства измерения утверждён сертификатом №2459 от 28 декабря 2023 года.

Научная новизна исследования. Во-первых, разработан способ программно-аппаратной координации OPC UA, Python, Fluidit Heat и UPPAAL в одном Software-in-the-Loop контуре. Он охватывает двунаправленный обмен, запуск сценария, проверку результата и формирование безопасной команды.

Во-вторых, предложен гибридный подход, связывающий физическую модель и ошибку реконструкции автоэнкодера через модельные остатки. Он разделяет неисправность измерительного канала и технологическое изменение и проверяет статистическое предупреждение физическим сценарием.

В-третьих, обоснована модель минимизации топлива распределением тепловой нагрузки с учётом КПД источников, теплоты сгорания, гидравлических потерь и технологических ограничений. В-четвёртых, разработан метод кросс-верификации Fluidit Heat и MATLAB/Simulink/Simscape по мощности, расходу, скорости, давлению и тепловым потерям.

Практическая значимость, достоверность и ограничения. Практические результаты включают цифровой двойник, интерфейс WinCC, сервис Python, модуль обнаружения аномалий, алгоритм учёта тепла и образец теплосчётчика. Отдельные результаты использованы ТОО «Корпорация Сайман»; комплекс позволяет сопоставлять режимы, проверять безопасный сценарий и оценивать отклонения измерений от модели.

Метрики получены на синтетических данных и не доказывают промышленную точность. Для внедрения нужны архив полного отопительного сезона, метаданные качества датчиков, журнал подтверждённых отказов и действий оператора, а также раздельные по времени обучающий, валидационный и независимый тестовый периоды. Фактическую экономию следует оценивать контролируемым сравнением режимов при одинаковых условиях и нагрузке.

Личный вклад автора и апробация результатов. Автор сформулировал цель и задачи, проанализировал данные, разработал цифровой двойник и интеграцию, сопоставил модели Fluidit Heat и MATLAB/Simulink/Simscape, провёл SIL-испытания и верификацию UPPAAL, оценил детекторы аномалий и интерпретировал результаты. Работа выполнена в

рамках проекта AP25795155.

Опубликовано 6 работ: одна в издании Scopus, пять в изданиях, рекомендованных уполномоченным комитетом; имеется публикация международной конференции. Получены два свидетельства об авторском праве и патент №9014 на полезную модель «Аппаратно-программный комплекс для интеллектуального учёта тепла».

Заключение. Результаты показывают техническую реализуемость объединения физической модели теплоснабжения, средств автоматизации и интеллектуального анализа данных в одном контуре. Решение позволяет заблаговременно отмечать аномалию, моделировать её влияние и проверять управляющее воздействие до передачи на реальный объект. Следующий этап состоит в независимой временной валидации на производственных архивах и определении фактической экономии топлива в контролируемых полевых испытаниях.