

## АННОТАЦИЯ

Диссертационной работы на соискание степени доктора философии PhD Ибрагимовой М.В. на тему **«Разработка аппаратного программно-методического комплекса для автоматизированного энергетического аудита зданий на основе беспроводных сенсорных систем»** по специальности 6D071700 – «Теплоэнергетика»

Устойчивое развитие экономики Казахстана невозможно без решения вопросов повышения энергоэффективности и энергосбережения. Мероприятия в данной сфере будут способствовать модернизации промышленности, электроэнергетики, жилищно-коммунального и транспортного секторов, посредством стимулирования применения современных технологий и инноваций. В этой связи, руководством Казахстана, несмотря на значительные запасы в стране энергоресурсов и развитой энергетической инфраструктуры, выбран курс на энергосбережение и повышение энергоэффективности в качестве основных приоритетов энергетической политики страны. С принятием «Стратегии «Казахстан 2050» и Концепции перехода к «зеленой» экономике, страной был выбран принципиально новый путь развития общества. Согласно Концепции, ключевую роль будет играть направленность государственной политики на снижение воздействия на окружающую среду, энергосбережение и достижение высокого уровня качества жизни населения [1].

С 2012 года в Казахстане был принят ряд законодательных актов [2,3], определяющих основные требования в области энергоэффективности, в качестве основного документа в настоящее время выступает закон «Об энергосбережении и повышении энергоэффективности», согласно которому все субъекты государственного энергетического реестра должны проходить обязательный энергетический аудит не реже одного раза каждые пять лет. Правительством Республики Казахстан также поставлена цель по снижению энергоемкости ВВП не менее чем на 40 % к 2020 году от уровня 2008 года [1].

В среднем, жилые дома в Казахстане потребляют в три раза больше энергии на единицу площади, чем в странах Северной Европы. Энергетический аудит зданий, проведенный в рамках проекта ПРООН, показал, что потребление тепловой энергии жилищными зданиями Казахстана в среднем составляет 273 кВт·ч на м<sup>2</sup> в год, что в несколько раз превосходит уровень потребления в развитых странах мира [1]. Сравнение отдельного потребления тепла зданиями в разных странах представлено в соответствии с рисунком 1.

Жилищный сектор потребляет около 11-13% электроэнергии и 40% произведенной тепловой энергии. По оценкам экспертов, термо-технические характеристики 70% зданий (особенно построенных в 1950-1980-е годы) не соответствуют современным требованиям. Жилищный фонд Республики Казахстан составляет более 270,9 млн. м<sup>2</sup> общей площади, из которых 50,1 млн. м<sup>2</sup> или 32% от жилищного фонда, относящегося к многоквартирным

жилым домам, нуждается в разных видах ремонта и термомодернизации [4]. Длительность отопительного сезона в различных регионах РК составляет от 3500 до 5000 часов в год. Из общего потребления тепловой энергии в объеме 175,2 млн. Гкал, около 74,8 млн. Гкал приходится на отопление и горячее водоснабжение жилищного фонда. В 2012 году конечное энергопотребление в жилищном секторе составило 9,96 млн. тонн нефтяного эквивалента или 18% от общего потребления первичных энергоресурсов. Выше перечисленные факты свидетельствуют об огромном потенциале энергосбережения в области жилищного фонда страны, для реализации которого необходимо использовать эффективные и качественные способы проведения энергоаудита и принимать соответствующие энергосберегающие мероприятия.

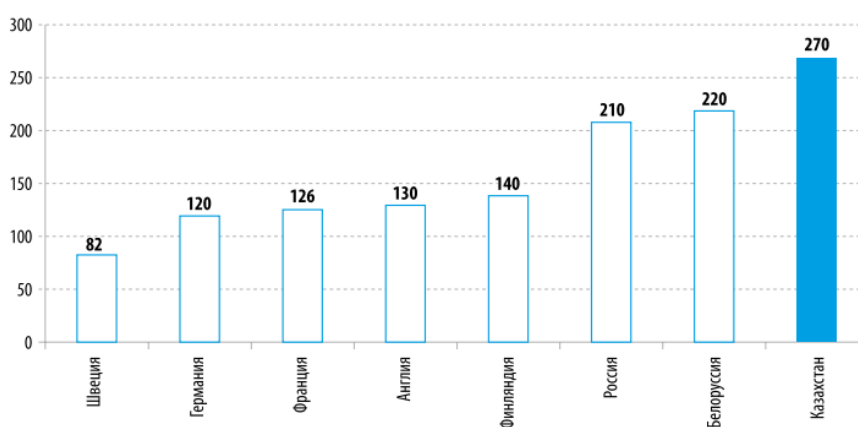


Рисунок 1 – Сравнение отдельного потребления тепла зданиями, кВт\*ч/м<sup>2</sup> в год

После принятия закона «Об энергосбережении и повышении энергоэффективности» с 2012 года, наблюдается резкий рост количества энергоаудиторских компаний. На данный момент в Казахстане услуги в области энергоаудита предоставляет 110 компаний, 26 из которых входят в Казахстанскую ассоциацию энергоаудиторов.

Следует обратить внимание также на быстрые темпы развития энергосервисного рынка в Казахстане, основой которого является составление энергосервисного договора с использованием механизма государственно-частного партнерства, о принципиальной важности которого Президент страны подчеркивает в своем послании народу от 31 января 2017 года. Об этом, также упоминается в 59 шаге Плана нации - 100 конкретных шагов Главы государства: «Привлечение стратегических инвесторов в сферу энергосбережения через международно признанный механизм энергосервисных договоров; их основная задача: стимулирование развития частных энергосервисных компаний для предоставления комплекса услуг в сфере энергосбережения с возмещением собственных расходов и получением финансовой прибыли из фактически достигаемой экономии энергозатрат».

Проведение энергоаудита является трудоемкой и дорогой услугой. По данным компании «Energy partner» стоимость проведения энергоаудита

здания варьируется от 200 тенге за м<sup>2</sup>, т.е. для проведения энергоаудита здания с общей площадью 5 000 м<sup>2</sup> заказчику необходимо оплатить 1 млн тенге. Срок проведения энергоаудита зависит от площади здания и количества задействованных специалистов-энергоаудиторов и может составлять от одного месяца до года. Учитывая поставленные государством задачи в области энергосбережения, объем и состояние жилого фонда РК, общая стоимость проведения энергоаудита жилого фонда по предварительным расчетам может составить более 54 млрд. тенге и потребует больших временных затрат.

В настоящее время можно выделить следующие основные проблемы энергоаудита зданий и реализации задач энергосервисных компаний в Казахстане:

1) Недостаточная достоверность результатов энергоаудита - при проведении замеров не учитывается, что условия, при которых выполнены измерения, могут отличаться от реальных режимов функционирования в различные периоды эксплуатации;

2) При составлении энергобалансов объектов не учитываются их фактическое состояние и режимы использования, что не позволяет достоверно оценивать надежность, техническую реализуемость и экономическую обоснованность рекомендаций для всего жизненного цикла;

3) Отсутствует важнейшая стадия – «входной контроль» качества и полноты исходной информации, недостоверность и искажения в которой ведут к заведомо ошибочным выводам и рекомендациям;

4) Не учитывается системное взаимовлияние рекомендуемых мероприятий, в результате чего, как правило, формируется неоправданно завышенная оценка энергосберегающего потенциала;

5) Разработанные Правительством РК правила проведения энергоаудита, не содержат сведений о необходимом объеме измерений на предприятии, глубины исследований, что свидетельствует о самостоятельном выборе энергоаудиторских компаний необходимого объема инструментальных исследований и глубину проработки, и как правило для минимизации затрат компании стремятся сократить объем исследований, что оказывает влияние на качество результатов исследований;

6) Высокая стоимость технических средств;

7) Низкая производительность труда аудиторов и, соответственно, высокая стоимость и продолжительность работ, что также влияет на качество данных.

В настоящей работе предлагается новое решение – создание аппаратного программно-методического комплекса (АПК) для автоматизированного и централизованного энергетического аудита жилых и общественных зданий, позволяющего получить достоверную и объективную оценку энергопотребления и фактического энергосостояния зданий с помощью разработанных методов и инструментов.

**Целью диссертационной работы** является разработка аппаратного программно-методического комплекса, обладающего новыми качествами,

позволяющего многократно повысить производительность труда аудиторов, объективность и достоверность результатов аудита, значительно снизить стоимость и продолжительность работ. Кроме того, полученные результаты энергетических исследований с помощью АПМК, позволят определить эффективные меры для достижения реального энергосбережения с повышением энергоэффективности, надежности и безопасности зданий, энергоустановок и инженерных систем.

**Основные задачи работы:**

1. Анализ современных технологий, технических средств, способов и программных продуктов, используемых при проведении энергоаудита зданий.

2. Разработка концепции динамического имитационного моделирования энергобаланса зданий, основанной на непрерывных наблюдениях внутренних и внешних факторов и моделях процессов тепло- и массопереноса исследуемых объектов.

3. Разработка имитационной модели энергобаланса зданий, учитывающую динамику комплексного влияния внутренних и внешних параметров здания и окружающей среды.

4. Разработка и реализация программных продуктов (ПП), необходимых для аппаратного программно-методического комплекса (АПМК), функционирующего на основе предложенной методики расчета энергобаланса помещения.

5. Разработка алгоритмов автоматизации настройки и калибровки имитационной модели по результатам приборных наблюдений в реальном масштабе времени, позволяющих создать цифровой двойник исследуемого объекта.

6. Разработка концепции энергетических исследований зданий на основе цифрового двойника исследуемого объекта.

7. Проектирование, сбор и реализация беспроводной сенсорной системы и обеспечение полной ее интеграции с разработанными ПП.

8. Проведение экспериментальных исследований энергобаланса помещения с применением разработанного АПМК.

9. Обработка и анализ результатов экспериментальных исследований, и их сравнение с результатами расчетов имитационной модели с целью проверки адекватности модели, а также оценки эффективности предложенных методик, программных продуктов и аппаратной части АПМК.

**Научная новизна** проведенных исследований заключается в:

1. Предложена новая концепция имитационного моделирования динамики энергобаланса зданий основанная на непрерывных наблюдениях внутренних и внешних факторов и моделях процессов тепло- и массопереноса исследуемых объектов.

2. Предложен новый метод определения потерь тепла зданий связанных с естественной и/или принудительной вентиляцией, основанный на непрерывных измерениях температуры, влажности и концентрации углекислого газа в воздухе.

3. Предложен новый метод косвенных измерений поступлений тепла от людей, находящихся в помещении.

4. Разработана структура и состав системы для энергетических исследований зданий и сооружений на основе беспроводной сенсорной сети.

5. Разработаны программные продукты для автоматизированных энергетических исследований зданий и сооружений с функцией автоматической калибровки отдельных параметров.

6. Предложен метод моделирования теплопередачи через непрозрачные ограждающие конструкции.

7. Предложена концепция энергетических исследований зданий на основе цифрового двойника.

8. Создана полностью функциональная система для автоматизированных энергетических исследований. Проведены продолжительные испытания и экспериментальные энергетические исследования с использованием разработанного АПМК.

**Достоверность работы.** Достоверность результатов работы подтверждается следующими факторами:

- при проведении сравнительного анализа существующих и разработанных способов решения задач теплопередачи через ограждающие конструкции применялись наиболее точные математико-ориентированные инструменты моделирования высокого уровня, такие как Matlab, Comsol, Labview;

- результаты экспериментальных исследований и динамического численного моделирования совпадают, с малой погрешностью.

Достоверность работы также подкрепляется системным подходом к проведению экспериментов, высокой точностью систем измерения.

**На защиту выносятся следующие положения:**

- разработанные аналоговые модели теплопередачи типовых непрозрачных ограждающих конструкций, представленные в виде передаточных функций, для упрощенного и быстрого расчета потерь тепла через ограждения;

- способ и подпрограмма автоматического расчета потерь тепла зданий, связанных с естественной и/или принудительной вентиляцией;

- способ и подпрограмма автоматического расчета поступлений тепла от людей;

- концепция энергетических исследований зданий на основе цифрового двойника;

- разработанные программные продукты и аппаратный комплекс как новые инструменты для автоматизированного энергетического исследования зданий и сооружений.

**Практическая ценность работы** состоит в:

- разработке новой методики определения фактического значения удельной характеристики расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию конкретного здания, с учетом его теплотехнических, конструктивных особенностей и условий эксплуатации;

- применении разработанной АПМК в качестве инструмента энергетических исследований и интерпретации их результатов;
- возможность применения АПМК для создания автоматизированных встраиваемых систем оптимального управления энергоснабжением зданий;
- разработке АПМК, позволяющего существенно снизить финансовые затраты и повысить достоверность результатов энергетических исследований объектов.

**Апробация результатов диссертации.** Основные результаты диссертационной работы апробированы на международных научно-практических конференциях и форумах:

- Международная конференция «Экологические и климатические технологии» CONECT 2015, с международным участием (Рига, 2015);
- Международная конференция по когенерации, малым электростанциям и централизованному энергоснабжению (Бангкок, 2016);
- VI-ая международная научно-техническая конференция «Казах-стан-холод 2016» (Алматы, 2016);
- VI-ая международная конференция по тепловому оборудованию, возобновляемым источникам энергии и развитию сельских районов, «TE-RE-RD 2017» (Румыния, 2017).

**Публикации.** Основные положения работы представлены в 10 публикациях, в том числе в 5 изданиях, рекомендованных ККСОН МОН РК, в журнале «Journal of Engineering and Applied Sciences», «Medwell Journals» входящий в базу данных Scopus, в 4 международных научно-практических конференциях и форумах.

**Личный вклад автора состоит:**

- в проведении сравнительного анализа и обобщения литературных данных;
- в разработке динамической имитационной модели энергобаланса помещения;
- в разработке программных и аппаратных продуктов АПМК;
- в планировании, организации и проведении экспериментальных исследований, обработке и обобщении полученных результатов;
- в разработке новых технических решений.

**Объем и структура.** Диссертация содержит введение, 4 раздела, заключение, список использованной литературы, приложения. Диссертация изложена на 143 страницах компьютерного набора, включая 86 рисунков и 17 таблиц, 68 формул, список литературы из 131 наименования.

**Во введении** обоснована актуальность проблемы исследования, представлена общая характеристика области исследований, сформулированы цель и задачи исследования, описана научная новизна, практическая значимость диссертационной работы, сформулированы положения, выносимые на защиту.

**В первом разделе** проведен обзор и анализ существующих технологий и методов проведения энергетических исследований зданий и сооружений.

Рассмотрены и проанализированы программные комплексы, применяемые для обработки результатов энергоаудита. Для каждого программного комплекса выявлены технические особенности, функциональные характеристики и недостатки. В главе представлены стандартный и расширенный перечни состава информационно-измерительных комплексов и технических средств для проведения энергоаудита зданий. В соответствии с поставленной целью сформулированы задачи исследования.

**Во втором разделе** диссертации приведено описание новой концепции динамического имитационного моделирования и расчета энергобаланса зданий основанной на непрерывных наблюдениях и комплексном влиянии внутренних и внешних климатических факторов. Разработан новый метод определения потерь тепла зданий связанных с естественной и/или принудительной вентиляцией, основанный на непрерывных измерениях температуры, влажности и концентрации углекислого газа в воздухе, составляющий альтернативу дорогостоящему методу оценки воздухопроницаемости ограждений с помощью аэродвери. Разработан новый метод косвенных измерений поступлений тепла от людей, находящихся в исследуемом помещении. Данный метод заключается в определении текущего значения количества людей, посредством измеряемого показателя динамики роста концентрации  $\text{CO}_2$  в помещении. Также предложен и обоснован метод моделирования теплообмена через непрозрачные ограждающие конструкции, и доказана возможность использования предлагаемого метода, путем замены трудоемких решений дифференциальных уравнений простыми и доступными передаточными функциями. Разработана концепция цифрового двойника помещения, обладающая рядом новых качеств и преимуществ.

**В третьем разделе** приведен комплекс программных продуктов для АПМК с полным описанием алгоритмов работы, разработанный в среде графического программирования LabView. Разработанные программные продукты функционируют на основе методики расчета энергобаланса зданий, предложенной в данной диссертационной работе. Так же создана беспроводная сенсорная система, включающая в себя спроектированные и собранные четыре основных типа сенсорных блоков.

**В четвертом разделе** представлены результаты экспериментальных исследований энергобаланса помещения, полученных с помощью разработанного АПМК БСС. Проведена оценка микроклимата исследуемого помещения, приведен сравнительный анализ результатов расчетной и фактической удельной характеристики расхода тепловой энергии на систему отопления и вентиляции здания. На основе проведенных непрерывных измерений энергетических параметров помещения была рассчитана экономия средств на отопление в случае учета естественных поступлений тепла в комнату. Приведены результаты анализа динамики суточных показателей энергобаланса помещения. Также, на основе результатов экспериментальных исследований и метода частотного анализа объектов, были определены коэффициенты передаточных функций цифрового двойника исследуемого

помещения. Проведена оценка адекватности и точности разработанной динамической модели по результатам экспериментальных исследований.

**В заключении** сформулированы основные результаты работы и выводы по диссертационной работе.