

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ИНСТИТУТ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА ИМЕНИ А. В. ЛЫКОВА
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»

УДК 621.577+536.24

Филатов
Святослав Олегович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОТЫ ГРУНТА**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

Минск 2015

Работа выполнена в Учреждении образования «Белорусский государственный технологический университет»

Научный руководитель	Володин Виктор Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры энергосбережения, гидравлики и теплотехники Учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет»
Официальные оппоненты:	Доброго Кирилл Викторович, доктор физико-математических наук, декан энергетического факультета Учреждения образования «Белорусский национальный технический университет».
	Русан Викентий Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры «Практическая подготовка студентов» Учреждения образования «Белорусский государственный аграрный технический университет».
Оппонирующая организация	Республиканское научно-производственное унитарное предприятие «Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси».

Защита состоится «27» октября 2015 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 01.13.01 при Государственном научном учреждении «Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси» по адресу 220072, г. Минск, ул. П. Бровки, 15, корп. 3, конференц-зал. E-mail совета: sovet@itmo.by. Телефон ученого секретаря совета (+375 17) 284-23-87.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси.

Автореферат разослан «24» сентября 2015 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций Д 01.13.01
кандидат физико-математических наук

Ю. В. Жукова

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с Национальной программой развития местных и возобновляемых энергоисточников на 2011–2015 годы перспективным способом снижения энергозатрат на теплоснабжение является применение тепловых насосов. Это направление, в том числе, предполагает использование возобновляемого источника энергии – теплоты грунта. Эффективность таких систем теплоснабжения зависит от нескольких взаимосвязанных факторов: системы утилизации теплоты грунта, особенностей работы оборудования теплового насоса, параметров эксплуатации потребителя теплоты. Для обоснования перспективности их использования на проектном этапе и прогнозирования работы в нерасчетных режимах требуется соответствующий инструмент. Таким апробированным инструментом в настоящее время является метод анализа, основанный на численном моделировании, который позволяет с наименьшими затратами выбрать оптимальный вариант для внедрения с учетом совместной работы контуров грунтовых теплообменников, теплового насоса и потребителя теплоты.

Теплота грунта может быть также использована для повышения эффективности систем приточной вентиляции в холодное время года за счет подогрева воздуха в грунтовых теплообменниках новых перспективных конструкций, для анализа и обоснования которых требуется разработка методики расчета.

Анализ научных публикаций показывает, что существующие методы расчета таких систем не учитывают в полной мере взаимодействие грунтовых теплообменников, тепловых насосов и потребителя тепла, так как ориентированы на подробное рассмотрение только одного из элементов системы теплонасосного теплоснабжения. Это ограничивает их возможности при выборе и обосновании параметров эффективных систем теплоснабжения с использованием теплоты грунта.

Таким образом, актуальной задачей исследования является разработка метода численного анализа и обоснование на его основе параметров эффективных систем теплоснабжения с использованием теплоты грунта. Это позволит в дальнейшем обеспечить подбор и внедрение наиболее совершенных систем теплонасосного теплоснабжения и систем подогрева приточного воздуха в Республике Беларусь, что будет способствовать увеличению доли использования теплоты за счет альтернативных источников и повышению энергетической безопасности страны.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами и темами. Диссертационная работа выполнена в Учреждении образования «Белорусский государственный тех-

нологический университет» на кафедре энергосбережения, гидравлики и тепло-техники, в рамках следующих научно-исследовательских тем:

– «Разработка и верификация метода численного моделирования нестационарного теплового режима вертикальных грунтовых теплообменников» (ГБ 14-023, № гос. регистрации 20141080, 2014 г.);

– «Повышение эффективности систем теплоснабжения с использованием низкопотенциальной теплоты возобновляемых источников и парокомпрессионных тепловых насосов средней теплопроизводительностью до 50 кВт» (ГБ 14-107, № гос. регистрации 20142000, 2014–2015 гг.). (в рамках подпрограммы ГПНИ «Энергобезопасность, энергоэффективность и энергосбережение, атомная энергетика 2.2.31).

Цель и задачи исследования. *Цель* диссертационной работы – выбор и обоснование на основе разработанного метода численного анализа эффективных теплонасосных систем теплоснабжения с использованием нетрадиционного источника – теплоты грунта.

Задачи исследования:

1. Разработать двухуровневые численные методики теплового анализа источника и конечного потребителя теплоты, как для индивидуального исследования их параметров, так и при их совместной работе с тепловым насосом.

2. Разработать комплексный метод численного анализа теплонасосной системы теплоснабжения для утилизации низкопотенциальной теплоты грунта, который учитывает взаимосвязанную работу контуров грунтовых теплообменников, теплового насоса и потребителя теплоты, и реализовать его в виде прикладной компьютерной программы.

3. Разработать и изготовить экспериментальную установку, провести исследование нестационарного режима работы модели грунтового теплообменника с изменяющимся массовым расходом теплоносителя на основе предварительно определенных свойств используемого грунта.

4. Провести исследование и разработать научно обоснованные рекомендации для повышения эффективности теплонасосной системы теплоснабжения с использованием теплоты грунта на основе:

- применения грунтовых многотрубных вертикальных теплообменников и с полукольцевой формой каналов, а также энергетических свай;
- выбора материалов грунтовых теплообменников и энергетических свай;
- выбора параметров конечного потребителя теплоты.

5. Разработать и исследовать эффективность воздушных энергетических свай для снижения потребления энергии системой приточной вентиляции.

Объект исследования – система теплоснабжения с использованием теплоты грунта. *Предмет исследования* – эффективность работы системы теплоснабжения с использованием низкопотенциальной теплоты грунта.

Научная новизна. Впервые разработаны методики теплового анализа вертикальных грунтовых теплообменников нетрадиционного исполнения с использованием форм-факторов.

Впервые разработана обобщенная методика комплексного анализа системы теплонасосного теплоснабжения с учетом взаимосвязи источника тепла, теплового насоса и потребителя.

Впервые получены экспериментальные данные о работе грунтовых теплообменников в нестационарном режиме при переменных расходе и температуре теплоносителя.

Впервые установлено влияние конструктивных параметров и свойств материалов грунтовых теплообменников нетрадиционного исполнения, параметров потребителя тепла на эффективность системы теплоснабжения; получены результаты об эффективности применения в системах вентиляции воздушных энергетических свай.

Положения, выносимые на защиту.

1. Комплексный метод численного анализа нестационарной работы теплонасосной системы теплоснабжения с использованием теплоты грунта, реализованный в виде компьютерной программы, позволяющий исследовать и проектировать такие системы с учетом взаимодействия контуров вертикальных грунтовых теплообменников нетрадиционного исполнения, теплового насоса и потребителя теплоты в виде систем напольного водяного отопления, горячего водоснабжения и вентиляции.

2. Новые результаты исследования энергетической эффективности теплонасосной системы теплоснабжения, учитывающие взаимное влияние конструктивных и режимных параметров источника низкопотенциальной теплоты – грунта, теплового насоса и потребителя теплоты.

3. Результаты исследования эффективности применения разработанных воздушных энергетических свай для подогрева приточного воздуха, применение которых позволяет до 17% снизить потребление теплоты в системах вентиляции.

4. Практические рекомендации по проектированию систем теплоснабжения с утилизацией теплоты грунта, позволяющие повысить их эффективность за счет увеличения количества U-образных труб по отношению к традиционному исполнению и подбора материалов грунтовых теплообменников, выбора температурного режима конечного потребителя тепла, применения эффективных воздушных энергетических свай.

Личный вклад соискателя. Разработка методики теплового анализа источника и потребителя теплоты, организация и проведение экспериментов, анализ полученных экспериментальных и численных данных выполнены автором самостоятельно. Совместно с научным руководителем осуществлена постановка задач иссле-

дования, реализация в виде компьютерной программы комплексного метода анализа теплонасосной системы теплоснабжения, обобщение результатов численного анализа.

Апробация результатов диссертации и информация об использовании ее результатов. Результаты исследований докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях: 76–78-я Научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных работников и аспирантов БГТУ (г. Минск, 2012–2014 гг.); Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Томск, 2011 г.); 14-й Минский международный форум по тепломассообмену (г. Минск, 2012 г.); VIII-я Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2013» (г. Иваново, 2013 г.); II-я Межотраслевая научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов «Инновационные пути модернизации базовых отраслей промышленности, энерго- и ресурсосбережения, охрана окружающей среды» (г. Харьков, 2013 г.); I-я Международная научно-техническая конференция «Энергосбережение в строительстве» (г. Киев, 2013 г.); III-я Международная конференция с элементами научной школы для молодежи «Инновационные разработки в области техники и физики низких температур» (г. Москва, 2013 г.).

Опубликование результатов диссертации. По результатам исследований опубликовано 24 научные работы, в том числе 9 статей в рецензируемых научных изданиях по перечню ВАК (3,96 авт. лист.), 3 статьи в научных сборниках (0,79 авт. лист.), 7 тезисов докладов конференций (0,86 авт. лист.), получено 4 патента на полезные модели.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Работа изложена на 186 страницах, в том числе содержит 68 рисунков, 7 таблиц, 10 приложений. Библиографический список содержит 191 источник, из которых 76 – иностранные.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации.

В первой главе проведен анализ особенностей работы систем теплоснабжения с использованием низкопотенциальной теплоты грунта, известных способов повышения их эффективности и методов численного анализа.

Рассматриваемые системы теплоснабжения включают связанные контуры вертикальных грунтовых теплообменников (ВГТО), теплового насоса и потребителя тепла (отопление, горячее водоснабжение, приточная вентиляция).

Часть известных методов анализа таких систем ориентирована лишь на подробное рассмотрение источника низкопотенциального тепла грунта для установления временного изменения его температуры и параметров грунтовых теплообменников. Сущность таких методов заключается в решении задачи нестационарного теплообмена в грунте и ВГТО с различными приближениями. Полученные расчетные зависимости (работы Баска Б. И., Накорчевского А. И., Al-Khoury R., Diersch H.-J. G., Bonnier P. G., Eskilson P., Claesson J.) справедливы для условий постоянного теплового потока, постоянной или линейно изменяющейся во времени температуры теплоносителя. Это не охватывает весь возможный характер изменения температур теплоносителя и теплового потока ВГТО при совместной работе с тепловым насосом или при использовании в системах вентиляции для подогрева приточного воздуха с гармонически изменяющейся температурой. Они также не распространяются на ВГТО нетрадиционных конструкций (многотрубных, со сложной формой каналов, энергетических свай).

Так как температура теплоносителя в системах отопления и горячего водоснабжения (ГВС) выше температуры источника теплоты грунта, то для ее утилизации используются тепловые насосы, наиболее распространенным типом которых являются парокомпрессионные. Существующие методы их анализа (работы Быкова А. В., Абдульманова Х. А., Клепанды А. С., Володина В. И., Калниня И. М.), как правило, ограничиваются косвенным учетом параметров источника и потребителя теплоты и требуют дополнения соответствующими связями.

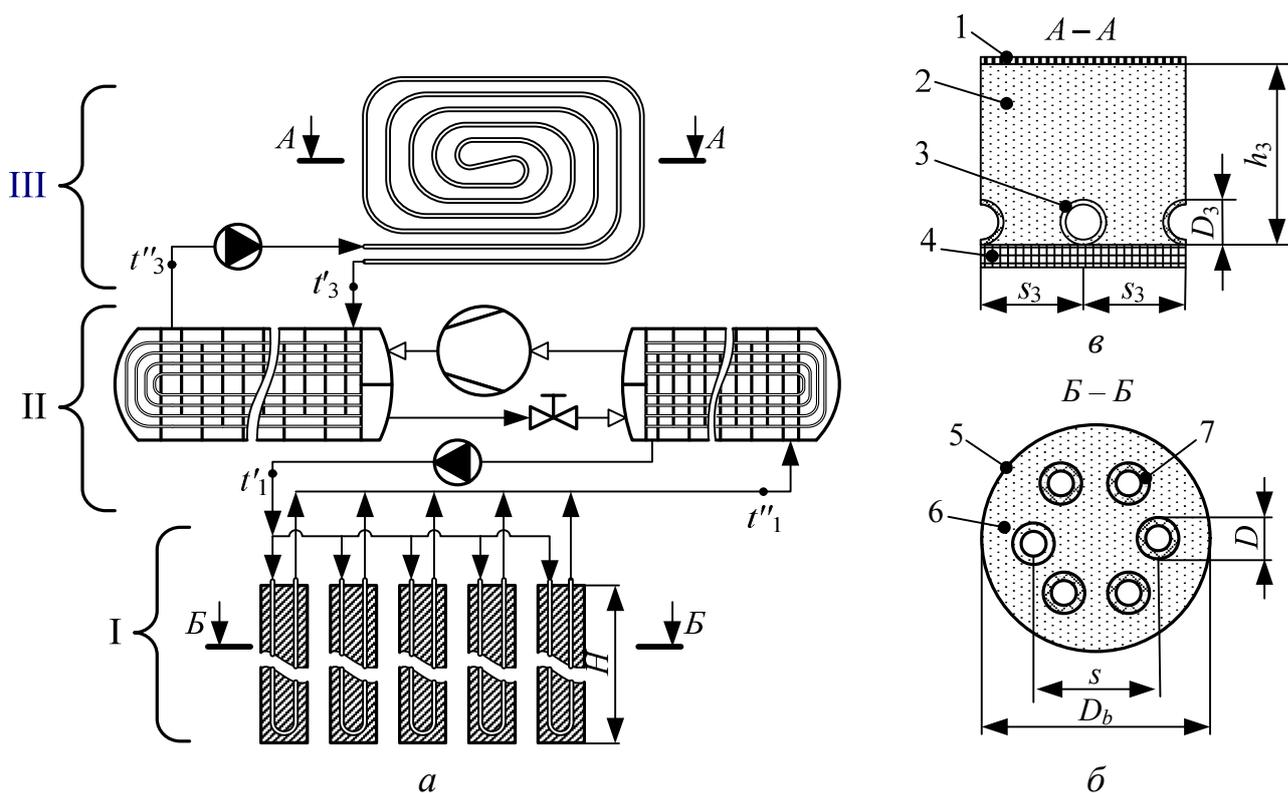
Использование методов анализа с подробным рассмотрением только одного элемента теплонасосного теплоснабжения не может дать однозначного ответа о влиянии различных факторов на эффективность работы всей системы в целом и целесообразности ее применения. Учет связей между элементами такой системы частично реализован в работах Мацевитого Ю. М., Тарасовой В. А., Харлампиди Д. Х., Шерстюка А. В., Костикова А. О., Hanuszkiewicz-Drapala M. Но в них учитываются ВГТО и энергетические сваи только с количеством U-образных труб не более двух, трубами Фильда, а параметры потребителя тепла учтены косвенно. Такие приближения не позволяют проводить полный анализ влияния на эффективность работы системы эксплуатационных и конструктивных параметров потребителя и источника теплоты, что необходимо для их проектирования и подбора, прогнозирования работы в нерасчетных условиях.

Таким образом, для обоснования внедрения эффективных теплонасосных систем теплоснабжения с использованием нетрадиционного источника – теплоты грунта – требуется: разработка комплексного метода численного анализа систем теплонасосного теплоснабжения, в котором учитывается взаимосвязь параметров источника теплоты, грунтовых теплообменников, теплового насоса и потребителя теплоты; подтверждение достоверности разработанного метода анализа; обосно-

вание на его основе рекомендаций по выбору эффективных систем с использованием нетрадиционного источника теплоты – грунта, что составляет задачу настоящего исследования.

Во второй главе описан разработанный комплексный двухуровневый метод численного анализа теплонасосной системы теплоснабжения для утилизации низкопотенциальной теплоты грунта, который, в отличие от известных, учитывает взаимосвязанную работу контуров грунтовых теплообменников, теплового насоса и потребителя теплоты. Первый уровень разработанного метода включает обобщенные методики расчета утилизационных грунтовых теплообменников и конечного потребителя тепла. Методика второго уровня предназначена для совместного численного анализа всех элементов исследуемой системы [1, 2, 5, 7].

Исследуемая базовая система (рисунок 1) состоит из вертикальных грунтовых теплообменников с циркулирующим раствором этиленгликоля, парокомпрессионного теплового насоса с хладагентом R134a, включающего горизонтальные кожухотрубные испаритель и конденсатор с U-образными трубами и сегментными перегородками, потребителем тепла – напольной системой отопления с теплоносителем вода.



I – контур грунтовых теплообменников; II – контур теплового насоса;
III – контур потребителя теплоты (система напольного панельного отопления);

1 – напольное покрытие; 2 – стяжка; 3 – труба; 4 – теплоизоляция;

5 – поверхность скважины; 6 – заполнитель скважины; 7 – U-образные трубы

Рисунок 1. – Схема теплонасосной системы теплоснабжения (а),
элементы сечения ВГТО (б) и отопительной панели (в)

Методика теплового анализа источника низкопотенциальной теплоты устанавливает закономерность изменения температур грунта и теплоносителя ВГТО. Перенос тепла в прилегающем к ВГТО грунте описывается уравнением теплопроводности:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right) \text{ при } 0 < \tau < \tau_{\text{оп}}, \frac{D_b}{2} > r > r_{\infty}, \quad (1)$$

где t – температура грунта, °С; τ – время, с; a – температуропроводность, м²/с; r – радиальная координата, м; $\tau_{\text{оп}}$ – продолжительность исследуемого (отопительного) периода, с; D_b – диаметр скважины, м; r_{∞} – удаленная область с постоянной температурой грунта, м.

Начальное условие соответствует постоянной температуре t_0 . На удалении от ВГТО ($r = r_{\infty}$) задается граничное условие первого рода – постоянная температура t_0 . Взаимодействие грунта с ВГТО учитывается граничным условием 3 рода:

$$\lambda \frac{\partial t}{\partial r} = \frac{t_b - \bar{t}_1}{\pi D_b R_b} \text{ при } r = 0,5 D_b, \quad (2)$$

где λ – теплопроводность грунта, Вт/(м·К); t_b – температура поверхности скважины, °С; $\bar{t}_1 = 0,5(t'_1 + t''_1)$ – средняя температура теплоносителя грунтового теплообменника, °С; t'_1 – температура теплоносителя на входе в ВГТО, °С; t''_1 – температура теплоносителя на выходе из ВГТО, °С; R_b – сопротивление теплопередаче ВГТО, м·К/Вт.

Уравнение теплопроводности решается методом конечных разностей с использованием средств программного комплекса MatLab. Особенность решения задачи заключается в определении сопротивления теплопередаче R_b грунтовых теплообменников нетрадиционного исполнения с количеством U-образных каналов более двух и полукольцевой формы [9, 10].

Считается, что значению t_b в каждый момент времени соответствует квазистационарный режим теплообмена в ВГТО. Связь параметров t'_1 , t''_1 , t_b и R_b устанавливается при решении задачи теплообмена в ВГТО.

При определении R_b рассматривается область заполнителя – протяженное тело, ограниченное изотермическими поверхностями: поверхностью скважины с температурой t_b ; наружной поверхностью нисходящих труб с температурой t_{p01} ; наружной поверхностью восходящих труб с температурой t_{p02} . Для двумерной области поперечного сечения такого тела (рисунок 2а) методом конечных элементов (в программе COMSOL Multiphysics) решается двумерное стационарное уравнение теплопроводности с соответствующими граничными условиями на поверхности скважины и труб. В результате определяются распределение температуры и линейные плотности тепловых потоков через поверхности скважины q , восходя-

щих q_I и нисходящих q_{II} труб. Применяя принцип электротепловой аналогии, принимаем для области заполнителя эквивалентную цепь в виде треугольника (рисунок 2б) и определяем термические сопротивления R_{g1} , R_{g2} и R_{g12} . При обобщении результатов такого численного эксперимента считается, что эти термические сопротивления зависят от теплопроводности и формы области заполнителя в соответствии с соотношениями:

$$R_{g1} = R_{g2} = (\lambda_g f_1)^{-1}, \quad R_{g12} = (\lambda_g f_{12})^{-1}, \quad (3)$$

где λ_g – теплопроводность заполнителя скважины, Вт/(м·К); f_1 , f_{12} – форм-факторы, зависящие от постоянных геометрического подобия области заполнителя s/D_b и D/D_b ; s – расстояние между осями противоположных ветвей U-образной трубы, м; D – диаметр трубы, м.

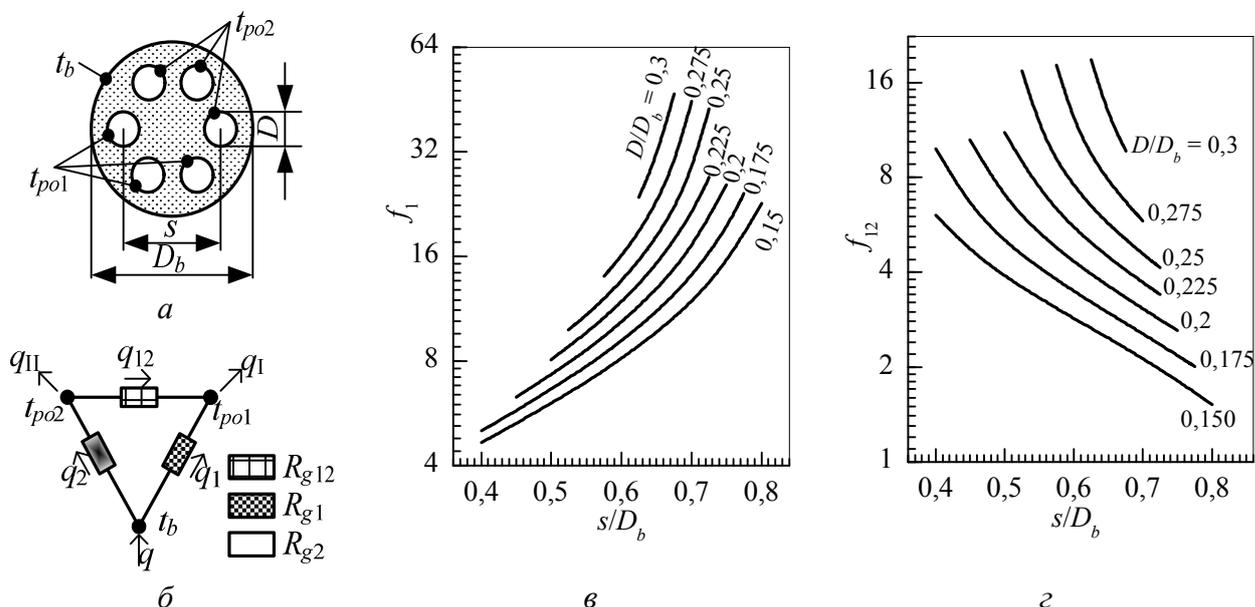


Рисунок 2. – Область заполнителя скважины (а), электротепловая аналогия переноса тепла в заполнителе (б) и зависимости форм-факторов f_1 (в) и f_{12} (з) от постоянных геометрического подобия ВГТО с тремя U-образными трубами

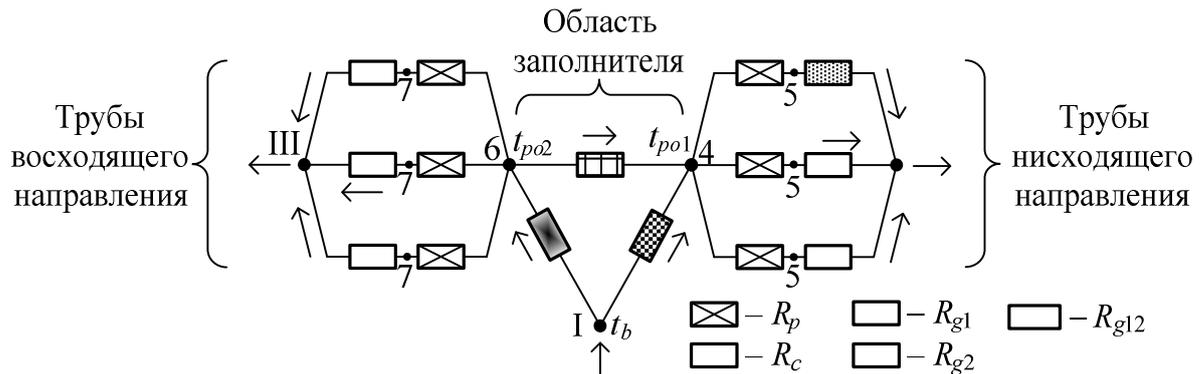
В результате обобщения результатов такого численного решения для ВГТО получены зависимости $f_1 = f(s/D_b, D/D_b)$ и $f_{12} = f(s/D_b, D/D_b)$, на рисунках 2в и 2з в качестве примера показаны результаты для трех U-образных труб.

Полученные зависимости форм-факторов используются для определения сопротивления теплопередаче ВГТО R_b , включающего также сопротивление стенок труб R_p и теплоотдаче R_c . Для определения R_b проведена модификация общего решения Eskilson P.¹, для этого принято приближение о постоянной температуре поверхности скважины по глубине z и использована расширенная эквивалентная цепь по рисунку 3, описывающая перенос тепла в поперечном сечении ВГТО ме-

¹ Eskilson, P. Thermal analysis of heat extraction boreholes. Doctoral thesis / P. Eskilson. – Lund: Lund University Press, 1987. – 222 p.

жду поверхностью скважины, восходящим и нисходящим потоком теплоносителя [4, 17].

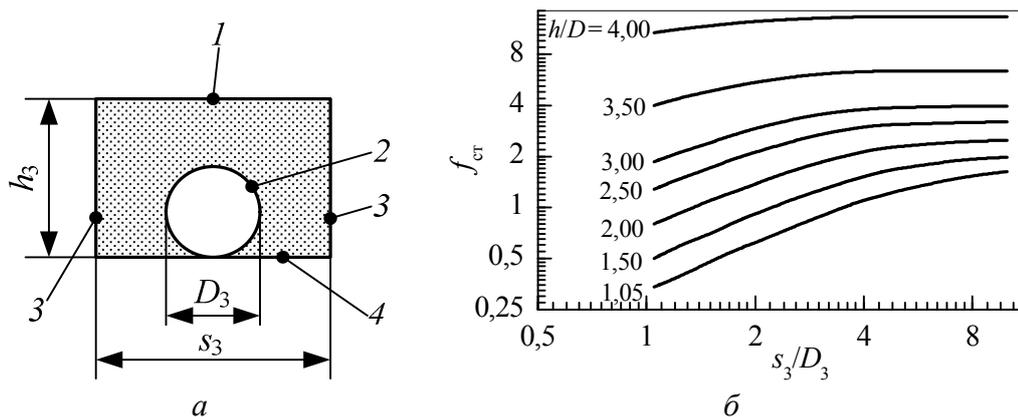
Цепь на рисунке 3 соответствует ВГТО с тремя U-образными трубами, аналогичный вид имеют эквивалентные цепи для одной, двух и четырех труб, где их количество соответствует количеству параллельных ветвей между узлами б и III, 4 и II. Стрелками указаны направления тепловых потоков. Разработанная методика применялась также для анализа энергетических свай, используемых для предварительного нагрева приточного воздуха систем вентиляции. При этом задается гармоническое изменение температуры приточного воздуха на входе t'_1 [3].



I – поверхность скважины; II – нисходящий поток теплоносителя; III – восходящий поток теплоносителя; 4 – наружная поверхность нисходящих труб; 5 – внутренняя поверхность нисходящих труб; 6 – наружная поверхность восходящих труб; 7 – внутренняя поверхность нисходящих труб

Рисунок 3. – Схема развернутой эквивалентной цепи для ВГТО с U-образными трубами

Аналогичный принцип использован при разработке методики для ВГТО с полукольцевыми каналами.



1 – поверхность контакта стяжки и напольного покрытия (изотермическая);
 2 – наружная поверхность труб (изотермическая); 3 – плоскости симметрии (адиабатные);
 4 – поверхность контакта с тепловой изоляцией (адиабатная);
 а – поперечное сечение области стяжки; б – зависимость f_{ct} от s_3/D_3 и h_3/D_3

Рисунок 4. – Зависимости форм-факторов и от постоянных геометрического подобия

Низкотемпературные теплонасосные системы отопления являются наиболее перспективными. В данном исследовании в качестве конечного потребителя теп-

лоты принята напольная система отопления. Схема элемента напольной системы дана на рисунках 1в и 4а и включает плоский змеевик для потока теплоносителя – горячая вода. Методика ее расчета аналогична методике численного анализа ВГТО. Рассматривается область стяжки как протяженное тело, ограниченное изотермическими и адиабатными поверхностями, как показано на рисунке 4а. Методом конечных элементов решается стационарное двумерное уравнение теплопроводности с соответствующими граничными условиями 1-го рода и адиабатными. Результаты решения, обобщенные в виде зависимости форм-фактора стяжки $f_{ст}$ от постоянных геометрического подобия s_3/D_3 и h_3/D_3 (рисунок 4б), используются для определения термического сопротивления стяжки, входящего в уравнение теплопередачи, решаемое совместно с уравнением теплового баланса для теплоносителя [8].

Методика второго уровня обеспечивает связь между тепловыми потоками источника, теплового насоса и потребителя тепла, что позволяет методом вложенных итераций определить температуры рабочих сред в характерных узлах контуров с учетом источника (температура грунта) и потребителя (температура воздуха помещения и горячей воды). Связующими элементами являются испаритель и конденсатор теплового насоса. В данном исследовании применяется локальный метод расчета этих аппаратов совместно с термодинамическими параметрами контура, что позволяет учесть режимные особенности процессов кипения и конденсации. В частности, решаемая система уравнений, описывающая работу испарителя, имеет вид:

$$dQ_e = G_1 c_1 dt_1, \quad (4)$$

$$dQ_e = \alpha_1 (t_1 - t_{w1}) dF_H, \quad (5)$$

$$dQ_e = G_2 r dx + G_2 c_2 dt_2, \quad (6)$$

$$dQ_e = k (t_1 - t_2) dF_B, \quad (7)$$

где Q_e – тепловой поток, Вт; t_1 – температура теплоносителя, °С; α_1 – коэффициент теплоотдачи со стороны теплоносителя, Вт/(м²·°С); t_{w1} – температура наружной поверхности труб, °С; F_H – площадь наружной поверхности труб, м²; G_2 – массовый расход хладагента, кг/с; r – теплота парообразования хладагента, Дж/кг; x – расходное массовое паросодержание хладагента; c_2 – теплоемкость хладагента, Дж/(кг·°С); t_2 – температура хладагента, °С; k – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·°С); F_B – площадь внутренней поверхности труб, м².

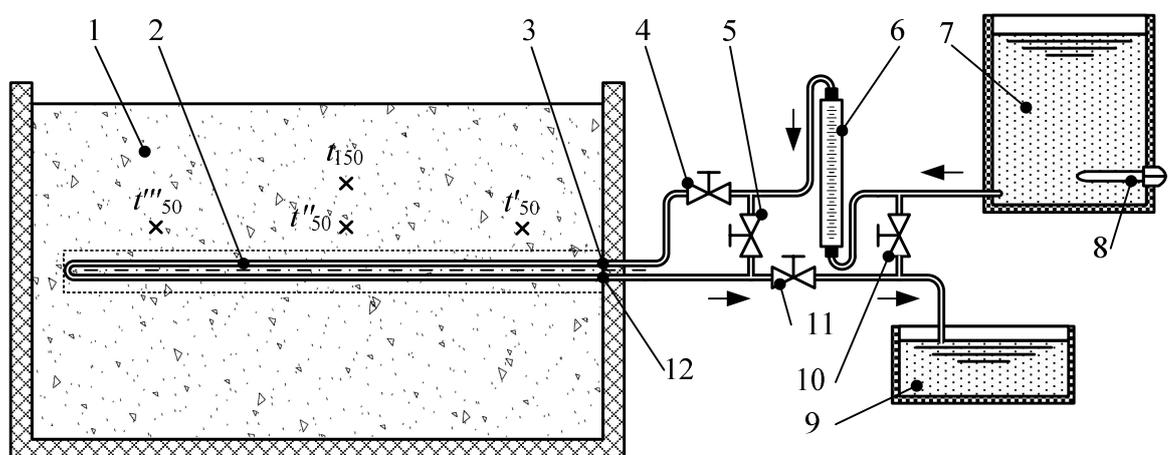
Система дополняется расчетом локальных коэффициентов теплоотдачи с учетом особенностей потока хладагента по ходу его течения. Уравнения для конденсатора имеют аналогичную структуру, как и система (4)–(8). Физические свой-

ства хладагента определяются по аппроксимированным справочным данным и с использованием уравнения состояния работ Span R. и Wagner W.

Численное решение замкнутой системы уравнений (для теплового насоса, источника и потребителя теплоты) проводится с использованием метода конечных разностей, касательных и хорд. Комплексный метод численного анализа реализован в виде компьютерной программы на языке программного комплекса MatLab [22].

Третья глава посвящена подтверждению достоверности разработанной численной методики совместного теплового анализа утилизационного теплообменника (ВГТО) и источника тепла (грунта) [9].

Существующие методики анализа ВГТО исходят из предположения постоянной или линейно изменяющейся температуры теплоносителя, постоянного во времени теплового потока ВГТО. Такие условия не всегда соответствуют действительному изменению температур теплоносителя и теплового потока при взаимодействии ВГТО с контуром теплового насоса и грунтом. Принципиальное отличие разработанной численной методики – возможность учета произвольного изменения во времени температуры и расхода теплоносителя, а соответственно и теплового потока грунтового теплообменника. Для экспериментального подтверждения достоверности результатов, полученных на ее основе, создана лабораторная установка (рисунок 5), позволяющая исследовать нестационарную работу моделей U-образных грунтовых теплообменников с одной и тремя U-образными трубами в песчаном массиве – ящике с сухим песком. Теплопроводность λ песка $0,393 \pm 0,012$ Вт/(м·К) определена с помощью прибора HFM 436 Lambda по стационарному методу плоского слоя. Значение температуропроводности песка $a = (3,50 \pm 0,12) \cdot 10^{-7}$ м²/с получено методом регулярного теплового режима Г. М. Кондратьева [9].

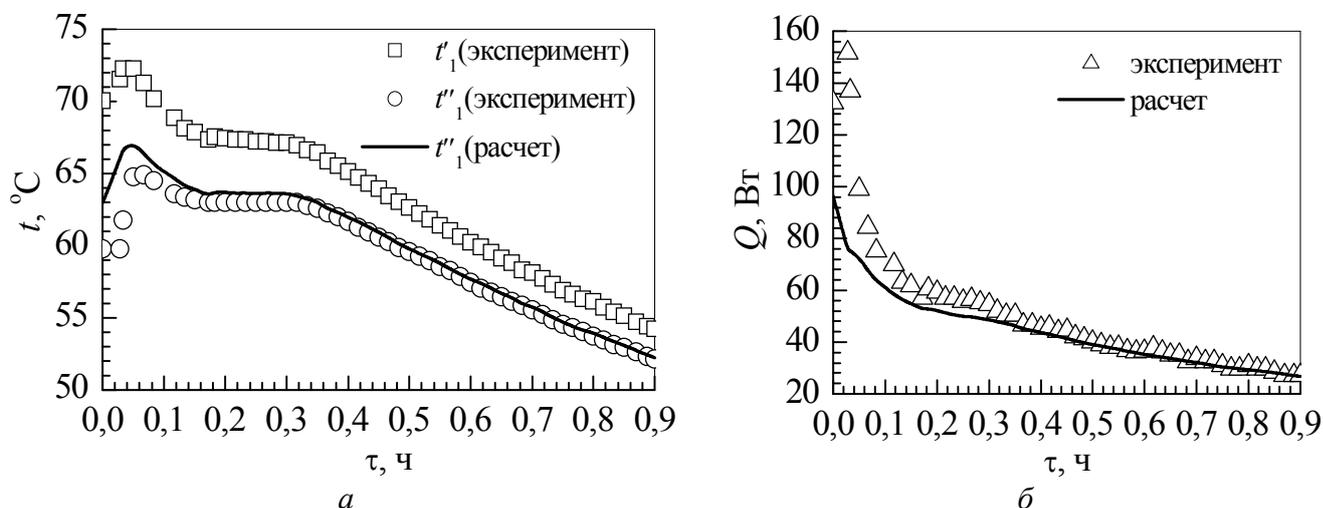


1 – грунтовая засыпка (песок); 2 – макет ВГТО; 3, 12 – датчики температур теплоносителя на входе и выходе U-образной трубки соответственно; 4, 5, 10, 11 – вентили; 6 – ротаметр; 7 – напорная емкость; 8 – электронагреватель; 9 – сборник воды; × – точки измерения температуры грунта

Рисунок 5. – Схема экспериментальной установки

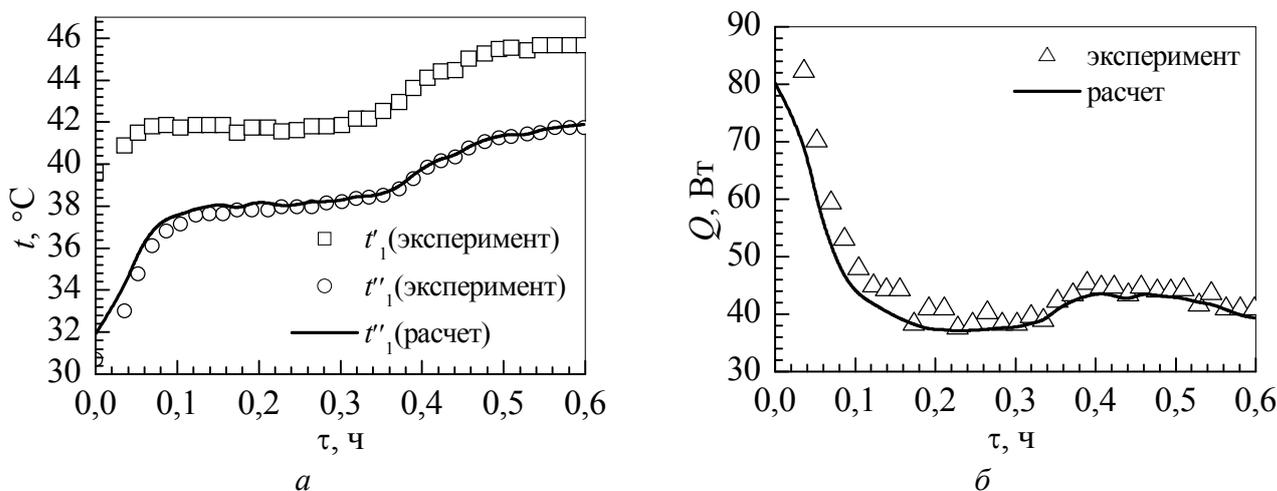
В установке из напорной емкости (термостат) самотеком по трубопроводам горячий теплоноситель (вода) с температурой t'_1 поступает в грунтовой теплообменник, размещенный в песке, где охлаждается до температуры t''_1 . Расход и температура теплоносителя изменяются во времени ($G \neq \text{const}$, $t'_1 \neq \text{const}$). Диапазон изменения температуры воды составляет $50\text{--}80^\circ\text{C}$. Для измерения расхода G используется ротаметр РМ-0,63ГУЗ, температуры теплоносителя измеряются платиновыми термопреобразователями сопротивления, как и температуры песка в точках, отмеченных на рисунке 3 маркерами «×». Сигнал от них обрабатывается измерителями «Сосна-003».

Результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных одного из экспериментов (опыты отличались характером изменения температуры и расхода воды) показаны на рисунке 6 для модели грунтового теплообменника с одной U-образной трубкой, а на рисунке 7 – с тремя.



a – изменение температуры теплоносителя; *б* – изменение теплового потока

Рисунок 6. – Изменение параметров модели однотрубного грунтового теплообменника



a – изменение температуры теплоносителя; *б* – изменение теплового потока

Рисунок 7. – Изменение параметров модели трехтрубного грунтового теплообменника

При начальном неупорядоченном режиме средние отклонения расчетных и экспериментальных данных во всех случаях для t''_1 составляли 1,1–2,7%, для теплового потока 4,3–14,2%, для температуры грунта 0,9–3,1%. В дальнейшем при продолжительной работе теплообменника отклонение теплового потока уменьшалось и составляло 3,0–4,5% в зависимости от режима. Соответствие опытных и расчетных данных было удовлетворительное.

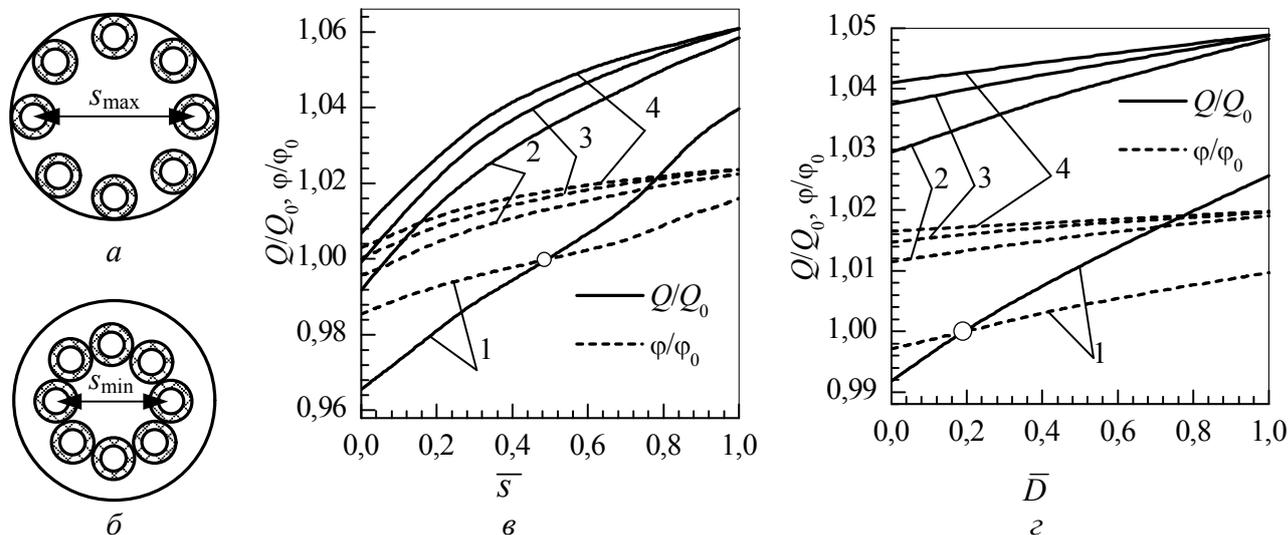
Дополнительно проводилось сравнение результатов численного анализа с данными моделирования по трехмерной модели других авторов (D. Bauer). Получено удовлетворительное согласование с некоторым расхождением результатов на начальном непродолжительном времени работы, составляющим 3 часа при работе ВГТО в течение отопительного сезона.

В четвертой главе приведены новые результаты об эффективности теплонасосной системы теплоснабжения, полученные с использованием разработанного численного метода анализа.

Базовый вариант системы теплонасосного теплоснабжения (см. рисунок 1) номинальной теплопроизводительностью $Q_0 = 11,42$ кВт и коэффициентом преобразования $\phi_0 = 3,93$ включает пять скважин с диаметром $D_b = 200$ мм и глубиной $H = 60$ м с температурой поверхности скважины и грунта $t_b = 5^\circ\text{C}$, в каждой из которых размещена U-образная полиэтиленовая труба 32×3 мм ($\lambda_p = 0,38$ Вт/(м·К)) с $s = 100$ мм. Заполнителем скважины является раствор на основе бентонита и цемента с теплопроводностью $\lambda_g = 2,3$ Вт/(м·К). Теплоноситель – водный раствор этиленгликоля. Потребитель тепла – низкотемпературное напольное отопление, содержащее отопительные панели в виде однониточного плоского змеевика из труб 32×3 мм с шагом $s_3 = 160$ мм и толщиной стяжки $h_3 = 70$ мм. Теплоноситель – вода. Площадь теплоотдающей поверхности пола (отопительных панелей) составляет $F = 384$ м² при площади отапливаемых помещений $F_{\text{оп}} = 450$ м². Температура воздуха помещений составляет 18°C .

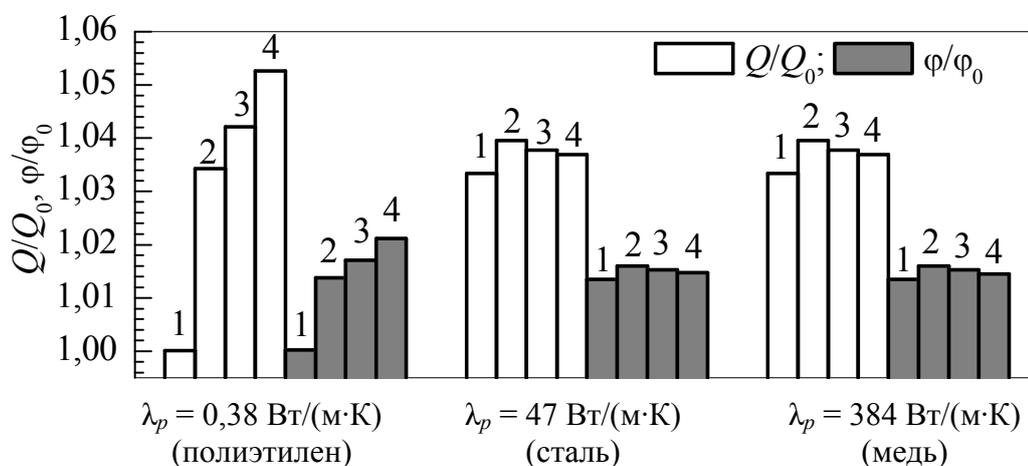
Изучено влияние количества, расположения и диаметра U-образных труб ВГТО с максимальным (рисунок 8а) и минимальным (рисунок 8б) возможным шагом s их размещения в скважине. Анализ результатов проводился по относительному изменению текущих значений Q и ϕ от безразмерных параметров $\bar{s} = (s - s_{\text{min}})/(s_{\text{max}} - s_{\text{min}})$ и $\bar{D} = (D - D_{\text{min}})/(D_{\text{max}} - D_{\text{min}})$, где D_{min} и D_{max} – минимальный и максимальный диаметр рассматриваемого диапазона, ограничивающийся количеством труб и диаметром скважины. Результаты на рисунках 8в и 8г свидетельствуют в возрастании Q и ϕ с ростом \bar{D} и \bar{s} , количества труб, что объясняется увеличением площади теплообмена и снижением толщины слоя заполнителя, а соответственно и сопротивления теплопередаче. Суммарный максимальный эффект увеличения Q и ϕ составляет 6 и 2% соответственно по сравнению с базовым вариантом. В сравнении с грунтовым теплообменником с одной U-образной тру-

бой с минимальным шагом и диаметром эффект увеличения Q и ϕ достигает 9 и 4% соответственно. Это указывает на преимущества использования ВГТО с увеличенным количеством U-образных труб при их максимальном диаметре и расположении вблизи поверхности скважины [6, 7, 11, 16, 24]. При использовании ВГТО с каналами полукольцевой формы получены сопоставимые параметры.



Цифрами указано количество U-образных труб; \circ – номинальное значение
Рисунок 8. – Предельные случаи расположения труб ВГТО в скважине (а, б) и влияние расстояния между противоположными ветвями (в) и диаметра (з)

U-образных труб ВГТО на Q/Q_0 и ϕ/ϕ_0



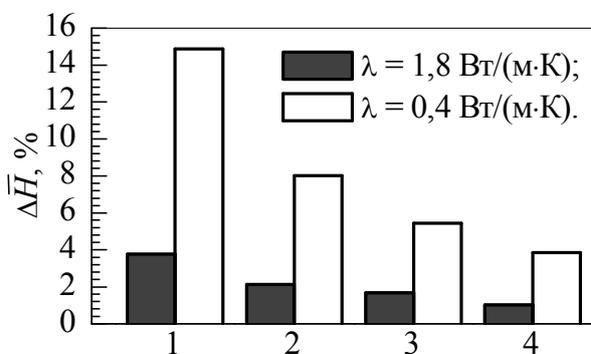
Цифрами указано количество U-образных труб
Рисунок 9. – Зависимость Q/Q_0 и ϕ/ϕ_0 от материала труб ВГТО

Проведен анализ взаимного влияния теплопроводности материала и количества труб ВГТО на параметры системы. Рассматривались полиэтиленовые, стальные и медные U-образные трубы. Из результатов на рисунке 9 видно, что увеличение количества полиэтиленовых U-образных труб заметно сказывается на теплопроизводительности системы Q в отличие от металлических. Рост их количества приводит к эквивалентной теплопроизводительности, что и с металлическими трубами. При переходе с двух металлических на три полиэтиленовые трубы затраты на них снижаются по сравнению со стальными трубами в 2,9 раза, а мед-

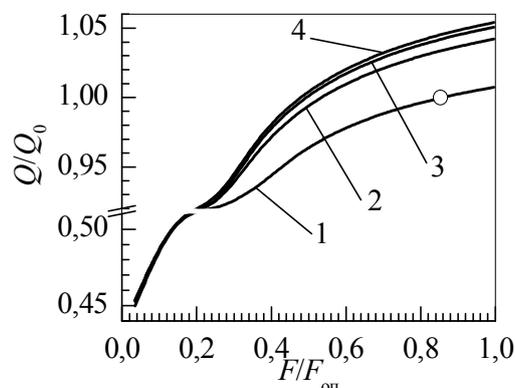
ными – в 17 раз. Это указывает на целесообразность применения ВГТО с увеличенным количеством полиэтиленовых труб.

Исследовано влияние на эффективность системы температуры источника теплоты грунта на поверхности скважины t_b . Получено, что снижение t_b от 8 до 0°C в течение отопительного периода приводит к падению теплопроизводительности Q до 30% и коэффициента преобразования φ до 10%. Эта особенность обусловлена отбором аккумулированного тепла в грунте и должна учитываться при проектировании и исследовании рассматриваемых систем [12].

С учетом этого фактора исследовано влияние теплопроводности заполнителя скважины λ_g на длину ВГТО. При этом определялась длина ВГТО H с необходимым запасом теплопроизводительности 30%. Рассмотрено два случая. В первом случае в качестве заполнителя используется распространённый материал с теплопроводностью $\lambda_g = 2,3$ Вт/(м·К). Во втором случае считается, что используется заполнитель на основе ранее извлеченного при бурении грунта и его теплопроводность соответствует средней теплопроводности прилегающего грунта ($\lambda_g = \lambda$) со свойствами $\lambda = 1,8$ Вт/(м·К), $a = 0,76 \cdot 10^{-6}$ м²/с и $\lambda = 0,4$ Вт/(м·К), $a = 0,28 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Результаты представлены на рисунке 10 в виде зависимости безразмерного параметра $\Delta \bar{H} = (1 - H/H_0) \cdot 100\%$, где H – длина ВГТО, соответствующая заполнителю с теплопроводностью, равной теплопроводности грунта, м; H_0 – длина ВГТО, соответствующая заполнителю с повышенной теплопроводностью (базовый вариант), м [2].



Цифрами указано количество U-образных труб
Рисунок 10. – Относительное снижение длины ВГТО за счет увеличения теплопроводности заполнителя



Цифрами указано количество U-образных труб; ○ – номинальное значение
Рисунок 11. – Зависимость Q/Q_0 от площади отопительных панелей

Видно, что применение высокотеплопроводного заполнителя для ВГТО с четырьмя трубами приводило к незначительному снижению длины на 1–4%. Для этого случая вместо дорогостоящих высокотеплопроводных заполнителей можно использовать заполнители на основе грунта, извлеченного при бурении.

Исследовано влияние параметров конечного потребителя теплоты на эффективность системы [8]. На рисунке 11 для случая напольного лучисто-конвективного отопления показаны результаты влияния на теплопроизводитель-

ность площади теплоотдающей поверхности пола F , которая на практике ограничена площадью помещения $F_{\text{оп}}$ ($F/F_{\text{оп}} < 1$). Видно, что снижение $F/F_{\text{оп}}$ от 1,0 до 0,3 сопровождается падением теплопроизводительности на $\approx 10\%$, а при снижении $F/F_{\text{оп}}$ ниже 0,3 наблюдается уменьшение теплопроизводительности практически вдвое. Характер изменения φ/φ_0 было аналогичным. Таким образом установлена минимальная площадь напольной отопительной панели, которая должна быть не менее 30% от общей площади пола.

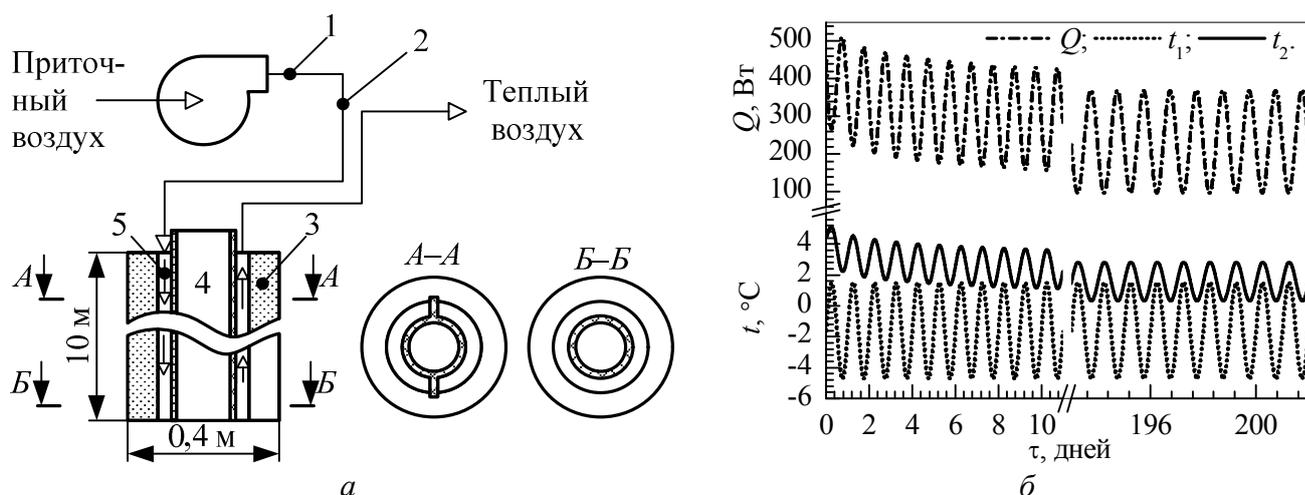
Для напольного отопления также получено, что изменение степени черноты теплоотдающей поверхности пола в диапазоне от 0,45 до 0,85 приводило к незначительному росту Q и φ .

Анализ влияния температурного уровня конечного потребителя показал, что уменьшению температуры воздуха помещения на 1°C соответствует увеличение Q на $\approx 0,8\%$ и φ на $\approx 1,1\%$. То есть, при проектировании следует ориентироваться на покрытие отопительных нагрузок помещений с допустимо низкими температурными режимами. В случае ГВС энергоэффективных жилых зданий целесообразно снижение температуры горячей воды с 55 до 45°C без ущерба для потребителя, что будет сопровождаться увеличением эффективности системы на $\approx 10\%$.

Аналогичные численные эксперименты проведены для систем теплонасосного теплоснабжения номинальной теплопроизводительностью в диапазоне $Q_0 = 10\text{--}50$ кВт, при этом воспроизводился характер изменения относительных параметров, рассмотренных выше. Получено, что при переходе от традиционных источников тепла (от котельной и ТЭЦ) к исследуемой теплонасосной системе достигается снижение потребления первичной энергии в количестве $0,41\text{--}0,43$ т у. т. на 1 кВт установленной мощности, что свидетельствует о ее энергетической эффективности.

Исследована эффективность применения энергетических свай с теплоносителем воздух в системе приточной вентиляции, в которой в холодный период года затрачивается теплота для подогрева приточного воздуха (рисунок 12а) [3, 20, 23]. Результаты анализа представлены на рисунке 12б. При анализе принималось гармоническое суточное изменение температуры атмосферного воздуха t'_1 на входе в энергетическую сваю со средним значением $-1,6^\circ\text{C}$ и амплитудой $6,2^\circ\text{C}$. При свойствах грунта $\lambda = 2$ Вт/(м·К), $a = 9,83 \cdot 10^{-7}$ м²/с и начальной температуре $t_0 = 8^\circ\text{C}$ в течение отопительного периода обеспечивался подогрев воздуха на $3\text{--}5^\circ\text{C}$. С течением времени тепловой поток и температура воздуха на выходе t''_1 снижались, но доля затрат электрической энергии на привод вентиляторов в тепловом потоке сваи в течение отопительного периода не превышала 2%. Также получено, что использование такой системы позволит сократить потребление тепловой энергии на $\approx 17\%$ по сравнению с подогревом воздуха теплотой от традиционных источников. Эти результаты были сопоставимы с параметрами системы с подог-

ревом воздуха в калорифере, соединенном в контур с жидкостной энергетической свайей.



1 – вентилятор; 2 – воздуховоды; 3 – полая свая; 4 – центральная труба; 5 – кольцевой канал

Рисунок 12. – Схема системы подогрева воздуха с использованием энергетической свай с теплоносителем воздух (а) и изменение параметров работы во времени (б)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1) Разработан двухуровневый численный метод анализа теплонасосной системы теплоснабжения с источником теплоты грунтом для исследования и теплового проектирования как системы в целом, так и нестационарного теплового режима вертикальных грунтовых теплообменников с увеличенным числом и полукольцевой формой каналов, и конечного потребителя теплоты – напольной системы отопления [1, 4, 9, 10, 17].

2) Метод анализа теплонасосной системы теплоснабжения, который учитывает взаимосвязанную работу грунтовых теплообменников, теплового насоса и потребителя теплоты в нестационарном режиме работы реализован в виде компьютерной программы [2, 5–8, 11, 13–16, 18, 19, 21, 22].

3) Экспериментально подтверждена достоверность метода численного анализа нестационарной работы грунтовых теплообменников с переменной температурой, расходом теплоносителя. Отклонение экспериментальных и численных данных теплового потока грунтового теплообменника при его продолжительной работе составляет 3,0–4,5% [9].

4) Исследованием установлено [6–8, 11, 12, 16, 24]:

– наибольшая эффективность системы достигается при использовании вертикальных грунтовых теплообменников с размещением U-образных труб по периметру наружной образующей скважины с максимально возможным количе-

ством и диаметром, это позволяет повысить теплопроизводительность теплового насоса на 9% в сравнении с использованием однотрубных вертикальных грунтовыми теплообменников традиционного исполнения;

- возможность использования извлеченного из скважины грунта в качестве заполнителя при монтаже вертикальных грунтовых теплообменников без существенного снижения (до 4%) параметров системы по сравнению с традиционным использованием заполнителей с большей чем у грунта теплопроводностью;

- целесообразность применения вертикальных грунтовых теплообменников с увеличенным количеством полиэтиленовых труб, что позволит увеличить теплопроизводительность системы до значений, что и с металлическими трубами, при снижении затрат по сравнению со стальными трубами в 2,9 раза, а медными – в 17 раз;

- сезонное уменьшение теплопроизводительности систем составляет до 30% в зависимости от климатических условий, что следует компенсировать увеличением длины ВГТО до 70%;

- в системе теплонасосного теплоснабжения целесообразно использовать низкотемпературную водяную систему отопления – теплый пол, что позволит по сравнению с высокотемпературной системой вдвое увеличить энергетическую эффективность. За отопительный сезон данная система позволит уменьшить потребление первичной энергии в количестве 0,41–0,43 т у. т. на 1 кВт установленной мощности;

- значение минимальной площади напольной системы отопления должно соответствовать не менее 30% от общей площади помещения.

5) Разработаны конструкции воздушных энергетических свай, которые обеспечивают подогрев приточного атмосферного воздуха на 3–5°C при затратах электроэнергии на привод вентиляторов до 2% от величины теплового потока, как и в аналогичных, но более сложных системах с калориферами и жидкостными энергетическими сваями и ВГТО. Применение таких систем позволяет до 17% сократить потребление теплоты за счет использования возобновляемой теплоты грунта [3, 20, 21, 23].

Рекомендации по практическому использованию

Разработанный метод комплексного анализа, компьютерная программа и рекомендации, могут быть использованы при проектировании и анализе нерасчетных режимов систем теплонасосного теплоснабжения и систем подогрева приточного воздуха с использованием теплоты грунта.

Метод численного анализа и результаты вычислительных экспериментов использованы в Республиканском унитарном предприятии «Институт жилища – НИПТИС им. Атаева С. С.» для определения оптимальных параметров энергетиче-

ческих свай с U-образными трубами для условий Республики Беларусь. Результаты работы использованы в проекте №00077154 ПРООН/ГЭФ «Повышение энергетической эффективности жилых зданий в Республике Беларусь» для анализа возможности применения тепловых насосов с утилизацией теплоты грунта для теплоснабжения энергоэффективных зданий.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи

1. Филатов, С. О. Работа теплообменников утилизации теплоты грунта / С. О. Филатов, В. И. Володин // Труды БГТУ. – 2011. – №3: Химия и технология неорганич. в-в. – С. 179–184.

2. Филатов, С. О. Численное моделирование совместной работы утилизатора теплоты грунта с теплоприемником / С. О. Филатов, В. И. Володин // Труды БГТУ. – 2012. – №3: Химия и технология неорганич. в-в. – С. 179–183.

3. Филатов, С. О. Эффективность использования энергетических свай с теплоносителем воздух в системах вентиляции и теплоснабжения / С. О. Филатов, В. И. Володин // Промышленная теплотехника. – 2013. – Т. 35. – №3. – С. 44–50.

4. Филатов, С. О. Тепловой расчет вертикальных грунтовых теплообменников / С. О. Филатов // Энергетика – Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2013. – № 4. – С. 81–90.

5. Филатов, С. О. Метод расчета и анализ совместной работы контура циркуляции грунтовых теплообменников и теплового насоса / С. О. Филатов, В. И. Володин // Труды БГТУ. – 2013. – № 3: Химия и технология неорганич. в-в. – С. 161–165.

6. Филатов, С. О. Численное моделирование и анализ энергетических параметров теплового насоса с многотрубными вертикальными грунтовыми теплообменниками / С. О. Филатов // Экология и промышленность. – 2013. – № 3. – С. 61–66.

7. Филатов, С. О. Влияние параметров энергетических свай на работу теплового насоса системы теплоснабжения здания / С. О. Филатов // Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць. – Вип. 77. – Киев: ДП НДІБК, 2013. – С. 131–135.

8. Филатов, С. О. Влияние параметров источника теплоты грунта и потребителя на характеристики теплонасосной системы теплоснабжения / С. О. Филатов, В. И. Володин // Труды БГТУ. – 2014. – №3: Химия и технология неорганических веществ. – С. 110–116.

9. Филатов, С. О. Численное и экспериментальное исследование нестационарной работы U-образного вертикального грунтового теплообменника / С. О. Филатов // Энергетика – Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2014. – № 6. – С. 60–72.

Статьи в научных сборниках

10. Филатов С. О. Исследование работы грунтового теплообменника теплового насоса / С. О. Филатов // Радиотехника, электротехника и энергетика: труды Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 2 т. – Томск, 6-8 октября 2011 г.: Томский политехнический университет. Т.2. – Энергетика. Инновационные научно-образовательные технологии в энергетике. – С. 19–22.

11. Филатов, С. О. Численное моделирование и анализ энергетических параметров теплового насоса с многотрубными вертикальными грунтовыми теплообменниками / С. О. Филатов // Инновационные пути модернизации базовых отраслей промышленности, энерго- и ресурсосбережение, охрана окружающей природной среды: сборник трудов II Межотраслевой научно-практической конференции молодых ученых и специалистов, 27–28 марта 2013 г., г. Харьков / ГП «УкрНТЦ «Энергосталь». – Харьков: НТМТ, 2013. – С. 30–36.

12. Филатов С. О. Влияние теплофизических характеристик грунта на размеры вертикальных грунтовых теплообменников тепловых насосов / С. О. Филатов // Инновационные разработки в области техники и физики низких температур. III Международная конференция с элементами научной школы для молодежи: сборник научных трудов – Москва: Университет машиностроения, 2014. – С. 74–77.

Материалы научных конференций и тезисы докладов

13. Филатов, С. О. Численное моделирование контура испарителя и грунтового теплообменника / С. О. Филатов, В. И. Володин // XIV Минский международный форум по тепло- и массообмену: тезисы докладов и сообщений. В 2 т. – Минск, 10–13 сентября 2012 г.: Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси. Т. 2. – Ч. 1. – С. 177–181.

14. Филатов, С. О. Численное моделирование контура испарителя и грунтового теплообменника / С. О. Филатов, В. И. Володин // Теплообмен ММФ–2012: – Теплообмен в энергетических устройствах [Электронный ресурс]. – Минск, 2012.

15. Филатов С. О. Совместная работа утилизатора теплоты грунта с теплоприемником / С. О. Филатов, В. И. Володин // Химическая технология и техника: тезисы 76-й науч.-технич. конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов, Минск, 13-20 февраля 2012 г. [Электронный ресурс]. – Минск: БГТУ, 2012. – С. 21.

16. Филатов С. О. Анализ энергетических параметров теплового насоса с вертикальными грунтовыми теплообменниками / С. О. Филатов // Теплоэнергетика // Восьмая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2013»: Материалы конференции. В 7 т. Т. 1,

Ч. 2 – Иваново: ФГБОУ ВПО Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина, 2013. – С. 47–51.

17. Филатов С. О. Тепловой расчет многотрубных грунтовых теплообменников / С. О. Филатов // Теплоэнергетика // Восьмая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2013»: Материалы конференции. В 7 т. Т. 1, Ч. 2 – Иваново: ФГБОУ ВПО Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина, 2013. – С. 51–55.

18. Филатов С. О. Метод расчета совместной работы контура циркуляции грунтовых теплообменников и теплового насоса / С. О. Филатов, В. И. Володин // Химическая технология и техника: тезисы 77-й науч.-технич. конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов, Минск, 4-9 февраля 2013 г. [Электронный ресурс] – УО «БГТУ». – Минск: БГТУ, 2013. – С. 38

19. Филатов С. О. Грунтовая теплонасосная система для теплоснабжения здания / С. О. Филатов, В. И. Володин // Химическая технология и техника: тезисы 78-й науч.-техн. конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 3–13 февраля 2014 г. [электронный ресурс]. – Минск: БГТУ, 2014. – С. 29.

Патенты, компьютерные программы

20. Энергетическая свая: пат. 9186 Респ. Беларусь, МПК Е 04D 5/22, F 24D 11/00 / С. О. Филатов, В. Б. Кунтыш, В. И. Володин; заявитель Бел. гос. технол. ун-т. № и 20120992; заявл. 15.11.2012.

21. Реверсивный трансформатор теплоты: пат. 10136 Респ. Беларусь, МПК F 24D 11/02, F 25B 13/00, F 25B 29/00 / С. О. Филатов, В. Б. Кунтыш, В. И. Володин; заявитель Бел. гос. технол. ун-т. № и 20130840; заявл. 24.10.2013.

22. Свидетельство № 690 Республика Беларусь. Программа расчета теплонасосной системы утилизации низкопотенциальной теплоты грунта: свидетельство о регистрации компьютерной программы / С. О. Филатов, В. И. Володин; заявитель и правообладатель Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет». – № С20140030; заявл. 16.04.2014; зарегистр. 25.07. 2014.

23. Энергетическая свая: пат. 10579 Респ. Беларусь, МПК F 24D 11/00, F 24D 21/00 / С. О. Филатов, В. Б. Кунтыш, В. И. Володин; заявитель Бел. гос. технол. ун-т. № и 20140289; заявл. 06.08.2014.

24. Вертикальный грунтовой теплообменник: пат. 10738 Респ. Беларусь, МПК F 28C 3/00 / С. О. Филатов, В. Б. Кунтыш, В. И. Володин; заявитель Бел. гос. технол. ун-т. № и 20140481; заявл. 30.12.2014.

РЭЗІЮМЭ
Філатаў Святаслаў Алегавіч
Павышэнне эфектыўнасці сістэм цеплазабеспячэння
на аснове выкарыстання цеплыні грунту

Ключавыя словы: цеплыня грунту, цеплавая помпа, сістэма цеплазабеспячэння, вертыкальны грунтавы цеплаабменнік, энергетычная паля, вентыляцыя.

Мэта работы: выбар і абгрунтаванне эфектыўных цеплапомпавых сістэм цеплазабеспячэння з выкарыстаннем нетрадыцыйнай крыніцы цяпла – цеплыні грунту на аснове распрацаванага метада лічбавага аналізу.

Метады даследавання. Выкарыстоўваліся метады тэорыі падобнасці, лічбавыя метады рашэння нелінейных сістэм раўнанняў, метады канечных рознасцяў і канечных элементаў, электрацеплавой аналогіі. Эксперымент праводзіўся з вымярэннем тэмпературы вады і грунту тэрмометрамі супраціўлення, масавага расхода – з выкарыстаннем ратаметра, тэмператураправоднасць пяску вызначана метадам рэгулярнага рэжыма, цеплаправоднасць – стацыянарным метадам плоскага слоя.

Атрыманыя вынікі і іх навізна. Распрацаваны комплексны метады аналізу цеплапомпавай сістэмы цеплазабеспячэння на аснове утылізацыі нізкапатэнцыйнай цеплыні грунту, які ўлічвае ўзаемадзеянне контура грунтавых цеплаабменнікаў, цеплавой помпы і спажыўца цеплыні. Метады аналізу рэалізаваны ў выглядзе камп'ютарнай праграмы. Распрацаваная эксперыментальная устаноўка, з дапамогай якой праведзена даследаванне нестацыянарнай работы грунтавых цеплаабменнікаў для пацвярджэння дакладнасці распрацаванага метады аналізу. Даследаваны ўплыў на эфектыўнасць работы ўсёй сістэмы параметраў крыніцы і спажыўца цеплыні: канструктыўных параметраў і цеплафізічных ўласцівасцяў матэрыялаў грунтавых цеплаабменнікаў, ступені чарнаты і плошчы цеплаабменная паверхні напольнага ацяплення. Атрыманы дадзеныя аб эфектыўнасці сістэм падагрэву прыточнага халоднага паветра ў паветраных энергетычных палях.

Рэкамендацыі па выкарыстанні. Вынікі даследавання моцць быць выкарыстаны пры праектаванні і аналізе эфектыўнасці сістэм цеплазабеспячэння з утылізацыяй цеплыні грунту.

Вобласць выкарыстання: праектаванне сістэм цеплазабеспячэння з цеплавымі помпамі з утылізацыяй цеплыні грунтавымі цеплаабменнікамі, сістэм вентыляцыі з падагрэвам прыточнага паветра.

РЕЗЮМЕ

Филатов Святослав Олегович

Повышение эффективности систем теплоснабжения на основе использования теплоты грунта

Ключевые слова: теплота грунта, тепловой насос, система теплоснабжения, вертикальный грунтовой теплообменник, энергетическая свая, вентиляция.

Цель работы: выбор и обоснование эффективных теплонасосных систем теплоснабжения с использованием нетрадиционного источника – теплоты грунта на основе разработанного метода численного анализа.

Методы исследования. Применялись методы теории подобия, численные методы решения систем нелинейных уравнений, методы конечных разностей и конечных элементов, электротепловой аналогии. Эксперимент проводился с измерением температуры воды и грунта термометрами сопротивления, массового расхода – с использованием ротаметра, температуропроводность песка определена методом регулярного режима, теплопроводность – стационарным методом плоского слоя.

Полученные результаты и их новизна. Разработан комплексный метод анализа теплонасосной системы теплоснабжения на основе утилизации низкопотенциальной теплоты грунта, учитывающий взаимодействие контура грунтовых теплообменников, теплового насоса и потребителя тепла. Метод анализа реализован в виде компьютерной программы. Разработана экспериментальная установка, с помощью которой проведено исследование нестационарной работы грунтовых теплообменников для подтверждения достоверности разработанного метода анализа. Исследовано влияние на эффективность работы всей системы параметров источника и потребителя тепла: конструктивных параметров и теплофизических свойств материалов грунтовых теплообменников, температурного уровня конечного потребителя тепла, степени черноты и площади теплоотдающей поверхности напольного отопления. Получены данные об эффективности систем подогрева приточного холодного воздуха в воздушных энергетических сваях.

Рекомендации по использованию. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании и анализе эффективности систем теплоснабжения с утилизацией теплоты грунта.

Область применения: проектирование систем теплоснабжения с тепловыми насосами с утилизацией теплоты грунтовыми теплообменниками, систем вентиляции с подогревом приточного воздуха.

SUMMARY

Filatau Sviataslau Alehavich

Improvement of the effectiveness of heat supply systems based on ground heat using

Keywords: ground heat, heat pump, heat supply system, borehole heat exchanger, energy pile, ventilation.

Purpose of work: choice and substantiation of efficient heat pump heating systems using unconventional sources – soil heat based on numerical analysis method.

Research methods. Method of similarity theory, numerical methods for solving of systems of nonlinear equations, finite difference and finite elements methods, method of electro-thermal analogy was used. The experiment was conducted with the measurement of temperature of water and soil with resistance thermometers, mass flow – using rotameter, thermal diffusivity of sand determined by the method of regular regime, the thermal conductivity – by stationary method of a flat layer.

Obtained results and their novelty. Complex method of analysis of the heat pump heating system based on the utilization of low-grade heat of soil has been developed which takes into account interaction of ground heat exchangers, heat pump and heat consumer. Method of analysis realized in a computer program. The experimental installation was developed with which investigated transient operation of ground heat exchangers to verify the validity of the developed analysis method. Influence on the performance of system of parameters of the heat source and consumer was investigated: design parameters and thermal properties of materials of ground heat exchanger, the temperature level of the heat consumer, degree of blackness and heat-transfer surface area of the floor heating. Data about the effectiveness of preheating of supply cold air in the air energy piles was obtained.

Degree of use: The results can be used for the design and analysis of the effectiveness of heat supply systems with recovery of soil heat.

The field of application: Design of heat supply systems with heat pumps with heat recovery by ground heat exchangers, ventilation systems with preheating of supply air.

Научное издание

Филатов Святослав Олегович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ
НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОТЫ ГРУНТА**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

Ответственный за выпуск С. О. Филатов

Подписано в печать 21.09.2015. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 1,5. Уч.-изд. л. 1,5.
Тираж 60 экз. Заказ 414.

Издатель и полиграфическое исполнение:
УО «Белорусский государственный технологический университет»
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
Изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/227 от 20.03.2014.
Ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск.