

На правах рукописи



**Журмилова Ирина Александровна**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ ТЕПЛО- И ХОЛОДОСНАБЖЕНИЯ  
ЗДАНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГРУНТОВЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ**

05.23.03 – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха,  
газоснабжение и освещение

**АВТОРЕФЕРАТ**  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Пенза 2016 г.

Диссертация выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Дальневосточный федеральный университет».

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент  
**Штым Алла Сильвестровна**

Официальные оппоненты – **Васильев Григорий Петрович**,  
доктор технических наук,  
научный руководитель группы компаний  
ОАО «ИНСОЛАР-ИНВЕСТ», г. Москва

– **Чекардовский Михаил Николаевич**,  
доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры «Теплогасоснабжение и  
вентиляция» ФГБОУ ВО «Тюменский  
индустриальный университет», г. Тюмень

Ведущая организация – ФГБОУ ВО «Иркутский национальный  
исследовательский технический университет»,  
г. Иркутск

Защита состоится «25» ноября 2016 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.184.02 на базе ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства» по адресу: 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28, 1 корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Пензенского государственного университета архитектуры и строительства и на сайте <http://dissovet.pguas.ru/>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



М.В. Бикунова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Одно из направлений энергетической политики России - использование возобновляемых источников энергии. Создание правовых, экономических и организационных основ стимулирования энергосбережения и повышения энергетической эффективности регламентируется федеральным законом №261-ФЗ от 23 ноября 2009 года.

Необходимость развития возобновляемой энергетики по всему миру, обсуждалась в Париже на 21-ой конференции (Рамочная конвенция ООН об изменении климата и 11-ая – в рамках совещания сторон по Киотскому протоколу), проходившей в период с 30 ноября – 12 декабря 2015 года.

Одним из перспективных, энергосберегающих и надежных вариантов для целей тепло- и холодоснабжения зданий и сооружений является применение геотермальных тепловых насосов, работающих на низкопотенциальной энергии грунта, что способствует снижению использования традиционных источников энергии.

Для России применение таких установок перспективно, так как значения коэффициента трансформации геотермальных теплонасосных систем теплоснабжения достаточно высокие: 4,14 на юге, 2,73 на севере, 3,2 – 3,4 для средней полосы России и 3,5 для районов Дальнего Востока.

Следовательно, совершенствование работы систем тепло- холодоснабжения на базе геотермальных тепловых насосов, использующих низкопотенциальную энергию грунта, является актуальной задачей. Ввиду того, что на сегодняшний день около 50% единовременных денежных затрат приходится именно на грунтовые теплообменники, то необходимо решать вопросы, связанные с повышением эффективности их работы и способствующие снижению капиталовложений.

**Степень разработанности темы исследования.** В работах зарубежных авторов, J. Lund, B. Sanner, L. Rybach, R. Curtis, G. Hellstrom и др., приведены примеры практической реализации использования грунтовых теплообменников для геотермальных тепловых насосов. Помимо этого, в работах этих и других авторов T. Kurevija, D. Vulin, V. Крапес, H.J. Zeng, N.R. Diao, Z.H. Fang встречаются разработки математических моделей работы грунтовых теплообменников. J.D. Spitler, J.R. Cullin, E. Lee, D.E. Fisher исследовали работу U-образных грунтовых теплообменников на базе созданных для расчета специальных компьютерных программ.

Среди российских авторов, исследования, посвященные оценке эффективности и возможности внедрения систем, использующих низкопотенциальную теплоту грунта для целей теплоснабжения зданий и сооружений на территории России, можно найти в работах Г.П. Васильева, Н.В. Шилкина, В.Я. Федянина, В.А. Бутузова. Совершенствование как самих систем извлечения низкопотенциальной теплоты грунта, так и методик их расчета, построение математических моделей, встречается в работах Е.А. Ададунова, К.Н. Сотниковой, А.А. Гришкова, В.М. Кротова.

**Цель работы** - разработка эффективных технических решений для систем сбора низкопотенциальной энергии грунта (СНЭГ) и методики расчета грунтовых теплообменников U-образного типа с возможностью учета индивидуальных особенностей объекта строительства.

Для достижения цели в работе поставлены следующие **задачи**:

1. Провести исследования свойств альтернативного наполнителя и оценить возможность его применения в скважинах с грунтовыми теплообменниками.
2. Разработать физико-математическую модель работы U-образного грунтового теплообменника.
3. Для исследования процессов теплообмена при работе грунтовых теплообменников и проверки достоверности математической модели разработать имитационную установку грунтового теплообменника.
4. Разработать методику расчета вертикальной системы СНЭГ, учитывающую индивидуальные особенности объекта проектирования.
5. Разработать новую эффективную конструкцию грунтового теплообменника.
6. Разработать рекомендации для проектирования систем тепло- и холодоснабжения зданий на базе геотермальных тепловых насосов в сочетании с грунтовыми теплообменниками.

**Научная новизна** работы состоит в следующем:

1. Предложены зависимости, описывающие влияние влажности и плотности песка на его коэффициент теплопроводности, температуропроводность и теплоемкость.
2. Разработана математическая модель процесса теплообмена между массивом грунта, наполнителем и U-образным грунтовым теплообменником, позволяющая рассчитать количество извлекаемой энергии, в зависимости от теплофизических характеристик массива грунта, наполнителя скважины, материала труб теплообменника и типа теплоносителя.
3. На основе экспериментальных исследований, проведенных на имитационной модели, установлен характер влияния эксплуатационных характеристик грунтовых теплообменников и теплофизических свойств наполнителя скважины на процесс теплообмена.
4. Разработана методика расчета для вертикальных грунтовых теплообменников и для определения расстояния между скважинами в системе сбора низкопотенциальной энергии грунта.
5. Разработана программа для определения количества теплоты, извлекаемой грунтовым теплообменником из массива грунта, параметров теплоносителя и расстояния между скважинами в системе сбора низкопотенциальной энергии грунта (свидетельство РФ № 2016614307).
6. Предложена новая конструкция геотермального устройства с повышенной теплопроизводительностью (патент РФ № 2529850).

**Теоретическая и практическая значимость работы.**

Приведено математическое описание процесса теплообмена при извлечении низкопотенциальной энергии грунта U-образным грунтовым теплообменником с

учетом теплофизических свойств наполнителя скважины. Разработана методика и номограмма для определения количества скважин и расстояния между ними в вертикальной системе СНЭГ, в зависимости от продолжительности отопительного периода, теплофизических свойств грунтового массива и параметров теплоносителя.

Получены зависимости и построены номограммы, для определения коэффициента теплопроводности, температуропроводности и теплоемкости песка при различной его влажности и плотности.

Результаты исследований, полученные соискателем, использованы: при проектировании систем тепло- и холодоснабжения, в том числе и систем СНЭГ, для следующих объектов: демонстрационно-выставочный энергоэффективный «Экодом» по ул. Бородинская, 14 в г. Владивостоке; индивидуальный жилой дом по ул. Земляничная, 17 в г. Владивостоке; индивидуальный жилой дом по ул. Главная, 23е в г. Владивостоке.

**Методология и методы исследования.** Работа выполнена с применением аналитического обобщения научных и технических решений, патентно-информационного анализа проблемы, методов математического моделирования, планирования эксперимента и статистической обработки экспериментальных данных. Теоретической и методологической базой диссертационной работы являются законы и методы теории теплообмена.

**Положения, выносимые на защиту:**

- математическая модель процесса теплообмена между массивом грунта, наполнителем и U-образным грунтовым теплообменником;
- результаты экспериментальных исследований процесса теплообмена при эксплуатации грунтового теплообменника, полученные на имитационной модели;
- методика для расчета вертикальной системы сбора низкопотенциальной энергии грунта;
- программа для определения количества теплоты, извлекаемой грунтовым теплообменником из массива грунта, параметров теплоносителя и расстояния между скважинами в системе сбора низкопотенциальной энергии грунта (свидетельство РФ № 2016614307);
- новая конструкция геотермального устройства с повышенной теплопроизводительностью (патент РФ № 2529850).

**Степень достоверности** полученных в работе результатов обеспечивается корректным применением фундаментальных методов теории теплообмена для разработки математических моделей; использованием метрологически поверенного оборудования и измерительных приборов, обеспечивающих достаточную точность измерения; математическими методами планирования эксперимента и обработки экспериментальных данных; сходимостью теоретических результатов и экспериментальных данных.

**Апробация результатов работы.** Основные положения и результаты исследований по теме диссертации докладывались и обсуждались на: IX Международной научно-практической конференции в г. Пенза (2009-2010 гг.); региональных научно-практических конференциях «Молодежь и научно –

технический прогресс» в г. Владивосток (2009-2011 гг.); конференции «Вологдинские чтения» в г. Владивосток (2009 г.); VII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодёжь и наука» в г. Красноярск (2011 г.); Всероссийской молодежной научно-практической конференции с международным участием «Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке» г. Хабаровск (2011 г.); Всероссийской молодежной конференции «Пути совершенствования работы теплоэнергетических устройств», г. Владивосток (2012 г.); Международной научной конференции «Современные технологии и развитие политехнического образования», г. Владивосток (2015 г.); Международная научная конференция «Молодые исследователи – регионам», г. Вологда (2016 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликованы 15 работ, в том числе три статьи в журналах рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, получен один патент на изобретение, один патент на полезную модель и одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Объем и структура диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы и трёх приложений. Работа содержит 138 страниц машинописного текста, 45 рисунков, 20 таблиц, список литературы из 115 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи, отражены научная новизна работы, теоретическая и практическая значимость результатов исследований, их достоверность и область применения.

**В первой главе** на основе аналитического обзора работ российских и зарубежных исследователей в области использования низкопотенциальной энергии массива грунта в геотермальных теплонасосных системах тепло - и холодоснабжения зданий и сооружений, сделаны выводы: существующий подход при проектировании этих систем не учитывает индивидуальные особенности района строительства; отсутствуют данные о необходимом расстоянии между скважинами с грунтовыми теплообменниками, учитывающие разнообразие теплофизических свойств массива грунта и возможные режимы эксплуатации теплообменного оборудования; недостаточно изучен вопрос о свойствах наполнителей скважин и отсутствует методика расчета грунтового теплообменника U-образного типа с учетом наполнителя скважин.

При сравнительном анализе грунтовых теплообменников установлено, что значительные преимущества имеет вертикальный, как наиболее стабильный, эффективный, и обладающий меньшими ограничениями по практическому применению.

Также исследованы свойства рекомендуемого наполнителя для скважин с грунтовыми теплообменниками – бентонита, обозначены проблемы его применения, в связи с которыми возникла потребность в поиске альтернативного материала при практической реализации этих систем.

**Во второй главе** проведено исследование теплофизических свойств наполнителей для скважин с грунтовыми теплообменниками.

Исходя из опыта реализации вертикальных систем СНЭГ и исследований свойств бентонита, определены требования, которым должен отвечать альтернативный наполнитель скважин: равномерное заполнение всего свободного пространства в скважине; плотный контакт с массивом грунта и трубами грунтового теплообменника; коэффициент теплопроводности не менее 0,8 Вт/(м·К); легкодоступный материал; низкая стоимость.

Рассмотрено несколько вариантов: два крайних случая, когда скважина заполнена сухим песком или водой, и промежуточные варианты - наполнителем является увлажненный песок и водно-песчаный раствор.

Теплофизические свойства сухого песка не удовлетворяет ряду требований для наполнителя скважины, но исследования Б.Н. Кауфмана, А.Ф. Чудновского, А.У. Франчука показали, что его теплофизические свойства изменяются при увлажнении. На основе указанных работ установлено, что на теплофизические параметры песка помимо степени увлажнения существенное влияние оказывает плотность.

Применяя методы математической статистики, проведено аппроксимирование экспериментальных данных теплотехнических показателей песка, приведенных в работе А.У. Франчука, в результате получены зависимости, описывающие влияние влажности и плотности на коэффициент теплопроводности, температуропроводности и теплоемкости песка.

Коэффициент теплопроводности  $\lambda=f(\rho, w)$ , Вт/(м·К) для песка аппроксимируется полученной зависимостью:

$$\lambda = -1,337 + 1,245 \cdot \rho + 0,01 \cdot w \quad (1)$$

где  $\rho$  - плотность песка (т/м<sup>3</sup>),  $w$  - объемная влажность песка (%).

Значения коэффициентов теплопроводности песка, рассчитанные по (1), хорошо согласуются с экспериментальными значениями, отклонение в среднем составляет 7,7 %.

Исследуя зависимость температуропроводности  $a=f(\rho, w)$ , м<sup>2</sup>/с установлено, что влажность в меньшей степени влияет на данный параметр и этот фактор можно исключить. Таким образом, зависимость  $a=f(\rho)$  для песка, описывается уравнением:

$$a = -2,087 + 3,812 \cdot \rho \quad (2)$$

где  $\rho$  – то же, что и в формуле (1).

Значения температуропроводности песка, рассчитанные с помощью уравнения (2), сопоставлены с данными, полученными в ходе экспериментальных исследований, отклонение в среднем составляет 6,2 %.

Теплоемкость песка от влажности и плотности, описывается зависимостью:

$$c = -0,018 + 0,944 \cdot \rho + 0,031 \cdot w \quad (3)$$

где  $c$  - объемная теплоемкость (Дж/м<sup>3</sup>·К),  $\rho$  - то же, что и в формуле (1),  $w$  - то же, что и в формуле (1).

Отклонение величин коэффициентов объемной теплоемкости песка, рассчитанных согласно (3) от значений, полученных в ходе экспериментальных

исследований, составляет в среднем 1,1 %. На основе уравнений (1) и (3) в диссертации построены номограммы для графического определения коэффициента теплопроводности и теплоемкости песка в зависимости от его плотности и влажности.

С помощью полученных зависимостей (1) - (3) рассчитаны значения теплофизических параметров песка различной плотностью при влажности от 5 % до 25 %, и установлено, что увлажненный песок удовлетворяет требованию для наполнителя скважины по коэффициенту теплопроводности, однако он представляет собой рыхлую неоднородную структуру. Поэтому в качестве наполнителя скважины предложено применять водно-песчаный раствор (песок плотностью 1600-1800 кг/м<sup>3</sup> и объемной влажностью 30%-35%), в котором достигнуто полное влагонасыщение зерен и междузерновых пустот песка, а также присутствует некоторое количество воды, не связанной с его твердыми частицами, что предотвращает возникновение пустот в скважине и решает проблему технологии ее заполнения наполнителем. С учетом теплофизических характеристик водно-песчаного раствора, его можно рекомендовать в качестве наполнителя для скважин с грунтовыми теплообменниками.

В случае эксплуатации скважины заполненной водой при высоком дебете воды используются открытые системы сбора низкопотенциальной энергии. При низком дебете воды необходимо применять наполнитель для скважин.

**В третьей главе** разработана математическая модель процесса теплопередачи, протекающего в период эксплуатации системы СНЭГ. Данный процесс представляет собой явление сложного теплообмена: процесс теплоотдачи при вынужденном течении рабочей жидкости в трубах грунтового теплообменника и процесс теплопроводности, протекающий в стенке трубы грунтового теплообменника, наполнителе скважины и массиве грунта.

В связи с некоторой информативной неопределенностью и многообразием факторов, влияющих на процесс теплопроводности, моделирование процессов таких систем требует введения определенных упрощений. Систему СНЭГ геометрически можно представить, как многослойный цилиндр (рисунок 1).

Для создания математической модели произведено геометрическое преобразование: условное "распрямление" U-образной трубы грунтового теплообменника (рисунок 1).

Данная процедура позволит рассмотреть процесс теплопередачи относительно одной длинной трубы и провести исследование изменения температуры вдоль оси  $x$  – по радиусу, а для того чтобы учесть эти изменения вдоль оси  $y$  выполняется отдельный расчет изменения температуры для рабочей жидкости.

Грунт рассматривается как твердая, сплошная, изотропная среда, в которой распространение тепла происходит за счет теплопроводности, ввиду не высоких значений температуры массива грунта в естественном состоянии, ниже глубины промерзания. Эффекты конвекции, излучения и переноса влаги можно не учитывать, так как температура среды значительно ниже +50 °С. Аналогичное

допущение принято для наполнителя скважины – учитывается только теплопроводность.

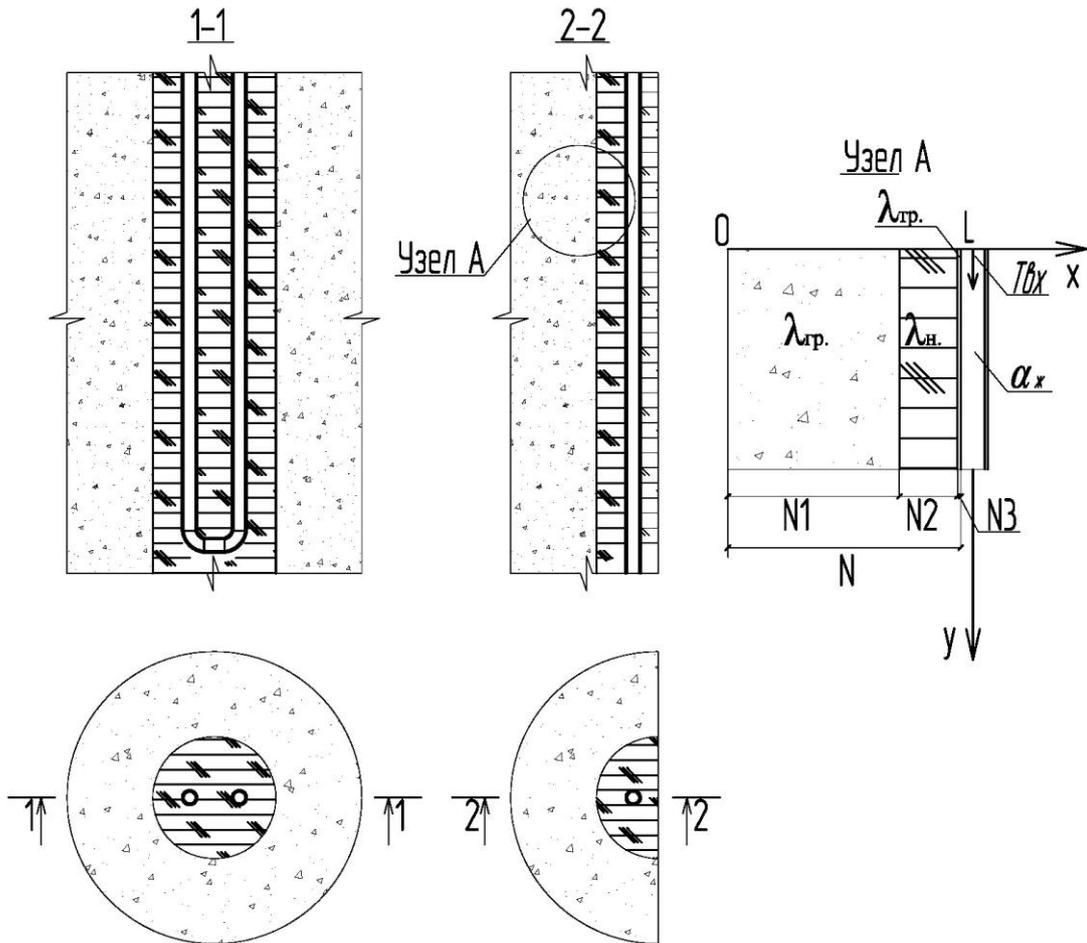


Рисунок 1 - Фрагмент системы сбора низкопотенциальной энергии грунта: слева - в виде многослойного цилиндра; справа - с "распрямленной" U-образной трубой грунтового теплообменника. N1 – номер слоя грунтового массива, N2 – номер слоя наполнителя, N3 – номер слоя стенки трубы.

С учетом, сделанных упрощений, нахождение температурного поля осуществляется одномерным уравнением теплопроводности (4) для выделенного элемента:

$$\left. \begin{aligned} \rho_1 \cdot c_1 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_1 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial x} \right), 0 < x < x_{(N1)}^* \\ \rho_2 \cdot c_2 \cdot \frac{\partial T_2}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_2 \cdot \frac{\partial T_2}{\partial x} \right), x_{(N1)}^* < x < x_{(N2)}^{**} \\ \rho_3 \cdot c_3 \cdot \frac{\partial T_3}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_3 \cdot \frac{\partial T_3}{\partial x} \right), x_{(N2)}^{**} < x < L_{(N)} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где  $T=T(x, t)$  – температура, °С;  $c \cdot \rho$  – объемная теплоемкость, Дж/(м<sup>3</sup>·К);  $\lambda$  – теплопроводность, Вт/(м·К);  $t$  – время, сек.

Начальные и граничные условия запишутся следующим образом:

$$\left. \begin{aligned}
 & t = 0 : T = T_0, 0 \leq x \leq L \\
 & x = 0 : -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = q_0, t > 0 \\
 & x = L : \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_{ж} \cdot (T_3 - T_{ж}), t > 0, \alpha_{ж} > 0 \\
 & \left\{ \begin{aligned}
 & T_1(t, x_{(N1)}^*) = T_2(t, x_{(N1)}^*) \\
 & T_2(t, x_{(N2)}^{**}) = T_3(t, x_{(N2)}^{**}) \\
 & -\lambda_1 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=x^*(N1)} = -\lambda_2 \cdot \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=x^*(N1)} \\
 & -\lambda_2 \cdot \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=x^{**}(N2)} = -\lambda_3 \cdot \frac{\partial T_3}{\partial x} \Big|_{x=x^{**}(N2)}
 \end{aligned} \right\} \quad (5)
 \end{aligned} \right\}$$

где  $T_0$  - температура в начальный момент времени, °С;  $L$  – расчетная длина, м;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $\alpha_{ж}$  - коэффициент теплоотдачи рабочей жидкости, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $T_{ж}$  - температура рабочей жидкости, омывающей правую границу, °С; индекс 1 соответствует массиву грунта, 2 - наполнитель, 3 – стенка трубы.

На левой границе  $x=0$  задаются граничные условия второго рода. На правой границе задается температура рабочей жидкости  $T_{ж}$ , омывающей внутреннюю стенку трубы. В начальный момент времени температура рабочей жидкости равна температуре на входе в грунтовый теплообменник. В данном случае на границе  $x=L$  задаются граничные условия третьего рода. На границах контакта слоев, задаются граничные условия четвертого рода.

Для решения одномерного дифференциального уравнения теплопроводности применяется метод конечных разностей на равномерной сетке. Аппроксимация дифференциальной задачи конечно-разностными уравнениями выполнена с первым порядком точности по времени и вторым по координате. Используется четырехточечная неявная разностная схема, являющаяся абсолютно устойчивой, и где для определения поля температур на новом временном слое необходимо решать систему линейных уравнений. Полученная система решается методом прогонки.

После определения температуры на новом временном слое на каждом шаге по пространственной координате при решении уравнений (4) и (5), осуществляется переход к расчету изменений температуры рабочей жидкости  $T_{ж2}$ , (°С) вдоль оси  $y$ . Из уравнения теплового баланса можно рассчитать температуру жидкости в следующий момент времени  $\tau$  на следующем шаге по координате  $\Delta y$ :

$$T_{ж2} = \frac{(q \cdot \tau \cdot \Delta y)}{M \cdot c} + T_{ж1}, \quad (6)$$

где выражение -  $(q \cdot \tau \cdot \Delta y) = Q$  представляет собой общее количество теплоты, Вт, которое подводится к жидкости за промежуток времени  $\tau$ , сек;  $\Delta y$  - шаг по пространственной координате  $0 < y < H$ ,  $H$  - длина трубы грунтового теплообменника, м;  $M$  - масса рабочей жидкости, кг;  $c$  - теплоемкость рабочей жидкости, Дж/кг·К.

Далее температура жидкости, вычисленная на новом шаге, принимается в качестве температуры рабочей жидкости, омывающей правую границу  $T_{ж}$  в уравнении (5) и снова проводится расчет по нахождению температурного поля по формулам (4) и (5) при новых условиях. Такая последовательность расчета выполняется по мере прохождения рабочей жидкостью всей трубе грунтового теплообменника.

Для нахождения температурного поля в окрестностях труб внутри скважины при их взаимном влиянии, применен метод Е.П. Шубина. В результате расчетов установлено, что взаимное влияние труб грунтового теплообменника, выполненного из полиэтиленовых труб с наружным диаметром 0,032 м и толщиной стенки 0,003 м, незначительно, и на изменение температуры теплоносителя может оказывать воздействие только при расположении опускной и подъемной труб на расстоянии 0,04 м и менее, при большем расстоянии, такого эффекта не наблюдается.

Таким образом, результаты, полученные в соответствии с разработанной математической моделью и при оценке взаимного влияния труб грунтового теплообменника, позволяют определить температурное поле, которое формируется в скважине и грунте при работе теплообменного оборудования. На рисунке 2 изображен фрагмент температурного поля для зоны наибольшей разницы температур теплоносителя в трубах грунтового теплообменника.

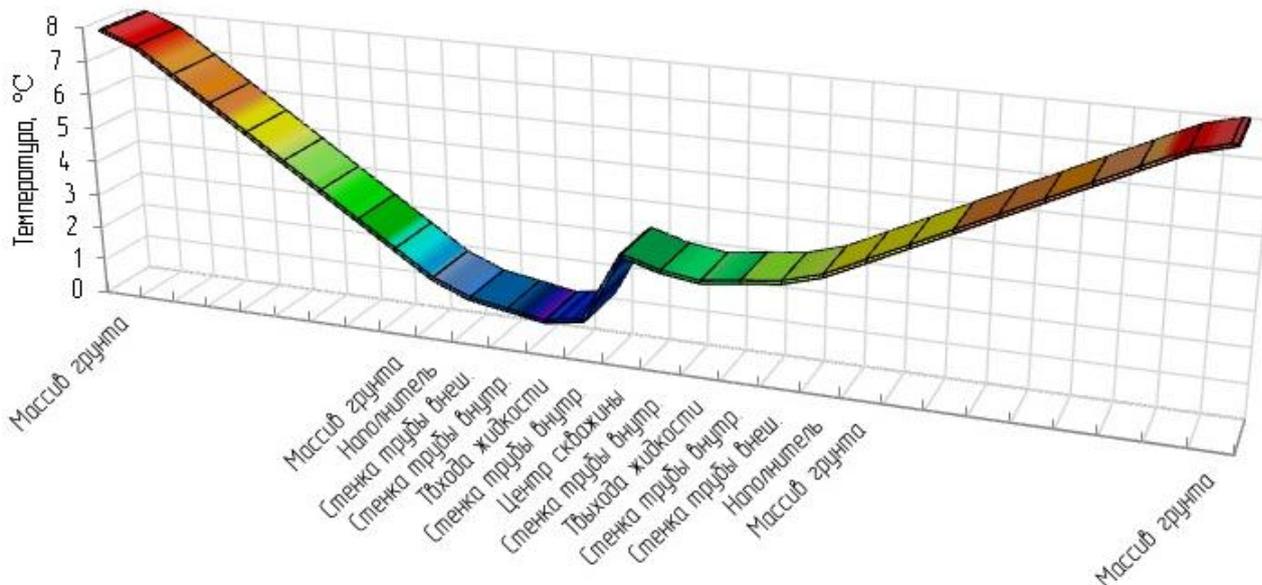


Рисунок 2 - Температурное поле в зоне наибольшей разницы температур теплоносителя в трубах грунтового теплообменника

Разработана методика по определению объема «рабочего» массива грунта, при котором температурные поля скважин не пересекаются, и соответственно в период эксплуатации окружающий грунтовый массив не подвергается замораживанию.

В соответствии с разработанной методикой, получена формула для определения расстояния между скважинами:

$$R_{скв.} = 2 \cdot \sqrt{\frac{86400 \cdot q_{скв.} \cdot z_{от}}{\pi \cdot c_{гр.} \cdot \rho_{гр.} \cdot \left[ T_{гр.} - \left( \frac{T_{вх.} + T_{вых.}}{2} \right) \right]}} \quad (7)$$

где  $q_{скв.}$  - средний тепловой поток с одного метра скважины, Вт/м;  $z_{от.}$  - продолжительность отопительного периода, сут./год;  $c_{гр.}$  - удельная теплоемкость грунтового массива, Дж/кг·К;  $\rho_{гр.}$  - плотность грунтового массива, кг/м<sup>3</sup>;  $T_{гр.}$  - температура грунтового массива, °С;  $T_{вх.}$  и  $T_{вых.}$  - температура входа и выхода рабочей жидкости в грунтовом теплообменнике, °С.

Для проверки достоверности математической модели процессов теплопередачи системы СНЭГ создана имитационной установка скважины с грунтовым теплообменником (рисунок 3), на основе метода «геометрических вырезок».

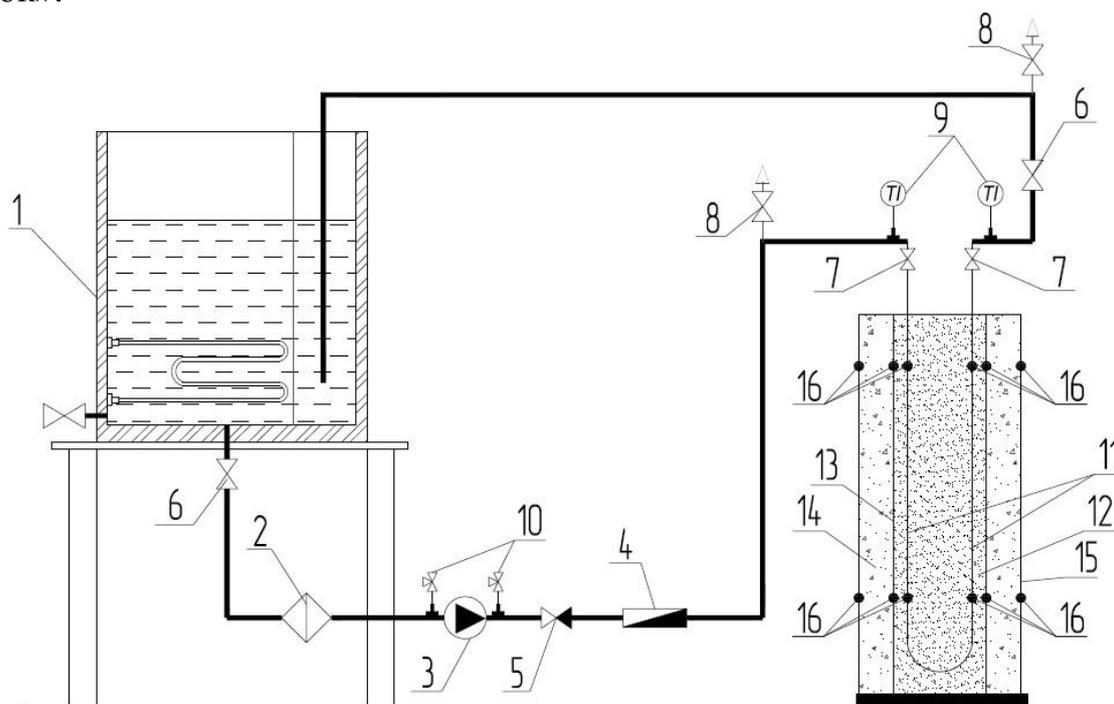


Рисунок 3 – Схема имитационной установки. 1 - бак объемом 100 л, 2 - фильтр, 3 - насос, 4 - водосчетчик, 5 - обратный клапан, 6 - вентиль, 7 - кран шаровой, 8 - воздухоотводчик, 9 - термометр, 10 – трёхходовой кран, 11 - теплообменник, 12 - наполнитель, 13 - обсадная труба, 14 - грунт, 15 - внешняя обсадная труба; 16 – датчики температуры.

Достаточным условием подобия при вынужденном движении теплоносителя является равенство критериев Рейнольдса ( $Re_{ж}$ ) и Прандтля ( $Pr_{ж}$ ), составленных для реальной системы и имитационной установки:

$$Nu_{ж} = f(Re_{ж}, Pr_{ж}) \quad (8)$$

где  $Nu_{ж}$  – критерий Нуссельта.

Выполнение условий  $Re_{ж} = idem$  и  $Pr_{ж} = idem$  обеспечит подобие процессов конвективного теплообмена при вынужденном течении жидкости. При этом моделирование процесса производится по числу  $Pr_{ж}$ , а по числу  $Re_{ж}$  обеспечивается приближенное подобие в диапазоне характерном для реальной установки.

Подобие процесса теплопроводности между реальной системой СНЭГ и имитационной, обеспечивается использованием материалов с равными или близкими по значению теплофизическими параметрами для труб грунтового теплообменника, наполнителя скважины и грунта, а также выполнением теплового подобия.

Проведение экспериментальных исследований выполнено на основе планирования. Первая часть исследований посвящена решению задачи, устанавливающей величину теплового потока с метра трубы ( $q$ , Вт/м) и оценивающей влияние на него основных факторов: расход теплоносителя ( $G$ , кг/с); изменение коэффициента теплопроводности наполнителя скважины ( $\lambda_{нап.}$ , Вт/м·К); температура входа рабочей жидкости в грунтовой теплообменник ( $t_{вх.}$ , °С), то есть  $q = f(G, \lambda_{нап.}, t_{вх.})$ . Планирование эксперимента проведено на основе рототабельного центрального композиционного плана, ядром которого в данном случае является полнофакторный эксперимент типа  $2^k$ .

Вторая часть исследований посвящена определению экспериментальным путем зависимости  $Nu_{ж} = f(Re_{ж}, Pr_{ж})$ . Данная зависимость описывается степенной функцией.

Установленные условия проведения первой части эксперимента, позволяют получить необходимые данные для процесса конвективной теплоотдачи в исследуемых диапазонах: число Рейнольдса  $4,3 \cdot 10^3 < Re_{ж} < 6,8 \cdot 10^3$ , число Прандтля  $21,4 < Pr_{ж} < 22,9$ .

**В четвертой главе** проведен анализ результатов эксперимента.

В соответствии с планами экспериментов, выполнена статистическая обработка полученных данных.

В результате первой части эксперимента получена зависимость теплового потока от расхода и температуры теплоносителя в грунтовой теплообменнике, а также от теплопроводности наполнителя, заполняющего скважину:

$$q = 17,24 + 282,16 \cdot G + 13,08 \cdot \lambda_{нап} - 4,33 \cdot t_{вх} - 575,17 \cdot G^2 \quad (9)$$

Адекватность, полученной зависимости проверена по критерию Фишера с уровнем значимости 0,05. Средняя ошибка аппроксимации составляет 3,2 %.

Установлено, что на величину теплового потока с метра трубы оказывают влияние все основные факторы, при этом температура теплоносителя на входе в теплообменник имеет наибольшее влияние, а необходимость учитывать

квадратичное взаимодействие фактора подчеркивает сложность механизма процесса теплопередачи при эксплуатации грунтового теплообменника.

При сравнении теоретической математической модели процессов теплопередачи системы СНЭГ с экспериментальной (рисунок 4), отклонение между значениями теплового потока в среднем составило 6,4 %. Данный показатель подтверждает достоверность теоретической математической модели, и свидетельствуют о достаточно высокой ее точности.

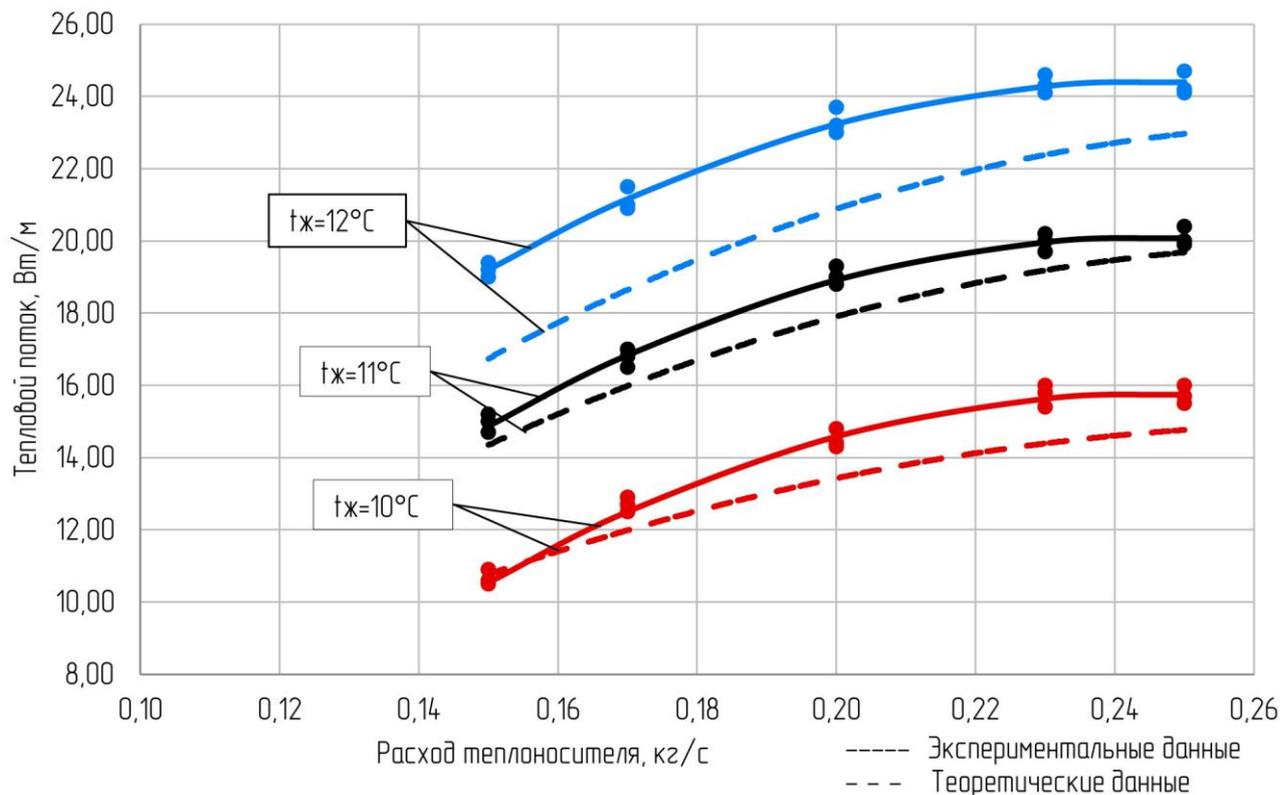


Рисунок 4 - Сравнение экспериментальных и теоретических данных при рассмотрении зависимости теплового потока с метра трубы от расхода теплоносителя ( $\lambda_{нап}=1,21$  Вт/м·К)

По результатам, полученным при обработке второй части экспериментальных исследований, установлено, что число Прандтля незначительно влияет на критерий Нуссельта и получена зависимость (10) в переходной области течения:

$$Nu_{ж}=0,097 \cdot Re_{ж}^{0,78} \quad (10)$$

Средняя ошибка аппроксимации экспериментальных данных зависимостью (10) составляет 4 %. Данная модель, характеризует переходный режим течения жидкости, в диапазоне  $4,3 \cdot 10^3 < Re_{ж} < 6,8 \cdot 10^3$ .

Проведено сравнение с зависимостью (рисунок 5), применяемой при реализации теоретической математической модели процессов теплопередачи системы СНЭГ, отклонение экспериментальных данных в среднем составило 7 %.

Таким образом, результаты проведенных экспериментальных исследований показали хорошую сходимость с теоретическими исследованиями и не противоречат результатам, полученным другими исследователями.

Проведя теоретические и экспериментальные исследования, определены основные параметры, необходимые при проектировании для реальных вертикальных систем СНЭГ: теплофизические свойства грунтового массива; теплофизические свойства наполнителя скважины; данные о материале труб грунтового теплообменника; требуемая нагрузка на скважинное поле; период эксплуатации скважинного поля; технические характеристики геотермального теплового насоса. Разработана методика, которая, учитывая индивидуальные особенности района строительства, позволяет рассчитать требуемое количество скважин и расстояние между ними. На основе данной методики создана компьютерная программа «Расчет параметров устройства теплообмена в системе сбора низкопотенциальной энергии грунта», написанная на языке программирования Object Pascal (свидетельство РФ № 2016610357).

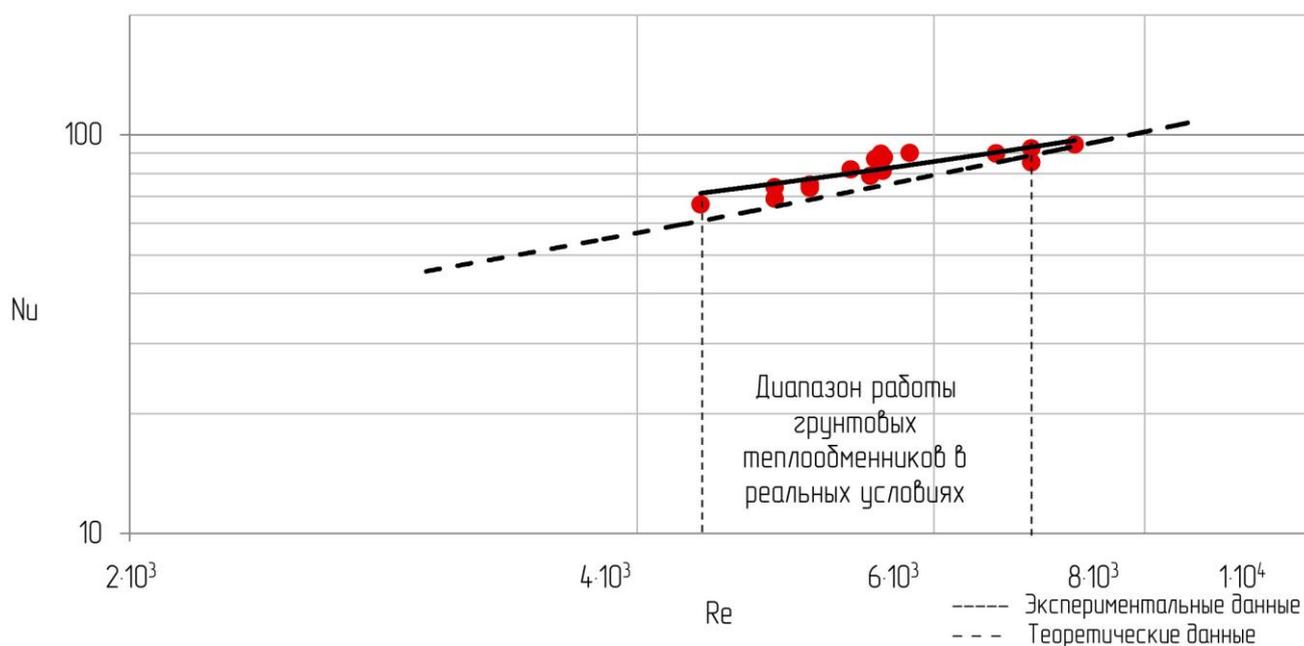


Рисунок 5 - Сравнение экспериментальных и расчетных данных при рассмотрении зависимости  $Nu=f(Re_{ж})$

Для предварительной оценки проектируемого источника для геотермальных тепловых насосов, использующего низкопотенциальную энергию грунта, построена номограмма, на основе формулы (7), которая позволяет определить расстояние между скважинами (рисунок 6).

Разработана новая конструкция грунтового теплообменника (рисунок 7). Главной задачей данного изобретения является создание геотермального устройства с повышенной теплопроизводительностью. Научная новизна подтверждается патентом РФ на изобретение № 2529850. Цель изобретения состоит в повышении эффективности процесса теплообмена между массивом грунта и грунтовым теплообменником, направленная на снижение капиталовложений, за счёт уменьшения глубины и количества скважин.

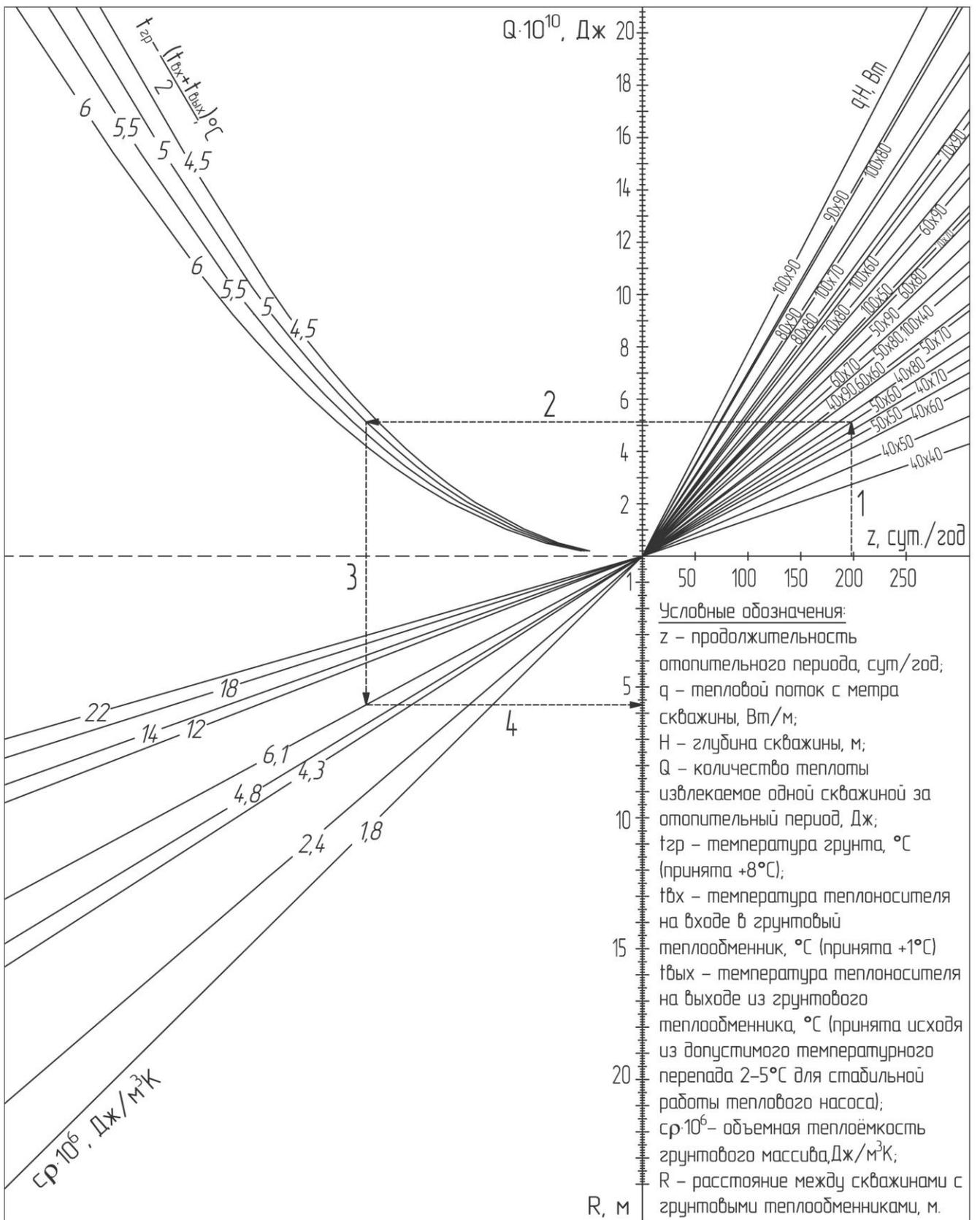


Рисунок 6 - Номограмма для определения расстояния между скважинами с грунтовыми теплообменниками

Геотермальное устройство представляет собой скважину 1, опускную 2 и подъемные 3 трубы, наполнитель 4 геотермальной скважины 1, оголовок 5, накопительная камера 6, узел контроля 7 количества дренирующей жидкости в накопительной камере 6, средство доставки 8 дренирующей жидкости, насадка 9 опускной трубы 2, сборный коллектор 10, коническая полость 11, сетки 12, выхлопная водяная 13 и воздушная 14 трубы накопительной камеры 6, трехходовой кран 15 воздушной трубы 14, а также сетки 16, стакан 17, запорный клапан 18, спускные окна 19, шток 20, поплавков 21, сборная камера 22 узла контроля 7.

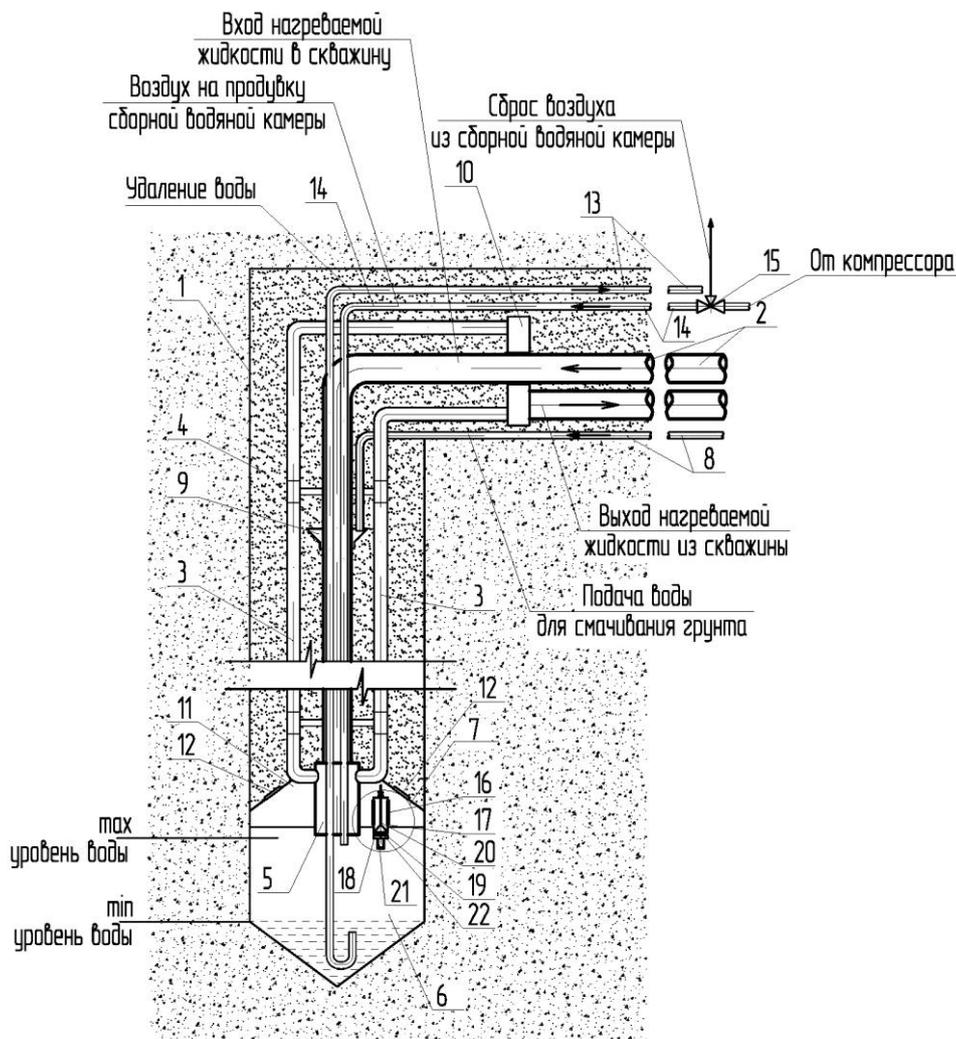


Рисунок 7 - Вертикальный разрез геотермального устройства

Технический результат, достигаемый при решении поставленной задачи, выражается в повышении теплопроизводительности грунтового теплообменника вследствие следующих факторов: увеличение поверхности грунтового теплообменника; увлажнение наполнителя скважины; восстановление энергетического потенциала грунта; регулирование степени увлажнения наполнителя.

**В пятой главе** даны рекомендации для проектирования систем тепло- и холодоснабжения на базе геотермальных тепловых насосов (ГТН) в сочетании с грунтовыми теплообменниками, а также проведено технико-экономическое

сравнение комбинированного источника тепло- холодоснабжения на базе ГТН и солнечных коллекторов (СК) (патент РФ № 85989) жилого дома по ул. Земляничная, 17 в г. Владивостоке (рисунок 8) с традиционными источниками энергии (жидкое топливо, электроэнергия).

Площадь отапливаемой части дома составляет 467 м<sup>2</sup>. Система отопления дома запроектирована с использованием фанкойлов, теплого пола и радиаторов, система вентиляции - приточно-вытяжная механическая, кондиционирование воздуха осуществляется фанкойлами и сетью воздуховодов. Нагрузка на систему отопления составляет 20 кВт, на систему вентиляции - 6 кВт, на систему кондиционирования - 30 кВт, на систему горячего водоснабжения - 10 кВт.

Для покрытия нагрузки на системы тепло- и холодоснабжения дома предусмотрено два геотермальных тепловых насоса «вода-вода» с функцией реверса, фирмы FHP, марки WP-036-A (производительность по теплу 7,26 кВт, по холоду 8,29 кВт) и WP-072-A (производительность по теплу 13,41 кВт; по холоду 15,19 кВт) и один тепловой насос «вода-воздух» фирмы FHP, марки GT-036-A (производительность по теплу 6,43 кВт, по холоду 8,77 кВт).

В качестве низкопотенциального источника энергии для тепловых насосов используется скважинное поле из 8 скважин по 40 метров и 6 скважин по 60 метров.

Солнечные коллекторы фирмы «AEE-Solar» (4 шт. по 2,5 кВт) используются в качестве источника для горячего водоснабжения в летний и переходный период года, а также для дополнительного подогрева теплоносителя скважинного поля в зимний период года.

К достоинствам запроектированного источника следует отнести взаимозаменяемость источников, что обеспечивает бесперебойность теплоснабжения объекта; рациональное потребление традиционных источников энергии и, соответственно, минимальное влияние оборудования на окружающую среду.

Для жилого дома, расположенного по адресу: г. Владивосток, ул. Земляничная, 17, проведено сопоставление экономической эффективности реализованного комбинированного источника тепло- холодоснабжения на базе ГТН, использующих низкопотенциальную энергию грунта, и солнечную энергию, с наиболее распространенным источником тепло- холодоснабжения для жилых домов коттеджного типа в Приморском крае: на базе жидкотопливного котла (резервный источник – электрический котел) и чиллера.

Экономический эффект, для комбинированного источника (при наполнителе бентонит) в ценах 2016 года незначительный и составит 130182 руб./год, это объясняется большими единовременными затратами, что безусловно является недостатком таких систем. Однако, в случае применения альтернативного наполнителя для скважин, рекомендуемого в данной работе, при реализации источника тепло- и холодоснабжения, на базе ГТН в сочетании с грунтовыми теплообменниками и СК для жилого дома, расположенного по ул. Земляничная, 17 в г. Владивостоке, экономический эффект в ценах 2016 года составляет 1010307 руб./год.

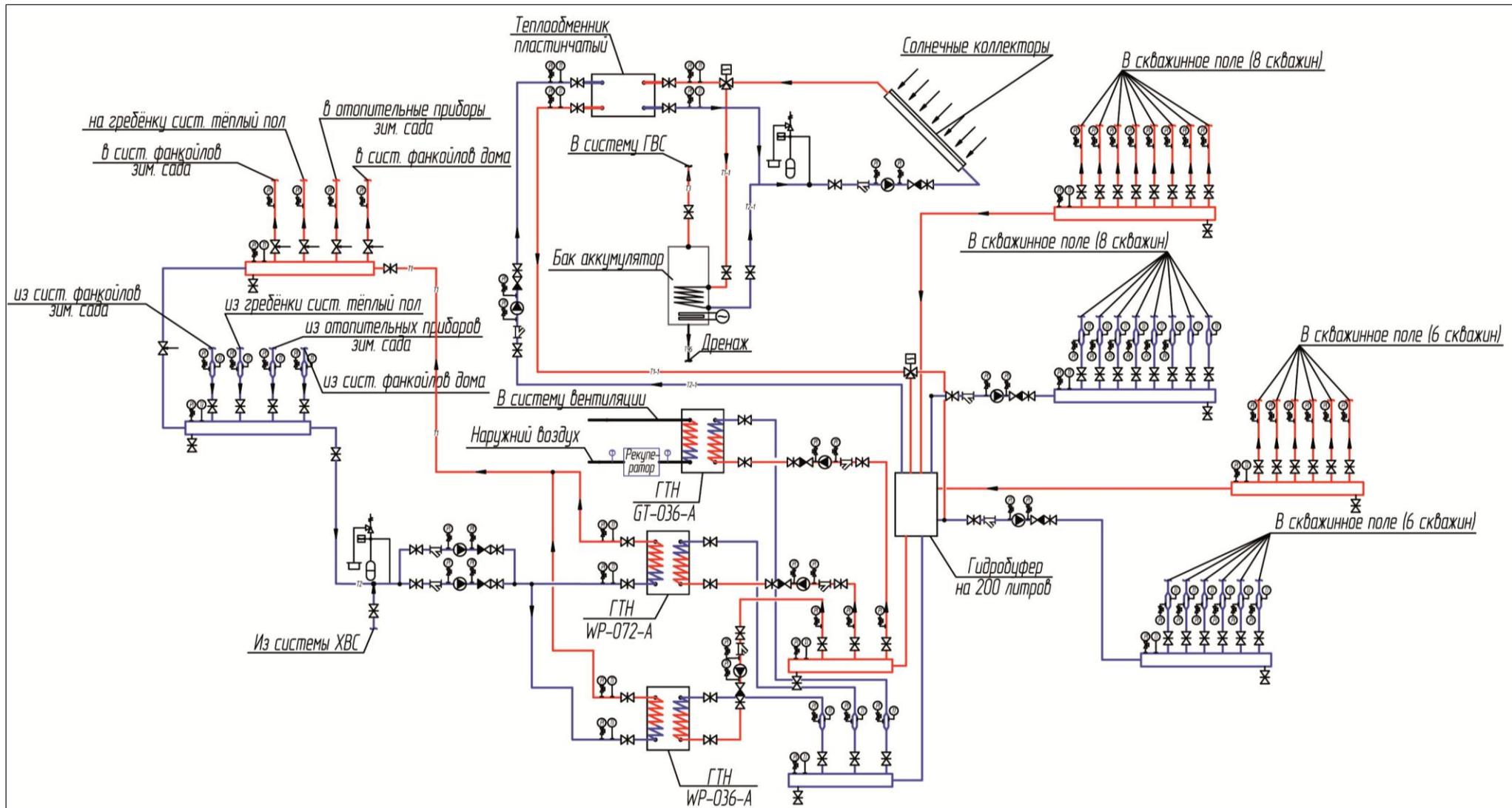


Рисунок 8 - Принципиальная схема индивидуального источника тепло- и холодоснабжения жилого дома по ул. Земляничная, 17 в г. Владивостоке

Определены удельные значения единовременных затрат 24497 руб./МВт и эксплуатационных затрат 1680 руб./год на 1 МВт при реализации комбинированного источника тепло- холодоснабжения на базе ГТН в сочетании с вертикальными грунтовыми теплообменниками и солнечными коллекторами, в соответствии с которыми рассчитан годовой экономический эффект в ценах 2016 года: 799262 руб./год для демонстрационно-выставочного энергоэффективного «Экодома» по ул. Бородинская, 14 в г. Владивостоке и 398246 руб./год для индивидуального жилого дома по ул. Главная, 23е в г. Владивостоке.

На сегодняшний день, оценка перспективы широкомасштабного внедрения ГТН в сочетании с грунтовыми теплообменниками и СК, свидетельствует о том, что для повышения коммерческой эффективности инвестиционных проектов данной направленности должен быть отрегулирован и реально защищён экономический комплекс мероприятий, предусмотренный программой энергосбережения в РФ, ввиду высоких капиталовложений необходимых при создании таких систем.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Доказана целесообразность использования 30%-35% водно-песчаного раствора в качестве альтернативного наполнителя для скважин с грунтовыми теплообменниками.

2. На основе разработанной физико-математической модели, описывающей процесс теплопередачи вертикальной системы сбора низкопотенциальной энергии грунта, создана методика расчета грунтовых теплообменников U-образного типа для целей тепло- и холодоснабжения зданий.

3. В результате анализа экспериментальных данных, полученных на имитационной установке, установлены факторы, влияющие на величину теплового потока в грунтовом теплообменнике, а также определена степень их влияния на процесс теплообмена.

4. Получена критериальная зависимость, характеризующая процесс конвективной теплоотдачи в трубе грунтового теплообменника для области чисел Рейнольдса  $4,3 \cdot 10^3 < Re < 6,8 \cdot 10^3$ , характерной при работе реальных грунтовых теплообменников.

5. Разработаны методика и компьютерная программа (свидетельство РФ № 2016614307) расчета вертикальных систем сбора низкопотенциальной энергии грунта, которые позволяют рассчитать необходимые параметры при проектировании таких систем для конкретного района строительства.

6. Разработана новая конструкция грунтового теплообменника (патент РФ № 2529850), позволяющая по сравнению с ее аналогами увеличить поверхность теплообмена, регулировать увлажнение наполнителя геотермальной скважины, а также эффективнее восстанавливать энергетический потенциал грунта.

7. Предложены общие рекомендации и принципиальные схемы для проектирования систем тепло- и холодоснабжения зданий на базе геотермальных тепловых насосов в сочетании с грунтовыми теплообменниками.

8. Экономический эффект в ценах 2016 года, при реализации источника тепло- и холодоснабжения на базе геотермальных тепловых насосов, работающих с грунтовыми теплообменниками, для жилых и общественных зданий г. Владивостока, в случае применения альтернативного наполнителя для скважин, рекомендуемого в данной работе, в среднем составляет 735938 руб./год.

## **ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ**

1. Журмилова (Маркелова), И.А. Системы теплосбора для геотермальных тепловых насосов / А.С. Штым, И.А. Журмилова (Маркелова) // Вестник ВолгГАСУ. Сер.: Стр-во и архит. - 2011. - № 23(42). - С. 126-133.

2. Журмилова, И. А. Процессы теплообмена в системе сбора низкопотенциальной энергии грунта / И.А. Журмилова, А.С. Штым // Научное обозрение. - 2016. - № 2. - С. 62-69.

3. Журмилова, И. А. Методика расчета систем сбора низкопотенциальной энергии грунта / И.А. Журмилова, А.С. Штым // Научное обозрение. - 2016. - № 9. - С. 77-83.

### **Патенты РФ и свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ**

1. Комбинированная система теплоснабжения [Текст]: пат. 85989 Рос. Федерация: МПК F24J 2/00, F24D 11/00, F24D 12/00 / А.С. Штым, П.Е. Хвостик, А.А. Журмилов, И.А. Маркелова (Журмилова), Е.О. Путилина. - № 2009114999/22; заявл. 20.04.2009; опубл. 20.08.2009, Бюл. № 23.

2. Геотермальное устройство [Текст]: пат. 2529850 Рос. Федерация: МПК F24J 3/08 / И.А. Журмилова, Г.А. Захаров, А.С. Штым, Т.Г. Савина, К.В. Цыганкова. - № 2013121639/06, заявл. 08.05.2013; опубл. 10.10.2014, Бюл. № 28.

3. Программа для расчета параметров устройства теплообмена в системе сбора низкопотенциальной энергии грунта [Текст]: свид. 2016614307 / И.А. Журмилова, А.С. Штым, А.А. Журмилов, А.А. Бочарова. - № 2016610357; заявл. 20.01.2016; опубл. 20.04.2016.

### **Остальные наиболее значимые публикации**

1. Журмилова (Маркелова), И.А. Энергосберегающие технологии в системах тепло- холодоснабжения зданий / А.С. Штым, И.А. Журмилова (Маркелова) // ЭПИ Вестник Дальневосточного государственного технического университета. - 2010. - № 2 (4). - С. 60-68.

2. Журмилова (Маркелова), И.А. Распределение температур в системе теплосбора для геотермальных тепловых насосов / А.С. Штым, И.А. Журмилова (Маркелова), С.А. Чечётко // Теплоэнергетика и энергосбережение / под ред. А.Н. Штыма; Дальневост. федерал. ун-т. - 2011. - С. 225-235.

3. Журмилова, И.А. Восстановление энергетического потенциала системы теплосбора геотермальных тепловых насосов / А.С. Штым, И.А. Журмилова, Т.Г.

Савина // Материалы научно-практической конференции «Вологдинские чтения». – Владивосток: ДВФУ, 2012. – С. 51-53.

4. Журмилова, И.А. Сравнение эффективности работы «U»-образного и коаксиального грунтовых теплообменников / А.С. Штым, И.А. Журмилова // Пути совершенствования работы теплоэнергетических устройств: материалы Всероссийской молодежной конференции / под ред. А.С. Штым; Дальневост. федерал. ун-т. - 2012. - С. 286-289.

5. Журмилова, И.А. Влияние на процесс теплообмена различных наполнителей в грунтовых теплообменниках геотермальных тепловых насосов / А.С. Штым, И.А. Журмилова, А.О. Калинин // ЭПИ Вестник инженерной школы ДВФУ. - 2013. - № 4 (17). - С. 45-51.

6. Журмилова, И.А. Грунтовый теплообменник с системой увлажнения / И.А. Журмилова, А.С. Штым // Сборник статей «Опыт эффективного использования энергетических ресурсов Дальнего Востока. (Научно-технический журнал, спец. выпуск). - М.: Горная книга. – 2014. - № 9421. – С. 96-101.

7. Журмилова, И.А. Использование низкопотенциальной энергии грунта для работы геотермальных тепловых насосов / А.С. Штым, И.А. Журмилова, А.О. Калинин, Ю.А. Фильчикова // Сборник статей «Опыт эффективного использования энергетических ресурсов Дальнего Востока. (Научно-технический журнал, спец. выпуск). - М.: Горная книга. – 2014. - № 9421. – С. 102-110.

8. Журмилова, И.А. Научно-исследовательская установка ДВФУ для изучения режимов работы оборудования, использующего возобновляемые источники энергии / А.О. Калинин, А.С. Штым, И.А. Журмилова, Г.А. Богданович // Сборник статей «Опыт эффективного использования энергетических ресурсов Дальнего Востока. (Научно-технический журнал, спец. выпуск). - М.: Горная книга. – 2014. - № 9421. – С. 120-125.

9. Журмилова, И.А. Создание микроклимата в жилых домах при использовании возобновляемых источников энергии / А.С. Штым, И.А. Журмилова, А.О. Калинин, Е.В. Тарасова, М.В. Потапова // Сборник статей «Опыт эффективного использования энергетических ресурсов Дальнего Востока. (Научно-технический журнал, спец. выпуск). - М.: Горная книга. – 2014. - № 9421. – С. 111-119.

Журмилова Ирина Александровна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ ТЕПЛО- И ХОЛОДОСНАБЖЕНИЯ  
ЗДАНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГРУНТОВЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ**

05.23.03 – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха,  
газоснабжение и освещение

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать 21.09.2016  
Формат 60x84/16. Усл.печ.л. 1,00.  
Тираж 100 экз. Заказ 366.

Отпечатано в типографии  
Дирекции публикационной деятельности ДВФУ  
690990, Владивосток, ул. Пушкинская, 10