

на правах рукописи

Смирнов Дмитрий Викторович

**КЛИМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ЗЕМЛИ ДЛЯ  
ПРИМЕНЕНИЯ В ЗАГОРОДНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

Специальность 25.00.30 – метеорология, климатология, агрометеорология

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2010**

Работа выполнена в государственном учреждении «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова»

**Научный руководитель** доктор географических наук, профессор  
*Кобышева Нина Владимировна*

**Официальные оппоненты** доктор географических наук, профессор  
*Русин Игорь Николаевич,*  
кандидат физико-математических наук  
*Зинченко Александр Васильевич*

**Ведущая организация** Российский государственный  
гидрометеорологический университет (РГГМУ)

Защита состоится 29 сентября 2010 года в 14 часов на заседании совета Д 327.005.01 по защите кандидатских и докторских диссертаций при государственном учреждении «Главная геофизическая обсерватория им.А.И.Воейкова» по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке государственного учреждения «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова».

Автореферат разослан 10 августа 2010 года.

Ученый секретарь совета по защите  
докторских и кандидатских диссертаций,  
доктор географических наук

А.В. Мещерская

## **Общая характеристика работы**

Актуальность темы диссертационного исследования.

Рациональное использование топливно-энергетических ресурсов представляет собой одну из глобальных мировых проблем, успешное решение которой будет иметь определяющее значение не только для дальнейшего развития мирового сообщества, но и для сохранения среды его обитания. Одним из перспективных путей решения этой проблемы является применение новых энергосберегающих технологий, использующих нетрадиционные возобновляемые источники энергии. Истощение запасов традиционного ископаемого топлива и экологические последствия его сжигания обусловили в последние десятилетия значительное повышение интереса к этим технологиям практически во всех развитых странах мира. Преимущества технологий теплоснабжения, использующих нетрадиционные источники энергии, по сравнению с их традиционными аналогами связаны не только со значительными сокращениями затрат энергии в системах жизнеобеспечения зданий и сооружений, но и с их экологической чистотой, а также с новыми возможностями в области повышения степени автономности систем жизнеобеспечения.

Анализ применения в экономике России технологий, использующих нетрадиционные источники энергии, показывает, что в России наиболее перспективной областью их внедрения являются системы жизнеобеспечения зданий и сооружений. При этом весьма эффективным направлением внедрения рассматриваемых технологий в практику строительства представляется широкое применение теплонаносных систем тепло- и хладоснабжения, использующих в качестве повсеместно доступного источника тепла низкого потенциала, грунт поверхностных слоев земли.

В последнее время в мировой практике энергосбережения все сильнее развиваются новые энергоэффективные технологии жизнеобеспечения зданий и сооружений, которые базируются на применении теплонасосных систем.

Как в России, так и за рубежом отсутствуют исследования по климатическим ресурсам низкопотенциального тепла Земли. Не определены и климатические индексы, выражающие влияние климатических факторов на производительность тепловых насосов. Диссертационная работа должна восполнить данный пробел.

Объект исследования - тепловые насосы.

Предмет исследования - вопросы климатического обеспечения использования низкопотенциальной тепловой энергии земли.

Цель исследования – выполнить анализ возможности и целесообразности использования в климатических условиях России тепловых насосов для отопления и горячего водоснабжения, при строительстве и эксплуатации объектов загородной недвижимости.

Для достижения данной цели были решены следующие задачи:

1. Составлены характеристики возобновляемых источников энергии с указанием их негативных свойств;
2. Выбраны оптимальные возобновляемые источники энергии для использования их в строительстве загородного жилья;
3. Проанализированы методы использования низкопотенциального тепла Земли
4. Составлен метод расчета оптимальной мощности тепловых насосов;
5. Определены климатические ресурсы низкопотенциального тепла Земли для территории России в начале и середине 21 века;
6. Даны рекомендации по комплексному энергетическому обеспечению коттеджного строительства.

Положения, выносимые на защиту:

- выбор оптимальных возобновляемых источников энергии для их использования в строительстве загородного жилья;

- разработка технологии использования низкопотенциального тепла Земли на основе учета климатической информации;
- районирование климатических условий, определяющих количество тепла, доставляемого тепловыми насосами и величину замещения количества тепла требуемого для отопления здания;
- оценка возможного количества тепловой энергии, получаемого с помощью тепловых насосов, для территории России в середине 21 века.

#### Научная новизна:

- впервые разработаны климатические основы получения низкопотенциального тепла Земли, реализуемого с помощью тепловых насосов;
- составлены карты климатических индексов, характеризующих низкопотенциальное тепло Земли для начала и середины столетия;
- построены карты-схемы технического потенциала тепла Земли для начала века и возможного валового потенциала тепла Земли на середину 21 века;

#### Практическая значимость:

Разработана методика учета климатических факторов для технологии обеспечения теплом коттеджного строительства за счет низкопотенциального тепла Земли.

#### Апробация работы:

Результаты работы представлены в монографиях “Климаты и возобновляемая энергетика” в разделах о низкопотенциальной тепловой энергии, “Методы оценки последствий изменения климата”, а также использованы в докладе научного руководителя диссертации на “Невском международном экологическом конгрессе 2010”, доложены на семинаре отдела прикладной климатологии ГУ “ТГО” и на курсах повышения квалификации “Обеспечение современных потребностей различных категорий потребителей климатической продукцией и информацией”.

Личный вклад автора: Все результаты представленные в диссертации получены лично автором.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

**Во введении** диссертационной работы обоснованы актуальность темы исследования, цель и содержание поставленных задач, отражены теоретические и методологические основы, предмет исследования, раскрыты научная новизна и практическая значимость результатов работы.

**В первой главе** представлен обзор основных возобновляемых источников энергии, которые в том числе могут использоваться в загородном строительстве. Приведены основные причины, которые указывают на важность перехода к возобновляемым источникам энергии. Рассмотрены недостатки использования основных возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Указаны перспективы и проблемы развития ВИЭ в России.

**Во второй главе** приводится обоснование и описание использования низкопотенциального тепла земли, реализуемое с помощью тепловых насосов. Показан существующий мировой опыт использования низкопотенциальной тепловой энергии Земли. Проанализированы методы использования низкопотенциального тепла Земли. Составлен метод расчета оптимальной мощности тепловых насосов.

*Раздел 1.* Важным показателем эффективности теплового насоса является коэффициент преобразования  $\mu$  (КПД нагрева). Теоретическое значение  $\mu$  для теплового насоса описывается выражением.

$$\mu = T_1 / (T_1 - T_2) \quad (1)$$

Где  $T_1$  и  $T_2$  – абсолютные температуры на выходе (приемник) и на входе (низкотемпературный источник тепла) соответственно.

Значение  $\mu$  оказывается всегда больше единицы, так что тепловой насос всегда выдает больше тепла на нагревание, чем было использовано непосредственно для приведения его в действие. Среднесезонное значение  $\mu$  типичного теплового насоса находится в пределах от 2 до 3,5.

*Раздел 2.* Тепловой насос состоит из трех основных агрегатов: теплообменника (испарителя), компрессора (повышающего давление) и

конденсатора. Эти агрегаты связаны между собой замкнутым трубопроводом. В системе трубопровода циркулирует хладагент, который в одной части цикла представляет собой жидкость, а в другой – газ. При каждом тепловом насосе необходимо наличие источника тепла, температура которого настолько низка ( $0-25^{\circ}\text{C}$ ), что его невозможно использовать непосредственно. Источником тепла может выступать скалистая порода, земля (грунт), водоемы. Использование низкопотенциального тепла земли посредством тепловых насосов возможно практически везде. Тепловой насос позволяет осуществить процесс отопления без загрязнения окружающей среды вредными выбросами и чрезмерного потребления природных ресурсов, одновременно ощутимо уменьшая денежные затраты.

Принцип действия теплового насоса состоит в следующем: хладагент, находящийся в жидком состоянии попадает в земляной контур, имея очень низкую температуру кипения, он переходит в газообразное состояние. После этого газ попадает в компрессор, на работу которого затрачивается электроэнергия. В компрессоре газ сжимается до состояния высокого давления, и хладагент разогревается. Далее разогретый газ попадает в теплообменник, где передает свое тепло воде, используемой для бытовых нужд, и в отопительную систему дома. При понижении давления и температуры хладагент переходит в жидкое состояние, и снова возвращается в земляной контур. Так цикл повторяется снова.

*Раздел 3.* Основными специализированными климатическими характеристиками для работы тепловых насосов являются расчетные теплотери здания и глубина промерзания почвы. Данные о теплотерях здания необходимы для того, чтобы выбрать оптимальный тип и мощность теплового насоса. При расчете теплотерь учитываются основные параметры здания, температура воздуха внутри здания и параметры наружного воздуха (температура, ветер, радиация), а также число градусодней.

После расчета теплопотерь здания и выбора теплового насоса по графику (рис. 1) находится точка баланса системы. Точка баланса показывает, при какой температуре наружного воздуха теплопотери дома равны производительности теплового насоса.

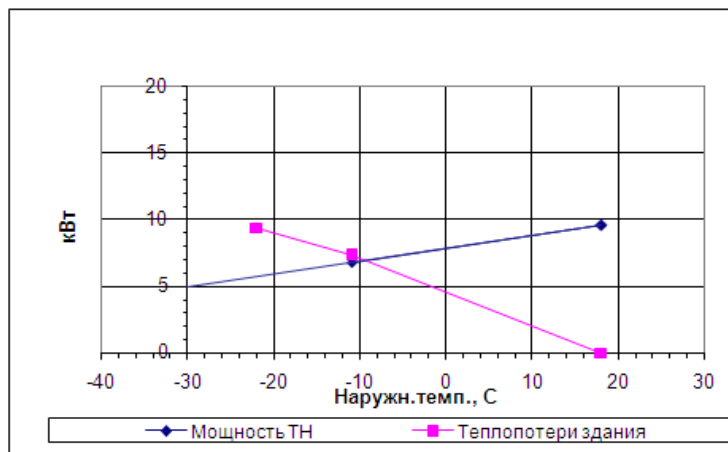


Рис.1 График определения точки баланса

Если температура воздуха опускается ниже этой точки, то тепловой насос автоматически потребляет дополнительную электроэнергию, которая идет на работу электрического тэна, который входит в комплект теплового насоса. Т.е. система продолжает вырабатывать постоянное количество тепла, но потребляет при этом дополнительное количество электроэнергии. Вследствие этого несколько снижается КПД системы. Однако необходимо отметить, что по данным производителя при температуре воздуха менее чем -30°C тепловой насос работает с эффективностью больше 300%.

**Третья глава** посвящена экономической оценке целесообразности применения теплонасосных систем на рынке загородного жилья, а также рассмотрению других источников тепла на рынке загородного жилья.

В разделе 1 представлен анализ разнообразного котельного оборудования на рынке загородного жилья импортного и отечественного производства (электрические, жидкотопливные, твердотопливные, комбинированные, газовые).



*Раздел 2* содержит описание целесообразности применения газового и жидкотопливного котельного оборудования, а также тепловых насосов. Указаны недостатки их использования.

**В четвертой главе** рассмотрены климатические параметры, которые используются на различных этапах применения тепловых насосов. Представлены и проанализированы схематические карты доли замещения потребляемой энергии, которую могут обеспечить тепловые насосы.

*Раздел 1.* В работе для типового здания (площадью 200 кв.м.) рассчитаны теплотери через стены, окна, пол и крышу. Для преобладающей суточной температуры воздуха зимой ( $-11^{\circ}\text{C}$  и  $-22^{\circ}\text{C}$ ) и летом ( $18^{\circ}\text{C}$ ) по известной методике (Анапольская, Гандин, 1973), рассчитаны значения теплотерь. Выбранная температура воздуха ниже температуры точки баланса, поэтому тепловой насос автоматически потребляет дополнительную электроэнергию. Климатические ресурсы определяются повторяемостью выбранных температур. Исходя из этого, автором были построены карты (рис. 2, 3) среднего числа дней в году с температурой воздуха меньшей или равной  $-11^{\circ}\text{C}$  и  $-22^{\circ}\text{C}$ , за период 1985 – 2000 года. Исходная информация о среднесуточной температуре воздуха получена с помощью результатов реанализа.

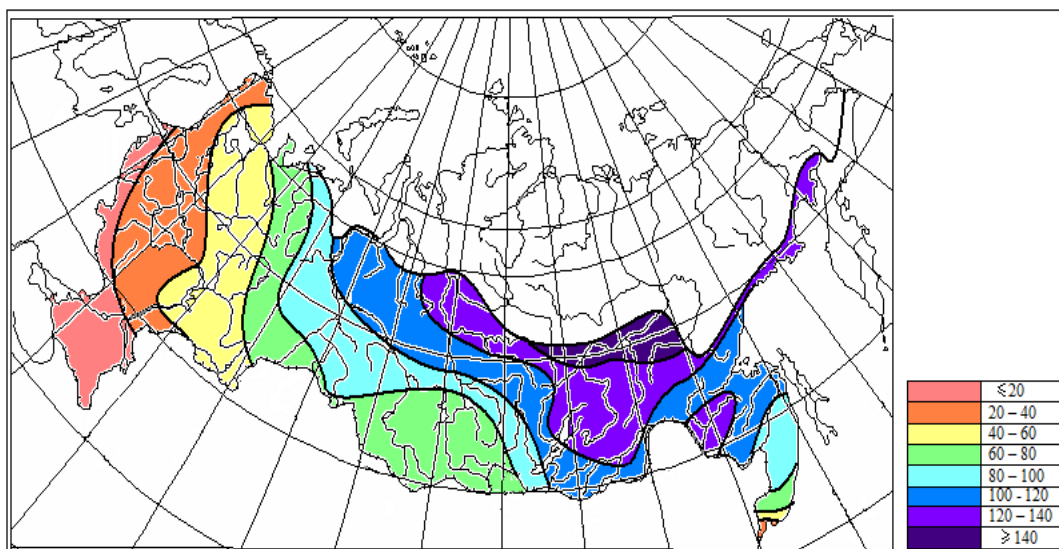


Рис.2 Среднее число дней в году с температурой  $\leq -11^{\circ}\text{C}$

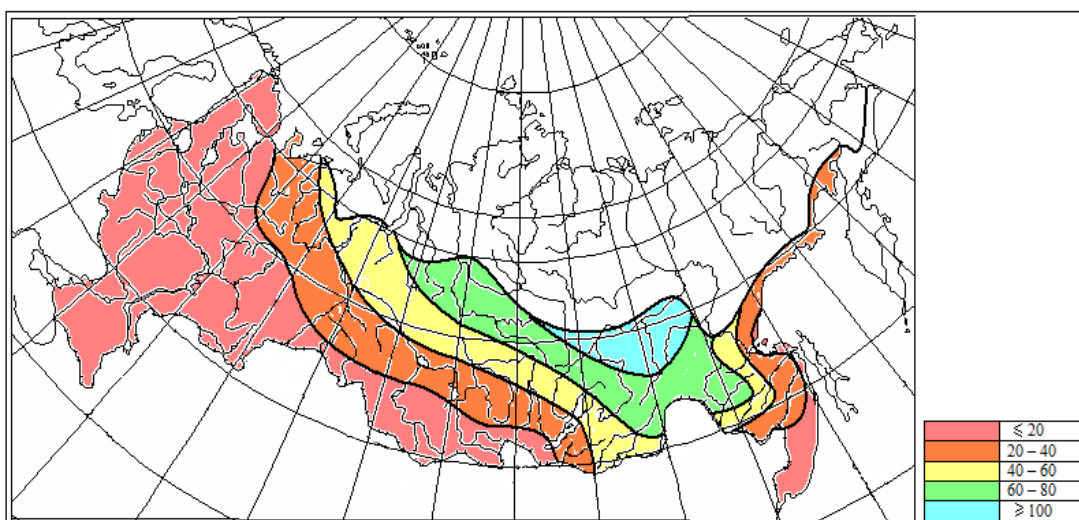


Рис.3 Среднее число дней в году с температурой  $\leq -22^{\circ}\text{C}$

Из рисунков 2 и 3 видно что в целом среднее число дней с температурами  $\leq -11^{\circ}\text{C}$  и  $-22^{\circ}\text{C}$  увеличивается с Юго-запада на Северо-восток страны.

Необходимо отметить, что в условиях вечной мерзлоты теплонасосные установки не применяются в силу того, что хладагент, находящийся в земляных контурах, не сможет должным образом испаряться.

Чтобы проследить каким образом изменится со временем количество климатических ресурсов для использования низкопотенциального тепла, построен второй комплекс карт ожидаемых температур воздуха на середину 21 века (2046 – 2065 года). Исходная информация о среднесуточной температуре воздуха получена с помощью ансамбля из 7 моделей МОЦАО.

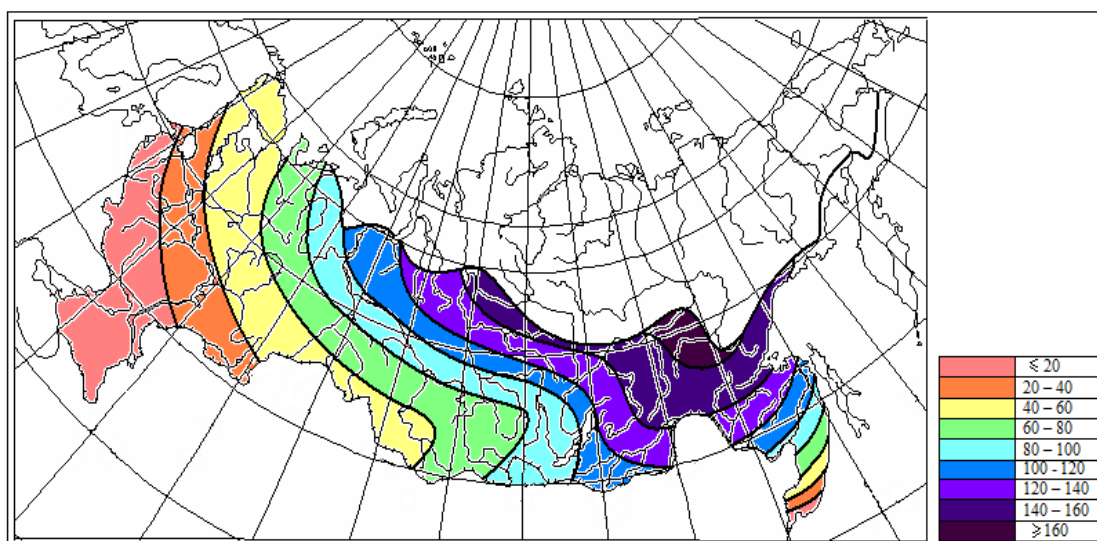


Рис.4 Среднее число дней в году с температурой  $\leq -11^{\circ}\text{C}$  на середину 21-го века.

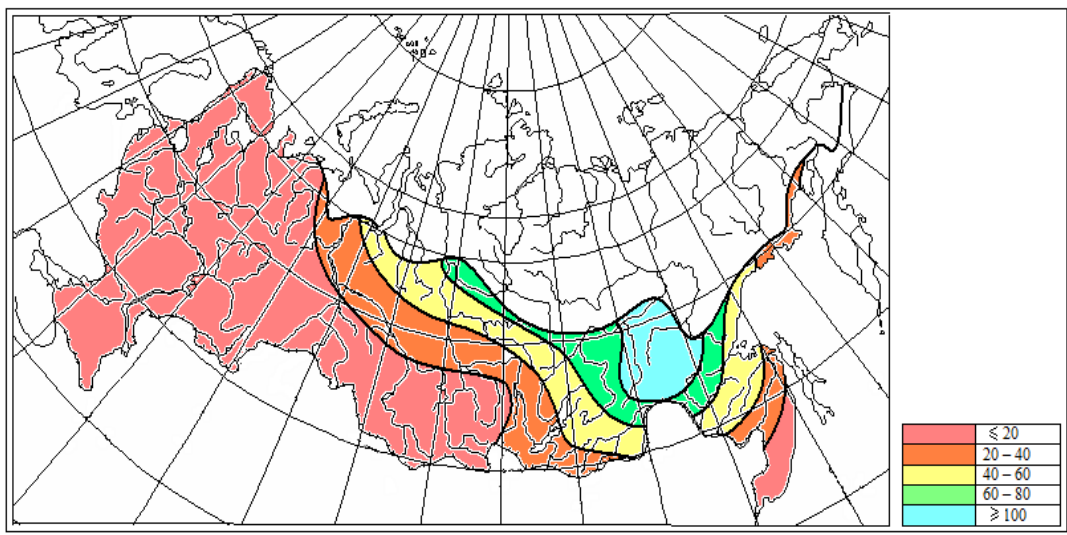


Рис.5 Среднее число дней в году с температурой  $\leq -22^{\circ}\text{C}$  на середину 21-го века.

На рисунках 4 и 5 видно, что в целом характер территориального распределения среднего числа дней в году с выбранными температурами такой же, как и на современном этапе, т.е. повторяемость выбранных критических температур увеличивается с Юго-запада на Северо-восток. На Европейской части России и на Юге Сибири уменьшается число дней в году с температурами  $-11^{\circ}\text{C}$  и  $-22^{\circ}\text{C}$ . Таким образом, можно сделать вывод, что использование тепловых насосов в качестве отопительных систем к середине 21-го века станет несколько более выгодным на большей части территории России (без зоны вечной мерзлоты), кроме Забайкалья.

На основе полученных данных можно оценить вклад энергии низкопотенциального тепла земли в общий энергетический баланс и долю потребляемой энергии, которую могут обеспечить тепловые насосы.

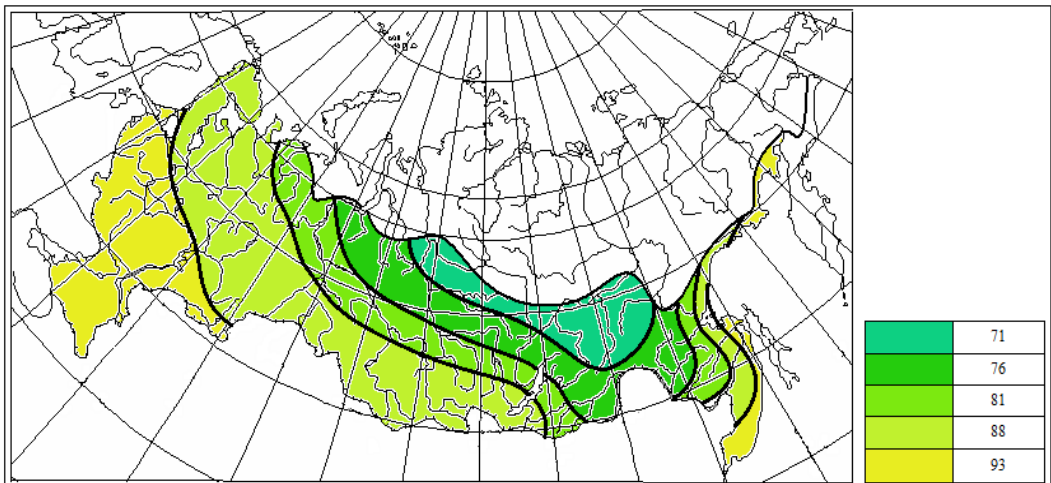


Рис.6 Доля потребляемой энергии, которую могут обеспечить тепловые насосы (%)

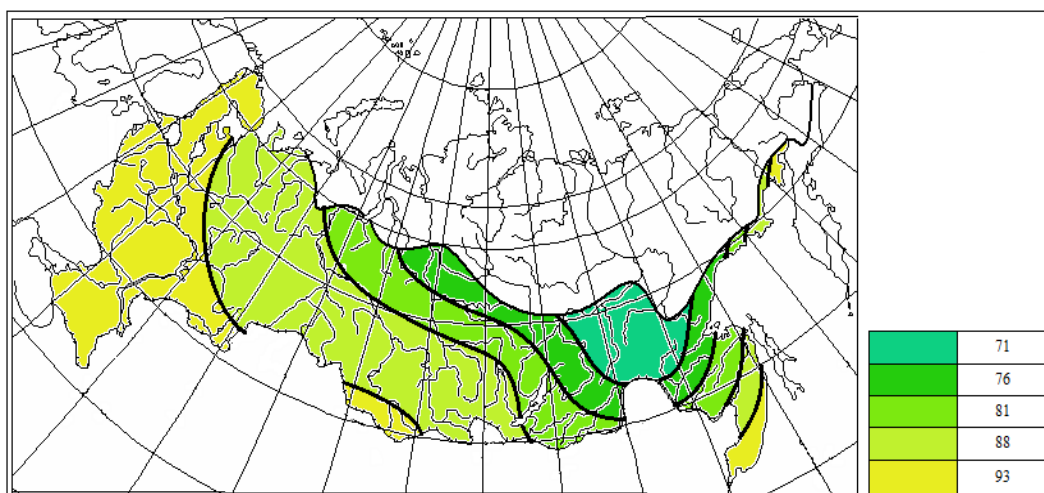


Рис.7 Доля потребляемой энергии, которую могут обеспечить тепловые насосы на середину 21-го века (%)

Для достижения поставленной цели рассчитаны и сопоставлены теплотери здания, и выработка тепла насосом при преобладающих температурах воздуха в зимний период (рис.6 и 7).

В районах с наиболее низкой зимней температурой воздуха, например, в Забайкалье теплотери выбранного стандартного здания за зимний период составляют 25231 кВт/час (СНиП 2.04.05-91, СНиП 23-01-99). Выработка тепловой энергии насосом за данный период равна 17827 кВт/час. Для ее расчета используются данные о производительности насоса при заданной температуре, дополнительные затраты энергии и повторяемость температур, снимаемая с карт. В данном районе доля замещения энергии низкопотенциального тепла составляет 71%. В Южном, Центральном и Западном районе Европейской части России эта доля достигает 93% (теплотери здания за данный период составляют 21199 кВт/час, а выработка тепловой энергии насосом 19747 кВт/час). Необходимо отметить, что к середине 21 века район с долей замещения 93% увеличится, распространившись на большую часть Европейской части России.

Проведенные исследования показывают целесообразность применения тепловых насосов для обеспечения теплом малоэтажных зданий на Европейской части России, в Южных районах Сибири и Дальнего Востока.

*Раздел 2.* Климатические показатели характеристик грунта. Тепловой режим грунта поверхностных слоев земли формируется под действием двух основных факторов – поступающей на поверхность солнечной радиации и потоком радиогенного тепла из земных недр. Сезонные и суточные изменения интенсивности солнечной радиации и температуры наружного воздуха вызывают колебания температуры верхних слоев грунта. Глубина проникновения суточных колебаний температуры наружного воздуха и интенсивности падающей солнечной радиации в зависимости от конкретных почвенно-климатических условий колеблется в пределах от нескольких десятков сантиметров до полутора метров. Глубина проникновения сезонных колебаний температуры наружного воздуха и тепла за счет поступающей солнечной радиации не превышает, как правило, 15–20 м. Температурный режим слоев грунта, расположенных ниже этой глубины («нейтральной зоны»), формируется под воздействием тепловой энергии, поступающей из недр земли, и практически не зависит от сезонных, а тем более, суточных изменений параметров наружного воздуха.

На эффективность работы теплового насоса оказывает влияние среднегодовая температура воздуха. А так как все составные части земляных контуров системы теплового насоса должны устанавливаться на глубину ниже слоя промерзания, то необходимо знать глубину этого слоя для каждого района.

*Раздел 3.* Оценка обеспеченности климатическими ресурсами. Описана методика оценки и районирования индексов обеспеченности климатическими ресурсами, которая представлена в энциклопедии климатических ресурсов (Кобышева, Хайрулин, 2005). При составлении энциклопедии, как показатели, так и разновидности ресурсов, прежде всего, преобразовывались. Первым этапом этого преобразования явилось нормирование климатических характеристик, т. е. приведение значений климатического показателя к безразмерному стандартному виду  $x'$  в диапазоне значений  $[0, 1]$  по формуле

$$x' = (x - a)/(b - a) \quad (2)$$

где  $x$  — значение климатического показателя в исходных единицах;  $a$  и  $b$  — минимальное и максимальное значения  $x$  в ряду данных, в исходных единицах.

Для удобства можно увеличить все значения  $x'$  в 10 раз, т. е. выразить их в баллах. Преобразование по формуле (2) позволит избавиться от отрицательных значений показателя. Выражение для отрицательных значений ресурсов можно записать как

$$B = 10 x' = 10 - 10 (x - a)/\delta, \quad (3)$$

для положительных значений —

$$B = 10(x-a)/\delta, \quad (4)$$

$$\delta = b-a$$

При исследовании климатических ресурсов отдельной области ряд составляется из данных метеорологических станций, а для описания микроклиматических ресурсов строительной площадки или поля необходимо провести измерения в нескольких точках при микросъемке местности.

Исходя из данной методики, в качестве примера для Ленинградской, Новгородской и Псковской областей рассчитаны климатические ресурсы по таким характеристикам, как глубина промерзания почвы и среднегодовая температура воздуха. По произведенным расчетам можно сделать вывод, что для данной территории наиболее благоприятные условия для использования тепловых насосов складываются на границе Псковской и Новгородской областей, а также на Юго-западе Ленинградской области. Относительно неблагоприятным районом является восточная часть Новгородской области.

**В пятой главе** описаны основные ветроэнергетические установки (ВЭУ) РФ которые могут составлять единую энергетическую систему вместе с тепловыми насосами.

*Раздел 1.* В качестве основных достижений малой ветроэнергетики отмечены ветроустановки мощностью от 100 Вт до 20 кВт. Рассмотренные установки могут иметь различные модификации, отличающиеся как

функциональными возможностями, так и конструкторскими особенностями – размером лопастей, размерами мачт, а также и комплектацией резервного оборудования. Это позволяет адаптировать базовые комплекты ВЭУ как под конкретное место установки ВЭУ, так и под конкретного потребителя энергии. Оптимизация систем электроснабжения на базе ВЭУ осуществляется на стадии их проектирования под конкретного заказчика.

*Раздел 2.* В современных условиях очень важна адекватная оценка природного, валового и технического ветроэнергетических потенциалов. Экономический потенциал ветроэнергетических ресурсов представляется особенно важным, т.к. от его величины зависит рациональное использование этого типа энергии в региональном топливно-энергетическом балансе с учетом углеродного баланса, а также других экологических и ресурсных ограничений. В настоящее время 70% территории России, где проживает 10% населения, находятся в зонах децентрализованного энергоснабжения, которые практически совпадают с зонами возможной реализации ветропотенциала (Камчатка, Магаданская область, Чукотка, Сахалин, Таймыр и др.). Это, несомненно, делает целесообразным использование ВЭУ для обеспечения электроэнергией многочисленных автономных потребителей.

*Раздел 3.* С целью увеличения энергоэффективности и автономности загородного жилья можно использовать комплексные системы энергоснабжения, состоящие из теплового насоса и ветродвигателя.

Существует ряд моделей ВЭУ, которые по своим характеристикам мощности могут повысить эффективность комплексного использования возобновляемых источников энергии (ветер и низкопотенциальное тепло Земли). Так, к примеру, по данным производителя ВЭУ «Бриз 5000» на территории Ленинградской области один такой ветродвигатель способен вырабатывать до 1000 кВт·ч/месяц. Этой электроэнергии хватит, чтобы покрыть расходы электроэнергии потребляемой тепловым насосом, до 70%.



При дополнительном использовании энергии солнца еще больше может вырасти использование энергетических ресурсов.

Проблеме выбора рационального уровня теплозащиты зданий является сегодня очень важной. Для ее решения необходим серьезный численный анализ, учитывающий и специфику нашего климата, и особенности применяемого инженерного оборудования, инфраструктуры централизованных сетей, экологическую ситуацию и многое другое. В настоящее время некорректно формулировать требования при проектировании здания без учета взаимосвязей с климатом и системой энергоснабжения, инженерными коммуникациями и пр. Выбор рационального уровня теплозащиты возможен на основе рассмотрения комплекса единой энергетической системы (здание, система энергоснабжения, климат, окружающая среда). При таком подходе возобновляемые источники энергии имеют хорошие конкурентные преимущества.

***В заключении*** работы приведены основные выводы по результатам диссертации.

В результате проведенных исследований достигнута цель работы:

- разработана методика обеспечения теплом на регулярной основе загородного коттеджного строительства;
- установлены климатические индексы, характеризующие зависимость получаемого низкопотенциального тепла Земли от климатических условий;
- в основе разработанной методики лежит использование низкопотенциального тепла Земли, реализуемое с помощью тепловых насосов. Предложенная методика использована для создания карт климатических ресурсов низкопотенциального тепла земли;
- выполнена оценка возможных будущих значений технического потенциала низкопотенциального тепла Земли.



Эффективность предложенной методики зависит от температурных условий воздуха холодного периода года, а также от числа градусодней. При этом следует отметить, что в условиях вечной мерзлоты данная методика нами не использовалась, хотя уже выполнена работа (Васильев, 2006) в которой утверждается, что существует принципиальная возможность использования тепловых насосов и в грунтах в районах вечной мерзлоты, но детального описания ее в литературе и результаты реализации отсутствуют.

В настоящее время введены поправки в закон об электроэнергетике, которые устанавливают статус возобновляемых источников энергии. На применение ВИЭ обращено внимание правительства и разрабатывается ряд нормативных документов. Однако для практического принятия решений необходима разработка не только нормативных, но и организационных документов. Прошедший в мае “Невский международный экологический конгресс 2010” подтвердил важность развития возобновляемых источников энергии для реализации закона №261 об энергосбережении и энергетической эффективности.

#### **Основные работы и публикации по теме диссертации:**

- 1. Смирнов Д.В. Климатические ресурсы низкопотенциального тепла Земли доставляемого тепловыми насосами // Труды ГГО. 2010. Вып. 561 С. 138-144**
- 2. Смирнов Д.В. Методы оценки потенциала ветроэнергетических ресурсов РФ / Иванова Е.В., Смирнов Д.В. // Труды ГГО. 2009. Вып. 559 С.113-121**