

ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА, ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И ОСВЕЩЕНИЕ

УДК 621.577.22

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-2-125-137

А.В. ТОЛСТЫХ, Ю.Н. ДОРОШЕНКО,

В.В. ПЕНЯВСКИЙ, И.О. ХАЛИМОВ,

Томский государственный архитектурно-строительный университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ. ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Проведен анализ и систематизация данных, связанных с особенностями расчета и моделирования тепломассообменных процессов, определяющих режимы работы тепловых насосов. Рассмотрены ключевые положения физико-математического моделирования, направленного на определение закономерностей работы геотермальных тепловых насосов. Обозначены основные проблемы, которые являются нерешенными и требуют дополнительных исследований.

Показано, что численные методы, предусматривающие избыточный учет всех основных физических механизмов, влияющих на эффективность сбора грунтового тепла, как правило, малоприменимы для практических расчетов при проектировании теплонасосных систем. Использование результатов численного или натурного моделирования ограничено конкретными географическими и климатическими условиями, не позволяющими получить относительно универсальные обобщения, в которых проводились численные, натурные или лабораторные эксперименты. Особенно заметен недостаток полных методик проектирования систем сбора грунтового тепла в северных регионах с холодным климатом.

Выявлено перспективное направление будущих исследований, в рамках которого предполагается получение данных, отражающих влияние переноса тепла и влаги в грунте на производительность геотермальных тепловых насосов.

Ключевые слова: геотермальный тепловой насос; грунтовые теплообменники; физико-математическое моделирование; сбор грунтового тепла; тепловой режим грунта; тепловая нагрузка на грунт.

Для цитирования: Толстых А.В., Дорошенко Ю.Н., Пенявский В.В., Халимов И.О. Моделирование работы тепловых насосов. Проблемы и перспективы // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 2. С. 125–137.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-2-125-137.

A.V. TOLSTYKH, YU.N. DOROSHENKO,
V.V. PENYAVSKY, I.O. KHALIMOV,
Tomsk State University of Architecture and Building

SIMULATION OF HEAT PUMP OPERATION. PROBLEMS AND PROSPECTS

The article presents the calculation and modeling of heat and mass transfer that determines the operating modes of heat pumps. The physical and mathematical simulation aims at the operation of geothermal heat pumps. It is shown that numerical simulation of the main physical mechanisms affecting the efficiency of the ground heat collection are little used for practical calculations in design of heat pump systems. The use of numerical simulation results is limited by specific geographical and climatic conditions that do not allow generalizing numerical, full-scale or laboratory experiments. Especially noticeable is a lack of complete design methods of ground heat collection systems in northern regions. A promising direction of future research is identified to obtain the data on the effect of heat and moisture transfer in the soil on the performance of geothermal heat pumps.

Keywords: geothermal heat pump; ground heat exchanger; physical and mathematical simulation; ground heat collection; thermal soil conditions.

For citation: Tolstykh A.V., Doroshenko Yu.N., Penyavskii V.V., Khalimov I.O. Modelirovanie raboty teplovykh nasosov. Problemy i perspektivy [Simulation of heat pump operation. problems and prospects]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2022. V. 24. No. 2. Pp. 125–137.
DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-2-125-137

Введение

Известно, что в почвенно-климатических условиях России наиболее целесообразно использовать теплонасосные системы теплоснабжения, в которых грунт поверхностных слоев земли играет роль низкотемпературного источника тепловой энергии [1, 2].

В настоящее время в России значительно увеличилось количество теплонасосных систем [3, 4], использующих низкопотенциальное тепло поверхностных слоев земли. В зарубежной технической литературе такие системы обозначаются как GHP – geothermal heat pumps, геотермальные тепловые насосы. Уже более 50 лет эти системы эксплуатируются в США, Канаде и в странах Центральной и Северной Европы: Австрии, Германии, Швеции и Швейцарии.

Несмотря на большой энергосберегающий потенциал, применение тепловых насосов в климатических условиях нашей страны ограничено отсутствием инженерных методик расчета, учитывающих все многообразие факторов, влияющих на работу теплового насоса. Большинство исследований основано на достаточно сложных вычислениях [5, 6], в которых необходимо учитывать помимо механизмов процессов тепломассопереноса различные физико-химические характеристики грунтового массива в их сезонной динамике.

Обзор ключевых физико-математических моделей для моделирования работы тепловых насосов

Тепловые физико-математические модели, предназначенные для выяснения закономерностей работы систем сбора грунтового тепла, представляют

собой группу методов, которые отличаются друг от друга использованием представлений о линейных или цилиндрических, бесконечных или конечных источниках тепла [7, 8]. Многие зарубежные исследователи определяют температуры стенки ствола буровой скважины, исходя из чистого расхода тепла от земли и специальных функций, так называемых g -функций, полученных Эскилсоном [9] численно, на основе радиально-осевого решения для уравнения тепла в цилиндрических координатах при допущении о незначительных теплоемкостях для жидкого теплоносителя и трубы, по которой он циркулирует в грунте. В модели Эскилсона числовые решения были получены, чтобы определить температурное распределение для единственной буровой скважины, а затем в результате использования суперпозиции в пространственных и временных координатах можно было найти температурное распределение для определенной конструкции теплообменника в условиях известного притока грунтового тепла. После введения Эскилсоном g -функций было осуществлено много обобщений и модификаций этого метода, имеющих цель снять присущие ему ограничения и улучшить его точность. Например, в статьях [10, 11] для моделирования работы контура испарителя и грунтового теплообменника предлагалось общее решение Эскилсона и Клаессона [12], которое для произвольного распределения температуры стенки по глубине скважины было модифицировано для граничного условия первого рода. В результате в работе [11] построена методика приближенного численного расчета совместной работы вертикального грунтового теплообменника и испарителя теплового насоса, установлено, что в рассматриваемых условиях тепловой поток аппаратов существенно зависит от температуры грунта.

Отправной точкой для отечественных исследований в области моделирования работы грунтовых тепловых насосов стали работы Г.П. Васильева [13]. Разработанный автором метод математического моделирования нестационарного пространственного теплового режима грунтового массива с расположенными в нем теплообменниками основан на использовании специальной функции влияния стоков тепла на естественный тепловой режим грунта. Для того чтобы выполнить обратный переход от функции влияния стоков тепла к действительному распределению температуры, реализующейся в период эксплуатации грунтового теплового насоса, при условии использования осредненной «эквивалентной» теплопроводности, отражающей реальные характеристики грунта, а также допущения возможности аппроксимации регистра труб линейным стоком тепла, не учитывая влияния соседних труб грунтового теплообменника, автор [13] сформулировал 3-мерную математическую модель теплового режима систем теплосбора геотермальных теплонасосов.

В работе [14] предложена математическая модель, описывающая тепловые процессы в массиве грунта с теплообменником, в которой учтено взаимное влияние соседних труб, а также зависимость теплофизических свойств грунта от температуры. Авторы [14] считают, что переход к функции влияния стоков тепла на естественный тепловой режим грунта [13] нецелесообразен, т. к. при этом необходимо учитывать температуру грунта (при отсутствии теплового воздействия) в источниковом члене уравнения теплопроводности при получении температурного поля массива грунта. Для того чтобы отразить влияние ко-

лебаний температуры грунта на поверхности на распределение температуры на разных глубинах, в [14] используется известное аналитическое решение одномерной нестационарной полубесконечной задачи теплопроводности.

При эксплуатации геотермального теплового насоса в течение длительного времени температура грунта вблизи грунтового теплообменника может значительно уменьшаться по сравнению с температурой участков грунтового массива, на которых не сказывается взаимодействие с тепловым насосом. За теплый период грунт может не успеть прогреться до температур, соответствующих его естественному состоянию. В работе [15] подчеркивается актуальность задач по выбору рациональных режимов работы тепловых насосов, которые позволили бы использовать грунт как источник низкопотенциального тепла, не приводя к существенному понижению его температуры в долгосрочной перспективе и обеспечивая требуемое поступление тепловой энергии. Авторами [15] предложена полученная в результате численного моделирования для климатических условий Украины регрессионная зависимость для определения теплосъема с грунта горизонтальным теплообменником, которая не учитывает глубину заложения, диаметр и теплофизические свойства материала труб.

Относительно небольшое количество исследований посвящено моделированию нестационарного теплопереноса в грунте с проложенными в нем трубчатыми теплообменниками в полной 3-мерной постановке с учетом цилиндрической формы источников (стоков) тепла. В работе [16] предложена численная 3-мерная модель, проверенная в эксперименте, которая может использоваться для анализа температурного режима теплообменника и эффективности работы теплонасосной системы «грунт – теплоноситель» горизонтального исполнения. Авторами [17] разработана новая математическая модель распространения тепла от заглубленного источника (горизонтального трубопровода), в которой учитываются не только лучистое излучение, приводящее к нелинейным краевым условиям на поверхности грунта, и характеристики различных слоев грунта, в которых залегает подземный трубопровод, но и фильтрация жидкости во влажном грунте и ее испарение.

Анализ эффективности численного моделирования работы систем сбора грунтового тепла исходя из результатов натуральных экспериментов

Значительный интерес представляют исследования, в которых проведено моделирование и осуществлена экспериментальная проверка работы тепловых насосов совместно с системой отопления конкретных зданий и сооружений. В работе [18] были проанализированы данные по входным и выходным температурам теплоносителя в грунтовых теплообменниках, температурам грунта, распределению по времени пиков и спадов потребления энергии и коэффициента производительности тепловых насосов для административных зданий в различных крупных городах Китая. В работе [19] выполнены аналогичные исследования по эффективности и устойчивости работы тепловых насосов как источников хладотеплоснабжения административных зданий, расположенных в регионах Китая с холодным климатом. Всесторонний анализ результатов экспериментов и численного моделирования показал, что геотермальные теплонасосные системы зданий в холодных районах Китая могут работать устойчиво

в течение длительного срока и с высокой эффективностью, когда отношение ежегодного суммарного потребления энергии на холодоснабжение к ежегодному суммарному потреблению энергии на теплоснабжение находится в пределах от 1:1 до 7:1. Авторами [18, 19] также установлено, что при определенных сочетаниях климатических и геологических факторов использование геотермальных тепловых насосов в системах хладотеплоснабжения административных зданий нецелесообразно.

Несмотря на высокую энергоэффективность, широкое распространение грунтовых тепловых насосов ограничено значительными начальными инвестиционными затратами. Как отмечено в статье [20], комбинированное применение солнечной энергии и теплового насоса может снизить стоимость доступной энергии и более высокую энергетическую эффективность использования по сравнению со стандартными системами хладотеплоснабжения. Большое преимущество, возникающее при эксплуатации теплового насоса совместно с системой солнечных коллекторов, заключается в том, что солнечная энергия может обеспечить источник тепла с более высокой температурой, чем атмосферный воздух или грунт в холодный период года, в связи с чем коэффициент преобразования теплового насоса может быть увеличен. Кроме того, температура теплоносителя в солнечных коллекторах близка к температуре окружающей среды (низкотемпературные солнечные коллекторы), что приводит к повышению энергетической эффективности системы солнечного теплоснабжения из-за уменьшения теплопотерь.

Установки, предусматривающие совместное использование, низкотемпературных солнечных коллекторов и тепловых насосов, обычно делятся на два типа: открытый или закрытый. В системах открытого типа солнечный коллектор служит испарителем теплового насоса [21], и хладагент циркулирует через солнечный коллектор. В установках закрытого типа солнечное тепло поступает к теплоносителю в тепловом насосе через теплообменник [22]. Авторы [22] вместе с компьютерным моделированием провели натурные испытания системы отопления с солнечными коллекторами и с тепловым насосом в чрезвычайно холодных климатических условиях. Были определены оптимальные режимы функционирования, оценена теплопроизводительность системы в типичные зимние дни. Результаты испытаний показали, что энергосбережение при использовании солнечного коллектора составило 55 %, по сравнению с системой, в которой источником тепла являлся газовый бойлер.

Закрытые системы могут также быть интегрированы с источниками низкопотенциального грунтового тепла. Авторы работы [20] выполнили моделирование (в специализированном программном пакете TRNSYS) такой системы, обеспечивающей теплом (холодом) многоэтажный дом в климатических условиях различных регионов Европы. Было установлено, что при работе грунтовых теплообменников только в режиме съема тепла из грунта происходит существенное уменьшение температуры грунта в долгосрочной перспективе. Тепло, передаваемое в грунт из солнечных тепловых коллекторов в теплый период года, позволяет сбалансировать тепловую нагрузку на грунт в течение года и может помочь в поддержании эффективной работы тепловых насосов. Кроме того, при использовании системы с солнечными тепловыми коллекторами общая

длина буровой скважины может быть уменьшена, что приводит к снижению стоимости установки вертикальных грунтовых теплообменников.

Работа [23] представляет собой экспериментальное исследование комбинированной системы отопления небольшого частного дома, источниками тепла в которой служат солнечные коллекторы и грунтовой тепловой насос. Летом почва используется для сброса избыточного тепла из системы холодоснабжения дома. В зимнее время здание отапливалось с помощью солнечной энергии и тепла, извлекаемого из почвы тепловым насосом. После первого года работы солнечное тепло, накопленное в грунте, обеспечивает его более высокую температуру, которая благоприятна для повышения коэффициента преобразования теплового насоса. Несколько лет спустя, из-за значительного повышения температуры почвы, время работы солнечных коллекторов должно быть снижено, чтобы не нарушить тепловой баланс грунта. Эта система отопления обеспечивает теплопроизводительность, достаточную для обогрева небольшого отдельно стоящего дома в холодных областях Китая.

Оценка влияния тепловых насосов на избыточное замораживание грунтов

При эксплуатации грунтовых тепловых насосов в регионах с холодным климатом возможно замораживание почвы вокруг грунтовых теплообменников. Замораживание оказывает существенное влияние на температуру грунта и его теплофизические характеристики. В работе [24] построена двумерная модель теплопередачи с учетом фазового перехода при замораживании (таянии) в слое грунта, окружающем трубу теплообменника грунтового насоса. В результате численного решения поставленной задачи было выяснено влияние замораживания почвы, содержания грунтовой воды на колебания температуры грунта и проанализирована возможность возникновения и развития тепловой неустойчивости грунта при продолжительной эксплуатации грунтового насоса. Замораживание почвы может уменьшить снижение температуры грунта и таким образом увеличить разницу температур жидкости в трубах грунтового теплообменника и удаленных слоев грунта. При замораживании грунта снижается его температуропроводность. Теплопередача от удаленных слоев грунта до буровой скважины теплообменника будет ослаблена из-за уменьшения температуропроводности почвы и таким образом сохранит почву на более низком температурном уровне, что может привести к снижению коэффициента полезного действия теплового насоса.

В большинстве отечественных исследований теплофизических процессов, протекающих в промерзающих грунтах, используется модель промерзающего, оттаивающего и мерзлого грунта, предложенная Н.А. Цытовичем, Я.А. Кроником, В.Ф. Киселевым [25–27]. Например, в работе [27] разработана методика численного моделирования процесса промерзания и оттаивания, учитывающая изменение характеристик грунта при миграции влаги во время процесса промерзания-оттаивания. В [29] проведен анализ трехмерного процесса замерзания и оттаивания столбика грунта, а также грунта вокруг горизонтального заглубленного трубопровода на основе численных расчетов в программном комплексе Termoground, который разработан геотехниками Санкт-Петербурга под руководством профессора В.М. Улицкого. Авторы ра-

боте [30] решают аналогичную нестационарную и нелинейную тепловую задачу промерзания-оттаивания грунта в двумерной постановке с использованием программы COSMOS/M. В работе [31] на основе тех же моделей, что и в [28, 29], рассматривается применение программного комплекса Frost 3D для расчёта трехмерных температурных полей в основаниях фундаментов сооружений, возводимых в областях с вечной мерзлотой.

Хорошими перспективами для практического применения обладают относительно немногочисленные попытки использования упрощенных аналитических подходов к моделированию тепловых режимов систем сбора грунтового тепла, работающих в условиях многократного замораживания и оттаивания. Моделирование искусственного замораживания грунта в пространстве около вертикальной обсадной трубы с циркулирующим охладителем проведено в работе [32]. Авторы обосновали пренебрежимо малое влияние на температуру и агрегатное состояние грунтовой воды процессов переноса тепла в вертикальном направлении, что позволило получить эффективную одномерную модель, которая может применяться для расчета теплообмена во время процесса замораживания искусственного заземления при различных операционных условиях.

В работе [13] предложена методика определения эквивалентной теплопроводности грунтового массива, учитывающей изменение агрегатного состояния влаги в поровом пространстве грунта. Эквивалентная теплопроводность используется автором [13] при моделировании процессов тепломассопереноса, формирующих тепловой режим в массиве грунта, находящемся в пределах зоны теплового влияния регистра труб грунтового теплообменника теплового насоса. Зарубежные авторы при разработке аналитических моделей считают целесообразным использовать понятие эквивалентной теплопроводности для прогнозирования закономерностей теплотеноса в грунте [9, 12].

Заключение

В настоящее время в рамках рассмотренных традиционных подходов к моделированию тепловых режимов систем сбора низкопотенциального грунтового тепла получены важные результаты, облегчающие проведение расчетов и проектирования грунтовых тепловых насосов с учетом теплофизических процессов, протекающих в грунте. В то же время очевидно, что на сегодняшний день существуют проблемы, которые остаются нерешенными и требуют дополнительных исследований.

Несмотря на то, что численные методы, предусматривающие использование конечных разностей или конечных элементов, достаточно тщательно учитывают все основные физические механизмы, они малоприменимы для практических расчетов. Большинство работ по численному моделированию работы грунтовых тепловых насосов выполнено с использованием коммерческого программного обеспечения, такого как Ansys, Transys, Cosmos/m и т. д. Однако очень трудно добиться широкого применения коммерческого программного обеспечения при разработке конкретных проектов или регулировании работы уже смонтированных теплонасосных систем. Для проектировщиков и инженеров также затруднительно использовать вычислительное про-

граммное обеспечение, требующее высокой квалификации в области сложных процессов тепломассопереноса и гидродинамики жидкости. Поэтому большинство исследователей в результате численного или натурного моделирования стремятся получить обобщенные аналитические зависимости, пригодные к использованию в рекомендациях по проектированию. Такие результаты получены, но их применение ограничено теми географическими и климатическими условиями, в которых проводились численные, натурные или лабораторные эксперименты. В частности, для районов Западной Сибири не разработаны достаточно полные методики проектирования систем сбора грунтового тепла, учитывающие сезонное изменение климатических параметров, и нет соответствующего инженерного программного обеспечения. Отсутствуют отечественные исследования по совместной работе тепловых насосов и систем отопления конкретных зданий в районах Сибири и Дальнего Востока, хотя известно, что в холодных регионах Китая при определенных сочетаниях климатических и геологических факторов использование геотермальных тепловых насосов для теплоснабжения неэффективно.

Функционирование теплонасосных установок только в режиме съема тепла из грунта может привести к нежелательному снижению его температуры на участке с трубами грунтовых теплообменников. Избыточное солнечное тепло, сбрасываемое в грунт в летний период, позволяет избежать развития тепловой неустойчивости в грунте. Исходя из проведенного анализа зарубежного опыта совместного использования солнечной энергии и низкопотенциального грунтового тепла, можно сделать вывод о необходимости выяснения возможности комбинированного использования грунтовых тепловых насосов и солнечных коллекторов в системах теплоснабжения жилых и административных зданий в условиях Западной Сибири.

Остается нерешенным вопрос о точной и эффективной оценке взаимного влияния переноса тепла и влаги в грунте на производительность геотермальных тепловых насосов. Закономерности сложных термомеханических процессов, которые протекают в грунтовых слоях около труб грунтовых теплообменников при многократном нагревании и охлаждении, не выяснены и в настоящее время. Несмотря на то, что разработаны полнофункциональные модели, учитывающие основные факторы, определяющие ход процессов замерзания и оттаивания грунта, их применение к моделированию тепловлажностных режимов (с учетом скрытой теплоты возможных фазовых переходов) в грунтовых системах сбора тепла возможно только после модификации и проверки в конкретных геологических и климатических условиях.

Все рассмотренные подходы к моделированию работы грунтовых теплонасосных систем не учитывают влияния миграции грунтовых вод на интенсивность теплообмена между грунтом и трубами грунтовых теплообменников, которое может быть весьма значительным, и, как следствие, не могут применяться в случаях, когда необходимо осуществлять долгосрочное прогнозирование эффективности систем сбора грунтового тепла с учетом исходных данных по гидрогеологии грунтов района применения. Таким образом, необходимо проведение дальнейших исследований по моделированию тепло-

массообменных процессов в системах сбора низкопотенциального тепла грунта при их многолетней эксплуатации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Васильев Г.П.* Геотермальные теплонасосные системы теплоснабжения и эффективность их применения в климатических условиях России // АВОК. 2007. № 5. С. 58–68.
2. *Васильев Г.П.* Применение ГТСТ в России // Энергия: экономика, техника, экология. 2009. № 7. С. 22–29. ISSN 0233-3619.
3. *Мойдинов Д.Р., Степанова Е.Г., Черноморова Д.А.* Расчет и моделирование работы абсорбционных тепловых насосов для системы теплоснабжения // Технические и технологические системы : материалы 12-й Международной научной конференции. Краснодар : ООО «Издательский Дом – Юг», 2021. С. 170–173.
4. *Еделев А.В., Зоркальцев В.И., Маринченко А.Ю.* Моделирование процесса теплоснабжения тепловыми насосами зданий на побережье озера Байкал // Системный анализ и математическое моделирование. 2020. Т. 2. № 2. С. 5–17.
5. *Псаров С.А., Шумилин Е.В.* Моделирование работы геотермального теплового насоса с восстановлением теплоты грунта в теплый период // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 1–1 (103). С. 111–117.
6. *Стефанович С.Ю., Бондаренко А.В.* Теплотехническое моделирование вертикальных грунтовых теплообменников тепловых насосов методом конечных разностей // Современные научные исследования и инновации. 2018. № 6 (86). С. 15.
7. *Atam E., Helsen L.* Ground-coupled heat pumps: Part 1 – Literature review and research challenges in modeling and optimal control // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015. P. 1–15. DOI: 10.1016/j.rser.2015.10.007
8. *Min Li.* Review of analytical models for heat transfer by vertical ground heat exchangers (GHEs): A perspective of time and space scales // Applied Energy. 2015. № 151. P. 178–191. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.04.070
9. *Eskilson P.* Thermal analysis of heat extraction boreholes [Ph.D. thesis]. University of Lund, Sweden, 1987. 264 p.
10. *Филатов С.О., Володин В.И.* Численное моделирование утилизатора теплоты грунта с теплоприемником // Труды Белорусского государственного технологического университета (БГТУ). 2012. № 3. С. 179–183.
11. *Филатов С.О.* Тепловой расчет вертикальных грунтовых теплообменников // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ – Энергетика : международный научно-технический журнал. 2013. № 4. С. 81–91.
12. *Eskilson P., Claesson J.* Simulation model of thermally interacting heat extraction boreholes // Numerical Heat Transfer. 1988. V. 13. P. 149–165.
13. *Васильев Г.П.* Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоев земли: монография. Москва : Издательский дом «Граница», 2006. 176 с.
14. *Костиков А.О., Харлампиди Д.Х.* Влияние теплового состояния грунта на эффективность теплонасосной установки с грунтовым теплообменником // Энергетика: економіка, технології, екологія (ISSN 1613-5420). 2009. № 1. С. 32–40.
15. *Мацевитый Ю.М., Тарасова В.А., Харлампиди Д.Х.* Восстановление теплового потенциала грунта за счет выбора рациональных режимов работы теплонасосной системы // Тезисы докладов и сообщений XIV Минского международного форума по тепло- и массообмену. 2012. Т. 1. С. 736–739.
16. *Басок Б.И., Давыденко Б.В., Тесля А.И., Лунина А.А.* Численное моделирование теплопереноса в грунтовом массиве при работе горизонтального грунтового коллектора // Тепловые насосы : электронный журнал. URL: http://esco.co.ua/journal/2012_6/art373.pdf (дата обращения: 15.02.2022).
17. *Башиуров В.В., Ваганова Н.А., Филимонов М.Ю.* Численное моделирование процессов теплообмена в грунте с учетом фильтрации жидкости // Вычислительные технологии. 2011. Т. 16. № 4. С. 3–18.

18. Zhihua Zhou, Zhiming Zhang, Guanyi Chen, Jian Zuo, Pan Xu, Chong Meng, Zhun Yu. Feasibility of ground coupled heat pumps in office buildings: A China study // *Applied Energy*. 2015. № 162. P. 266–277. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.10.055.
19. Zhijian Liu, Wei Xu, Cheng Qian, Xi Chen, Guangya Jin. Investigation on the feasibility and performance of ground source heat pump (GSHP) in three cities in cold climate zone, China // *Renewable Energy*. 2015. № 84. P. 89–96, DOI: 10.1016/j.renene.2015.06.019
20. Emmi Giuseppe, Angelo Zarrella, Michele De Carli, Antonio Galgaro. An analysis of solar assisted ground source heat pumps in cold climates // *Energy Conversion and Management*. 2015. № 106. P. 660–675. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.10.016
21. Huifang Liu, Yiqiang Jiang, Yang Yao. The field test and optimization of a solar assisted heat pump system for space heating in extremely cold area // *Sustainable Cities and Society*. 2015. № 13. P. 97–104. DOI: 10.1016/j.scs.2014.05.002
22. Caglar Ahmet, Cemil Yamali. Performance analysis of a solar-assisted heat pump with an evacuated tubular collector for domestic heating // *Energy and Buildings*. 2012. № 54. P. 22–28. DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.08.003
23. Xiao Wang, Maoyu Zheng, Wenyong Zhang, Shu Zhang, Tao Yang. Experimental study of a solar-assisted ground-coupled heat pump system with solar seasonal thermal storage in severe cold areas // *Energy and Buildings*. 2010. № 42. P. 2104–2110. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.06.022
24. Weibo Yang, Lei Kong, Yongping Chen. Numerical evaluation on the effects of soil freezing on underground temperature variations of soil around ground heat exchangers // *Applied Thermal Engineering*. 2015. № 75. P. 259–269. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.09.049
25. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. Москва : Высш. школа, 1973. 448 с.
26. Кроник Я.А., Демин И.И. Расчеты температурных полей и напряженно-деформированного состояния грунтовых сооружений методом конечных элементов. Москва : МИСИ, 1982. 102 с.
27. Киселев М.Ф. Теория сжимаемости оттаивающих грунтов под давлением. Ленинград : Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1978. 176 с.
28. Кудрявцев С.А., Кажарский А.В. Численное моделирование процесса миграции влаги в зависимости от скорости промерзания грунтов // *Инженерно-строительный журнал*. 2012. № 4. С. 33–38.
29. Кудрявцев С.А. Расчеты процесса промерзания и оттаивания по программе «Termoground» // *Реконструкция городов и геотехническое строительство*. URL: <http://www.georec.spb.ru/journals/08/files/pdf/0508007.pdf> (дата обращения: 22.02.2022).
30. Веселов В.В., Беляков В.А. Теплоизолированный малозаглубленный фундамент: работа в сезонно-промерзающих грунтах и практика теплового расчета // *Инженерно-строительный журнал*. 2011. № 8. С. 13–18.
31. Коваленко В.И. Применение программы Frost 3d для трёхмерного моделирования распределения температур в вечномёрзлом грунте при его термостабилизации // *Журнал нефтегазового строительства*. 2013. № 3. С. 14–18.
32. Vitel M., Rouabhi A., Tijani M., Guerin F. Modeling heat transfer between a freeze pipe and the surrounding ground during artificial ground freezing activities // *Computers and Geotechnics*. 2015. № 63. P. 99–111. DOI: 10.1016/j.compgeo.2014.08.004

REFERENCES

1. Vasil'ev G.P. Geotermal'nye teplonasosnye sistemy teplosnabzheniya i effektivnost' ikh primeneniya v klimaticheskikh usloviyakh Rossii [Geothermal heat pump systems of heat supply and efficiency of their application in the climatic conditions of Russia]. *AVOK*. 2017. No. 5. Pp. 58–68. (rus)
2. Vasil'ev G.P. Primenenie GTST v Rossii [Application of MCT in Russia]. *Energiya*. 2009. No. 7. Pp. 22–29. (rus)
3. Moidinov D.R., Stepanova E.G., Chernomorova D.A. Raschet i modelirovanie raboty absorbtionnykh teplovykh nasosov dlya sistemy teplosnabzheniya [Calculation and simulation of absorption heat pump operation for heat supply system]. In: *Tekhnicheskie i tekhnologicheskie sistemy. Materialy dvenadtsatoi Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii (Proc.12th*

- Int. Sci. Conf. 'Engineering and Process Systems'*). Krasnodar: Izdatel'skii Dom – Yug, 2021. Pp. 170–173. (rus)
4. Edelev A.V., Zorkal'tsev V.I., Marinchenko A.Yu. Modelirovanie protsessa teplosnabzheniya teplovymi nasosami zdaniia na poberezh'e ozera Baikal [Heat supply simulation in buildings of nearby Lake Baikal]. *Sistemy analiz i matematicheskoe modelirovanie*. 2020. V. 2. No. 2. Pp. 5–17. (rus)
 5. Psarov S.A., Shumilin E.V. Modelirovanie raboty geotermal'nogo teplovogo nasosa s vosstanovleniem teploty grunta v teplyi period [Simulation of geothermal heat pump operation with soil heat recovery in a warm period]. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal*. 2021. No. 1–1 (103). Pp. 111–117. (rus)
 6. Stefanovich S.Yu., Bondarenko A.V. Teplotekhnicheskoe modelirovanie vertikal'nykh gruntovykh teploobmennikov teplovykh nasosov metodom konechnykh raznostei [Thermotechnical modeling of vertical soil heat pump exchangers by the finite difference method]. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii*. 2018. No. 6 (86). Pp. 15. (rus)
 7. Atam E., Helsen L. Ground-coupled heat pumps: Part 1 – Literature review and research challenges in modeling and optimal control. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Pp. 1–15. DOI: 10.1016/j.rser.2015.10.007
 8. Min Li. Review of analytical models for heat transfer by vertical ground heat exchangers (GHEs): A perspective of time and space scales. *Applied Energy*. 2015. No. 151. Pp. 178–191. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.04.070
 9. Eskilson P. Thermal analysis of heat extraction boreholes. PhD Thesis. University of Lund, Sweden, 1987. 264 p.
 10. Filatov S.O., Volodin V.I. Chislennoe modelirovanie utilizatora teploty grunta s teplopriemnikom [Numerical modeling of soil heat utilizer with heat receiver]. *Trudy Belorusskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2012. No. 3. Pp. 179–183. (rus)
 11. Filatov S.O. Teplovoi raschet vertikal'nykh gruntovykh teploobmennikov [Thermal analysis of vertical ground heat exchangers]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob"edinenii SNG*. 2013. No. 4. Pp. 81–91. (rus)
 12. Eskilson P., Claesson J. Simulation model of thermally interacting heat extraction boreholes. *Numerical Heat Transfer*. 1988. V. 13. Pp. 149–165.
 13. Vasil'ev G.P. Teplokhladonasabzhenie zdaniia i sooruzhenii s ispol'zovaniem nizkopotentsial'noi teplovoi energii poverkhnostnykh sloev Zemli [Heat and cold supply of buildings with low-potential thermal energy of the Earth surface layers]. Moscow: Granitsa, 2006. 176 p. (rus)
 14. Kostikov A.O., Kharlampidi D.Kh. Vliyanie teplovogo sostoyaniya grunta na effektivnost' teplonasosnoi ustanovki s gruntovym teploobmennikom [The influence of soil thermal state on heat pump with soil heat exchanger]. *Energetika: ekonomika, tekhnologii, ekologiya*. 2009. No. 1. Pp. 32–40. (rus)
 15. Matsevityi Yu.M., Tarasova V.A., Kharlampidi D.Kh. Vosstanovlenie teplovogo po-tentsiala grunta za schet vybora ratsional'nykh rezhimov raboty teplonasosnoi sistemy [Ground thermal potential recovery by selecting operation modes of heat pump system]. In: Tezisy dokladov i soobshchenii 14 Minskogo mezhdunarodnogo foruma po teplo- i massoobmenu (*Proc. Minsk 14th Int. Forum on Heat and Mass Transfer*). 2012. V. 1. Pp. 736–739. (rus)
 16. Basok B.I., Davydenko B.V., Teslya A.I., Lunina A.A. Chislennoe modelirovanie teploperenosa v gruntovom massive pri rabote gorizontalnogo gruntovogo kollektora [Numerical modeling of heat transfer in soil during operation of a horizontal soil collector]. *Teplovye nasosy*. Available: http://esco.co.ua/journal/2012_6/art373.pdf (accessed February 15, 2022). (rus)
 17. Bashurov V.V., Vaganova N.A., Filimonov M.Yu. Chislennoe modelirovanie protsessov teploobmena v grunte s uchetom fil'tratsii zhidkosti [Numerical modeling of heat transfer processes in soil with liquid filtration]. *Vychislitel'nye tekhnologii*. 2011. V. 16, No. 4. Pp. 3–18. (rus)
 18. Zhihua Zhou, Zhiming Zhang, Guanyi Chen, Jian Zuo, Pan Xu, Chong Meng, Zhun Yu. Feasibility of ground coupled heat pumps in office buildings: A China study. *Applied Energy*. 2015. No. 162. Pp. 266–277. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.10.055
 19. Zhijian Liu, Wei Xu, Cheng Qian, Xi Chen, Guangya Jin. Investigation on the feasibility and performance of ground source heat pump (GSHP) in three cities in cold climate zone, China. *Renewable Energy*. 2015. No. 84. Pp. 89–96. DOI: 10.1016/j.renene.2015.06.019

20. *Emmi Giuseppe, Angelo Zarrella, Michele De Carli, Antonio Galgaro*. An analysis of solar assisted ground source heat pumps in cold climates. *Energy Conversion and Management*. 2015. No. 106. Pp. 660–675. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.10.016
21. *Huifang Liu, Yiqiang Jiang, Yang Yao*. The field test and optimization of a solar assisted heat pump system for space heating in extremely cold area. *Sustainable Cities and Society*. 2015. No. 13. Pp. 97–104. DOI: 10.1016/j.scs.2014.05.002
22. *Caglar Ahmet, Cemil Yamali*. Performance analysis of a solar-assisted heat pump with an evacuated tubular collector for domestic heating. *Energy and Buildings*. 2012. No. 54. Pp. 22–28. DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.08.003 (rus)
23. *Xiao Wang, Maoyu Zheng, Wenyong Zhang, Shu Zhang, Tao Yang*. Experimental study of a solar-assisted ground-coupled heat pump system with solar seasonal thermal storage in severe cold areas. *Energy and Buildings*. 2010. No. 42. Pp. 2104–2110, DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.06.022 (rus)
24. *Weibo Yang, Lei Kong, Yongping Chen*. Numerical evaluation on the effects of soil freezing on underground temperature variations of soil around ground heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*. 2015. No. 75. Pp. 259–269, DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.09.049
25. *Tsytoich N.A.* Mekhanika merzlykh gruntov [Frozen soil mechanics]. Moscow: Vysshaya shkola, 1973. 448 p. (rus)
26. *Kronik Ya.A., Demin I.I.* Raschety temperaturnykh polei i napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya gruntovykh sooruzhenii metodom konechnykh elementov [Finite element modeling of temperature fields and stress-strain state of soil structures]. Moscow: MISI, 1982. 102 p. (rus)
27. *Kiselev M.F.* Teoriya szhimaemosti ottaivayushchikh gruntov pod davleniem [Theory of compressibility of thawing soils under pressure]. Leningrad: Stroiizdat, 1978. 176 p. (rus)
28. *Kudryavtsev S.A., Kazharskii A.V.* Chislennoe modelirovanie protsessa migratsii vlagi v zavisimosti ot skorosti promerzaniya gruntov [Numerical modeling of moisture migration depending on soil freezing rate]. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal*. 2012. No. 4. Pp. 33–38. (rus)
29. *Kudryavtsev S.A.* Raschety protsessa promerzaniya i ottaivaniya po programme “Termoground”. [“Thermoground” program for freezing and thawing process calculations]. *Rekonstruktsiya gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo*. Available: www.georec.spb.ru/journals/08/files/pdf/0508007.pdf (accessed February 22, 2022). (rus)
30. *Veselov V.V., Belyakov V.A.* Teploizolirovannyi malozaglublennyi fundament: rabota v sezonno-promerzayushchikh gruntakh i praktika teplovogo rascheta [Heat-insulated low-depth foundation: Works in seasonal freezing soils and thermal calculation]. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal*. 2011. No. 8. Pp. 13–18. (rus)
31. *Kovalenko V.I.* Primenenie programmy Frost 3d dlya trekhmernogo modelirovaniya raspredeleniya temperatur v vechnomerzлом grunte pri ego termostabilizatsii [Frost 3D program for three-dimensional modeling of temperature distribution in permafrost soil during its thermal stabilization]. *Zhurnal neftegazovogo stroitel'stva*. 2013. No. 3. Pp. 14–18. (rus)
32. *Vitel M., Rouabhi A., Tijani M., Guerin F.* Modeling heat transfer between a freeze pipe and the surrounding ground during artificial ground freezing activities. *Computers and Geotechnics*. 2015. No. 63. Pp. 99–111, DOI: 10.1016/j.compgeo.2014.08.004

Сведения об авторах

Толстых Александр Витальевич, канд. физ.-мат. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, sinvintie@rambler.ru

Дорошенко Юлия Николаевна, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, kafotorventl@rambler.ru

Пенявский Виталий Владимирович, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, rvv.tgasu@yandex.ru

Халимов Илья Олегович, аспирант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, hot2004@yandex.ru

Authors Details

Aleksandr V. Tolstykh, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, sinvintie@rambler.ru

Yuliya N. Doroshenko, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, kafotopvent1@rambler.ru

Vitaly V. Penyavsky, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, pvv.tgasu@yandex.ru

Ilya O. Halimov, Research Assistant, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, hot2004@yandex.ru