

Исследование влияния свойств грунта на эффективность теплообменников вертикальных скважин для ТНУ в COMSOL Multiphysics

Рецензия эксперта на статью получена
25.10.2018 [Expert review of the article
received October 25, 2018].

Введение

В настоящее время возобновляемые источники энергии во всём мире стали весьма актуальны вследствие бурного роста потребления населением всех видов энергоресурсов, особенно это заметно в системах отопления и горячего водоснабжения (ГВС) [1–3, 7]. Но возможности получения её в необходимом количестве на основе традиционных технологий не столь высоки. В связи с этим, например, геотермальная энергетика является в настоящее время растущей отраслью, отличающейся тенденциями активных исследований и технических разработок. Однако одной из главных задач всё ещё остаётся определить, сколько тепла может дать в момент пуска выполненный внешний грунтовой теплообменник к теплонасосной установке (ТНУ) и сможет ли он обеспечить извлечение достаточной энергии в течение продолжительного срока эксплуатации.

Возрос интерес и у нас в стране к теории и практике применения ТНУ, позволяющих снабжать тепловой энергией не только частные дома и дачи, но также здания и помещения ЖКХ и службы быта. В частности, уже сейчас есть планы по разработке ТНУ большой мощности для комплексов многоэтажных домов. А в западных странах, например, в Германии, Швейцарии и др., тепловую энергию для отопления и горячего водоснабжения на основе тепловых насосов (ТН) уже много лет получают не только отдельные коттеджи, но и целые посёлки, продолжая непрерывное совершенствование технологии освоения альтернативной энергии [6].

Теплонасосное отопление относят к альтернативной энергетике, основанной на возобновляемых энергетических ресурсах. Так, земля (грунт) и вода накапливают тепловую энергию за летний период от солнца, которую можно использовать для хозяйственных нужд с помощью ТН.

В западных странах — в Германии, Швейцарии и др. — тепловую энергию для отопления и горячего водоснабжения на основе тепловых насосов уже много лет получают не только отдельные коттеджи, но и целые посёлки, продолжая при этом непрерывное совершенствование технологии освоения альтернативной энергии

При этом низкопотенциальная тепловая энергия подаётся к ТН с помощью теплоносителя (как правило, специальной незамерзающей жидкости) от внешних теплообменников, чаще всего трубчатых конструкций, которые помещаются в грунт или в водоёмы. Таким образом, ТН и внешний теплообменник, наряду с различными приборами отопления, составляют основную часть структуры ТНУ.

У нас в стране более широкое применение находят грунтовые теплообменники, которые более универсальны, что связано с возможностью монтирования их в различных климатических и географических зонах, хотя они оказываются всегда индивидуальными по структуре и условиям эксплуатации. Вызвано это тем, что грунты, в которые помещаются теплообменники, обладают разными возможностями накапливать и хранить низкопотенциальную энергию.

Как показала практика последних лет, из грунтовых теплообменников потребителю известны и пользуются спросом горизонтальные структуры грунтовых теплообменников, вертикальные грунтовые теплообменники в скважинах и грунтовые теплообменники кластерного типа.

Горизонтальный грунтовой теплообменник требует значительной площади земельного участка, больших затрат на

УДК 620.93

Исследование влияния свойств грунта на эффективность теплообменников вертикальных скважин для теплонасосных установок в COMSOL Multiphysics

В. А. Сучилин, д.т.н., профессор; А. С. Кочетков, магистр; Н. Н. Губанов, магистр, Российский государственный университет туризма и сервиса (РГУТиС)

Эффективность грунтовых теплообменников к тепловым насосам не стабильна в различных регионах страны. На основании изучения условий эксплуатации бытовых теплонасосных установок сделано предположение, что причиной могут быть существенные отличия в энергетических возможностях грунтов, окружающих теплообменники. Предложена методика исследования влияния свойств грунта на эффективность теплообменников в вертикальных скважинах.

Ключевые слова: отопление, тепловые насосы, теплонасосные установки, грунтовые теплообменники, вертикальные скважины, эффективность функционирования, моделирование систем, методика исследования, программное обеспечение, COMSOL Multiphysics.

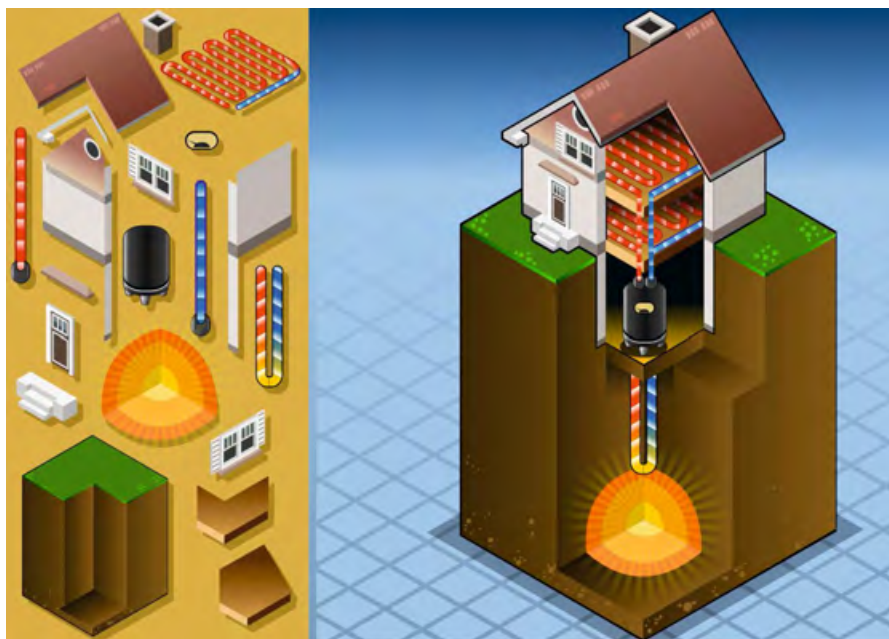
UDC 620.93

Study of the influence of soil properties on the efficiency of heat exchangers of vertical wells for heat pump systems in COMSOL Multiphysics

V. A. Suchilin, PhD, Professor; A. S. Kochetkov, graduate student; N. N. Gubanov, graduate student, Russian State University of Tourism and Service

The efficiency of ground heat exchangers to heat pumps is not stable in various regions of the country. Based on a study of the operating conditions of domestic heat pump systems, it has been suggested that the reason may be significant differences in the energy capabilities of the soils surrounding the heat exchangers. A method for studying the effect of soil properties on the efficiency of heat exchangers in vertical wells is proposed.

Key words: heating, heat pumps, heat pump systems, ground heat exchangers, vertical wells, efficiency of functioning, modeling of systems, research methodology, software, COMSOL Multiphysics.



земляные и монтажные работы для прокладки труб низкопотенциального теплоносителя, что является существенным препятствием для широкого внедрения ТН в практику альтернативного теплообогрева населения.

Вертикальный грунтовой теплообменник в глубоких артезианских скважинах наиболее подходит для домов с небольшими свободными участками земли. Однако главное требование для подобных скважин — полная изоляция всех горизонтов подземных вод. В противном случае попадание теплоносителя ТН в нижележащие горизонты можно будет расценивать как загрязнение с негативными экологическими последствиями. Это жёстко ограничивает доступность для широкого использования подобных теплообменников в бытовых ТНУ.

Кластерное бурение, как новое технологическое решение в области буровых работ, осуществляется из одного общего колодца («кустом»). Работы выполняются с помощью специальной техники. Процесс трудоёмкий и дорогостоящий. Однако, как и указанные выше грунтовые теплообменники, данный теплообменник также не гарантирует стабильность работы ТНУ в течение всего года, также подвержен переохлаждению прилегающего к трубам грунта вплоть до промерзания [8–9].

В связи с этим наиболее эффективными могут оказаться теплообменники в вертикальных скважинах с глубиной не более 25–50 м, не требующие жёстких условий согласования с экологическими службами и отличающиеся технологичностью монтажных работ и ремонтнопригодностью при эксплуатации. Однако для этого потребуются достаточно всесторонние исследования свойств грунтов в местах расположения теплообменни-

ков, учитывая, что, как отмечалось ранее, грунты, даже в одной географической зоне обладают разными характеристиками влажности, теплопроводности, теплоёмкости, пористости и другими теплофизическими свойствами, и возможностями накапливать и хранить низкопотенциальную энергию.

Процессы теплопередачи теплообменникам ТНУ в различных, в том числе и пористых, средах в настоящее время исследуют на основе программного обеспечения COMSOL Multiphysics, которое предназначено для расчётов научных и инженерных задач, и основывается на применении метода конечных элементов (FEM) для решения дифференциальных уравнений в частных производных [4, 5, 10].

Наиболее эффективными могут оказаться теплообменники в вертикальных скважинах с глубиной не более 25–50 м, не требующие жёстких условий согласования с экологическими службами и отличающиеся технологичностью монтажных работ и ремонтнопригодностью

Данный подход позволяет учитывать, например, свойства грунтов, влияние подземных течений в водоносных слоях, характеристики труб и структуру теплообменника, климатические условия и многие другие важные показатели, реально влияющие на условия эксплуатации ТНУ. Ниже приводится одна из возможных моделей исследования работы теплообменника ТН, позволяющая путём варьирования исходных данных изучать влияние внешних факторов на его эксплуатационные показатели.

Предлагается структура теплообменника, модель геометрии которого представлена в виде помещённой в грунтовую вертикальную скважину трубчатой конструкции, состоящей из подающего участка полимерной трубы (диаметр трубы 25 мм, толщина стенки 2,3 мм), связанного с выходом из испарителя теплового насоса, и обратного участка трубы, связанного со входом в испаритель ТН. Причём подающий участок трубы прямой и доходит до дна скважины, а обратный, с целью увеличения площади контакта с грунтом, закручен по винтовой линии. Кроме того, предполагается, что скважина проходит через три различные по энергетическим свойствам грунтовые зоны, отличающиеся исходными физическими параметрами для принятой методики исследования.

Верхний слой — плотная глина, далее песчаник и последний — насыщенная влагой песчаная смесь. Энергетическое состояние и теплопередача грунта первых двух слоёв теплоносителю (принят 45 % водный раствор этиленгликоля) в трубах теплообменника могут моделироваться на основе совместного использования интерфейсов теплопередачи в пористых средах Heat Transfer in Porous Media и теплопередачи в трубах Heat Transfer in Pipes. В третьем слое грунта происходит фильтрация воды, что при малых перемещениях в зависимости от размера и формы частиц грунта, а также от вязкости жидкости описывается законом Дарси:

$$u = -\frac{k}{\mu} \nabla p, \quad (1)$$

где поле скорости воды u определяется проницаемостью k , динамической вязкостью жидкости μ и градиентом давления p . Эти условия функционирования теплообменника моделируются с помощью интерфейса Darcy's Low [10].

Учитывались следующие основные характеристики грунта и аналитические зависимости, с ними связанные:

1. Для первого слоя грунта, от нулевого уровня геометрии модели скважины до глубины 20 м: теплопроводность грунта равна 2 Вт/(м·К); плотность грунта составляет 1300 кг/м³; теплоёмкость грунта — 800 Дж/(кг·К).
2. Для второго слоя (глубина 20–40 м): теплопроводность грунта — 3,5 Вт/(м·К); плотность грунта — 1800 кг/м³; теплоёмкость грунта — 900 Дж/(кг·К).
3. Для третьего слоя (до глубины 50 м): теплопроводность грунта — 3 Вт/(м·К); плотность грунта — 2000 кг/м³; теплоёмкость грунта — 1100 Дж/(кг·К); зернистость грунта — 10⁻⁷ см². В этой зоне происходит движение подземных вод с градиентом гидравлического напора 0,01.

Методика моделирования и исследования представленной структуры грунтового теплообменника основывается на программном обеспечении COMSOL Multiphysics. Методика оценивает эффективность работы теплообменника с учётом энергетического потенциала грунта, а также условий эксплуатации внешнего теплообменника в течение намеченного срока службы в реальных условиях. Для моделирования геотермальных отопительных систем, как отмечалось выше, существует общая методика исследования подобных процессов, однако, реальные условия эксплуатации ТНУ требуют учёта множества недостаточно исследованных факторов при индивидуальном подходе к оценке работоспособности грунтовых теплообменников.

Приведённое решение выполнено на основе численных методов компьютерного моделирования функционирования ТНУ типа «грунт-вода» в разное время года. Учтены особенности структурной геометрии теплообменника, помещённого в грунт, потенциально возможный на дачных участках средней полосы России. Эта модель использует параметры реальных условий эксплуатации ТНУ. В частности, используются база данных ASHRAE 2017 температуры на поверхности земли и табличные данные температуры грунта на различных глубинах (для Московского региона).

Результатом исследования функционирования, представленного теплообменника, помещённого в вертикальную скважину, стали графики температуры теплоносителя в трубах на выходе из теплообменника, распределения температур

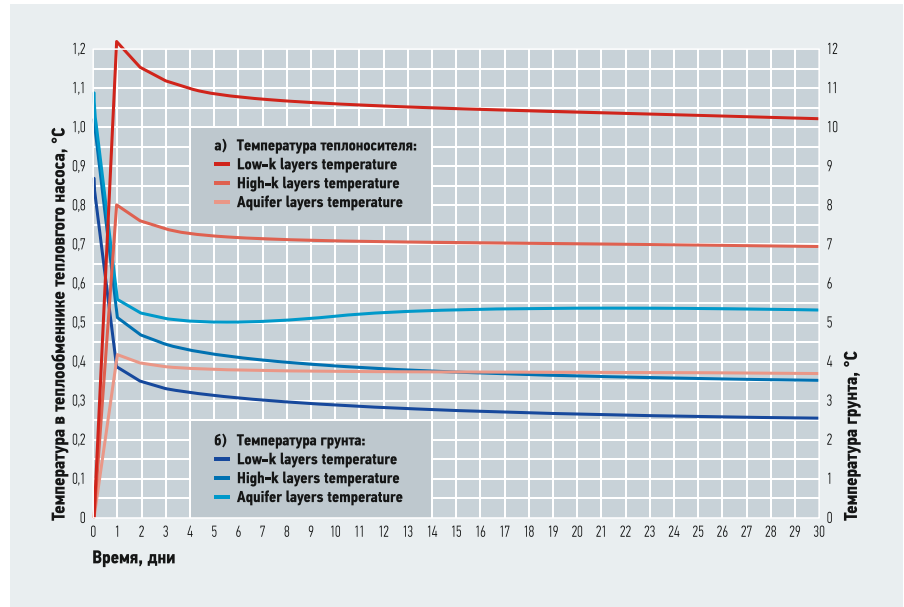


Рис. 2. Графики средней температуры (degC) [а — теплоносителя в теплообменнике по участкам, б — грунта в скважине по различным зонам]

в трубах теплообменника и внутри грунта, причём по слоям, отличающимся энергетическими и физическими свойствами.

На рис. 1а показано распределение температуры теплоносителя в трубах теплообменника после суток работы ТН в январе месяце при отрицательной температуре окружающего воздуха. При этом на

входе трубы скважины теплообменника температура 0°C и на выходе из скважины 1,37°C. Таким образом, теплоноситель из теплообменника поступает в испаритель ТН с положительной температурой. Хладагент в испарителе будет кипеть, на данный момент времени обеспечивая работу теплового насоса.

На приведённом масштабированном фрагменте рис. 1б показана геометрия теплообменника в нижней части скважины, на масштабированном фрагменте рис. 1в — геометрия теплообменника в верхней части скважины.

На масштабированном фрагменте рис. 1б видно, что теплоноситель из испарителя ТН поступает по трубе теплообменника в низ скважины охлаждённым с температурой 0°C (синий цвет температурного фона фрагмента и графика на рис. 1а) и не может мгновенно нагреться, хотя температура грунта в этой зоне достаточно высокая (рис. 2). На масштабированном фрагменте рис. 1в показано, что теплоноситель в трубе теплообменника на выходе из скважины выходит нагретым до температуры 1,37°C (красный цвет температурного фона фрагмента и графика на рис. 1а).

На рис. 2а показаны графики средней температуры теплоносителя в теплообменнике по участкам, получающим тепло от различных зон грунта в течение зимних 30 суток (январь).

Верхний слой грунта скважины с низким коэффициентом теплопроводности 2 Вт/(м·К) оказывает меньшее влияние на теплоноситель теплообменника. Температура на этом участке заметно убывает в течение месяца (Low-k layers Temperature). Средний слой грунта с высоким коэффициентом теплопроводности 3,5 Вт/(м·К) уже более влияет на теплообмен

Методика, реализованная в ПО COMSOL Multiphysics, оценивает эффективность работы теплообменника с учётом энергетического потенциала грунта, а также условий эксплуатации внешнего теплообменника в течение намеченного срока службы в реальных условиях

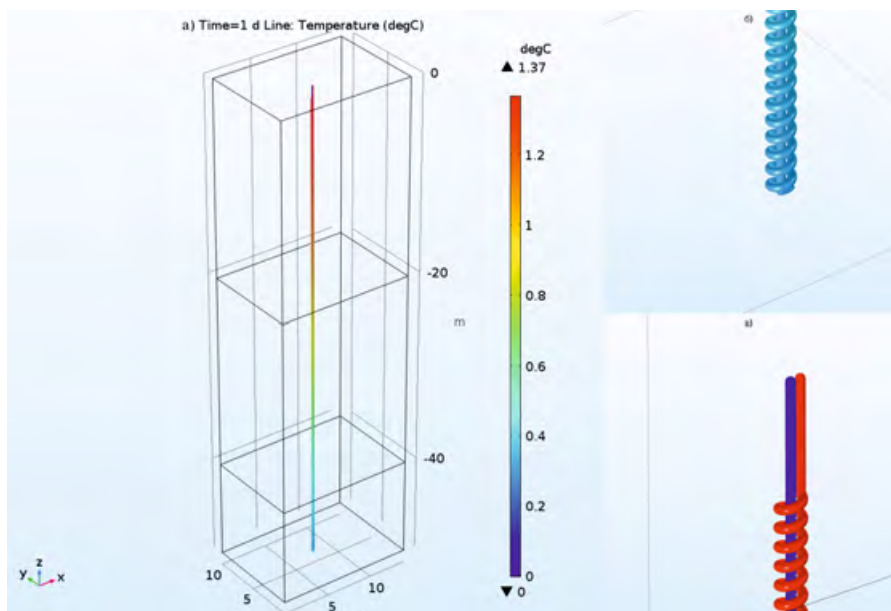


Рис. 1. Распределение температуры теплоносителя в трубах предложенного грунтового теплообменника в зимний период (degC) [а — полное изображение теплообменника, б — масштабированный фрагмент нижней части, в — масштабированный фрагмент верхней части теплообменника]

между грунтом и теплоносителем в теплообменнике. Но температура на этом участке также уменьшается со временем (High-k layers Temperature). Третий слой грунта (водоносный слой) оказывает основное влияние на температуру теплоносителя в теплообменнике благодаря конвекции подземных вод. Поэтому температура на этом участке после короткого этапа стабилизации процесса передачи тепла (около пяти суток) далее уже практически не изменялась (Aquifer layer Temperature).

На рис. 26 показаны графики средней температуры грунта в скважине по различным зонам, передающим тепло трубопроводу теплообменника в течение зимних 30 суток (январь). Верхний слой грунта скважины отдаёт меньшее количество тепла. Его температура уменьшается в течение месяца (Low-k layers Temperature). Средний слой грунта отдаёт большее количество тепла. Его температура также заметно убывает со временем (High-k layers Temperature). Третий слой грунта (водоносный слой) отдаёт наибольшее количество тепла теплоносителю в теплообменнике. Но при этом в водоносном слое скважины в течение около пяти суток происходит стабилизация процесса передачи тепла, следующие десять суток температура растёт и далее уже почти не изменяется (Aquifer layer Temperature). Это подтверждает первоначальное предположение, что скважины, имеющие глубину в пределах 25–50 м, проходящие через водоносный слой с движением влаги по закону Дарси, могут возобновлять первоначальный потенциал тепловой энергии.

На рис. 3а показано распределение по сечениям поля температуры в объёме грунта, окружающего скважину, после одного года эксплуатации. Выделяются три части, представляющие различные зоны грунта, которые обладают собственными характеристиками. В верхних слоях отсутствует фильтрация влаги в грунте. Ниже 40 м расположен водоносный слой с потоком подземных вод, приводящим к возникновению теплопередачи посредством горизонтальной конвекции.

На глубине скважины от 40 м и ниже в объёме грунта показаны стрелки поля фильтрации влаги. Подземный поток приводит к возрастанию теплоёмкости грунта и сохранению высокой температуры в области скважины, где она достигает максимума в 10,7°C. В этой зоне грунта теплопередача теплоносителю в теплообменнике будет проходить более интенсивно благодаря конвекции, а в остальных зонах грунта, теплопередача будет осуществляться лишь за счёт теплопроводности. Так как известно, что сухой грунт обладает невысокой теплопроводностью, то для повышения эффективности грунтовых теплообменников необходим влажный грунт, а ещё лучше пористый грунт с некоторым движением в нём влаги.

На рис. 3б показаны изотермические поверхности температурного поля в объёме грунта, окружающего скважину, после одного года эксплуатации. В верхних слоях грунта, где отсутствует движение влаги, вокруг скважины возникают области пониженной температуры, изолирующие её от основного массива грунта и ухудшающие теплообмен. В водоносном слое грунта формируется область постоянной повышенной температуры, а изотермическая поверхность вытянута в направлении движения подземного потока.

Важно, что полученный результат исследования представленной модели даёт количественную оценку существенного влияния влажности грунта на его энергетический

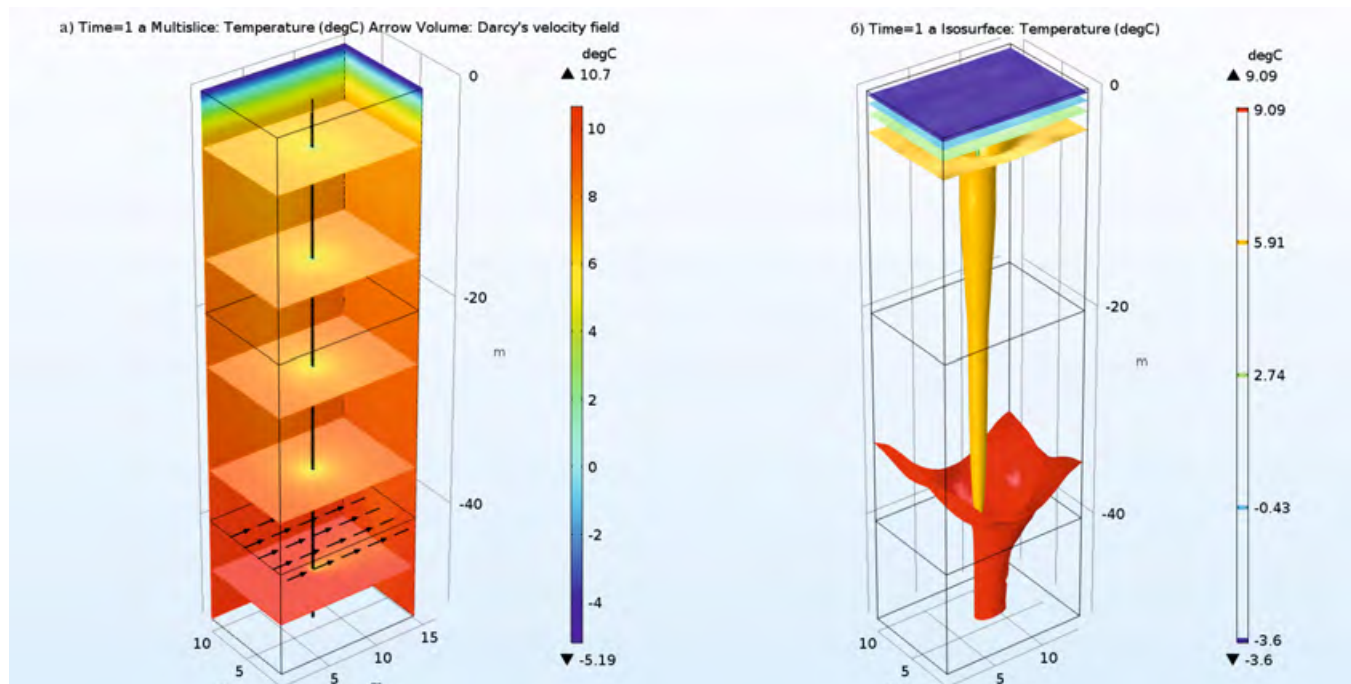


Рис. 3. Распределение температуры в объеме грунта, окружающего скважину (degC) [а — по сечениям, б — по изотермическим поверхностям]

потенциал и показывает возможность эффективного воздействия на процесс теплопередачи между грунтом и теплообменником.

В качестве сравнения эффективности разных по структуре теплообменников в вертикальных скважинах был рассмотрен также вариант теплообменника U-образной формы. Все основные параметры геометрии модели и условия функционирования теплообменника остались неизменными.

При этом на входе трубы скважины теплообменника температура 0°C и на выходе из скважины после суток работы ТН в январе месяце 0,84°C, что значительно меньше результата для предложенного выше теплообменника с винтовым способом размещения трубы в скважине. Но всё-таки теплоноситель из теплообменника поступает в испаритель ТН с положительной температурой. Хладагент в испарителе будет кипеть, на данный момент времени обеспечивая работу теплового насоса, но с меньшей эффективностью.

В настоящее время также применяется способ одновременного размещения в вертикальной скважине двух U-образных труб, повернутых на 90° относительно друг друга, что, естественно, должно положительно сказаться на теплопередаче энергии теплообменнику. Однако и в этом случае также необходимы дополнительные компьютерные исследования влияния свойств грунтов на эффективность их совместного функционирования. Важно исследовать и стабильность теплоотдачи грунтов скважин по времени, то есть, например, в течение года и более.

Заключение

1. Для бытовых ТНУ широкое применение находят грунтовые теплообменники, обладающие возможностью установки в различных климатических и географических зонах, они практически всегда индивидуальны по структуре и условиям эксплуатации, так как прилегающие к ним грунты обладают разными возможностями накапливать и хранить низкопотенциальную энергию.
2. С целью обеспечения эффективности работы ТНУ необходимо предварительно исследовать характеристики грунтов, прилегающих к внешним теплообменникам, например, бурением пробных скважин.
3. Моделирование структуры теплообменников в вертикальных скважинах, грунт которых характеризуется физикой пористых сред, в COMSOL Multiphysics с использованием принятых расчётных интерфейсов Heat Transfer in Pipes и Heat Transfer in Porous Media позволяет проводить исследование их функционирования в диапазоне востребованных эксплуатационных показателей бытовых ТНУ.
4. Результаты модели исследования в виде сечений и изотермических поверхностей температурного поля объема грунта, окружающего скважину, объективно оценивают влияние свойств различных грунтов на их теплоёмкость и показывают роль фильтрации влаги в грунте по закону Дарси на стабильность его энергетического потенциала, что определяет эффективность процесса теплопередачи теплоносителю теплообменника при эксплуатации.
5. Показано, что эффективность грунтовых теплообменников с винтовым распо-

ложением труб в вертикальной скважине, отличающихся увеличением длины и плотности прилегания труб к грунту, значительно выше, например, U-образных теплообменников. ●

1. Филиппов С.П. Малая энергетика в России // Теплоэнергетика, 2009. №8. С. 38–42.
2. Тимофеев Д.В., Малявина Е.Г. Эффективность работы геотермальной теплонасосной системы теплоснабжения в жилом доме // Журнал С.О.К., 2018. №2. С. 47–50.
3. Сучилин В.А., Кочетков А.С., Голиков С.А. Автономная система отопления и горячего водоснабжения на основе тепловых насосов // Современные концепции техники и технологии: проблемы, состояние и перспективы. Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс» [Электр. ресурс]. Режим доступа: interactive-plus.ru. Дата обраш. 15.10.2018.
4. Сучилин В.А., Кочетков А.С., Губанов Н.Н. Моделирование внешних теплообменников к бытовым тепловым насосам с помощью COMSOL Multiphysics // Вестник Евразийской науки, 2018. №1 [Электр. ресурс]. Режим доступа: esj.today. Дата обраш. 17.10.2018.
5. Сучилин В.А., Кочетков А.С., Губанов Н.Н. Исследование эффективности грунтового горизонтального теплообменника бытового теплового насоса с помощью COMSOL Multiphysics // Вестник Евразийской науки, 2018. №2 [Электр. ресурс]. Режим доступа: esj.today. Дата обраш. 17.10.2018.
6. Аверьянова О.В., Куколев М.И. Расчёт годового энергопотребления крупного объекта с тепловыми насосами, включёнными в единый контур // Журнал С.О.К., 2018. №6. С. 70–74.
7. Соловьёв А.А. Научно-исследовательские разработки возобновляемых источников энергии // Журнал С.О.К., 2018. №7. С. 86–91.
8. Патент РФ №2636018. МПК F24D 15/00. Система отопления и горячего водоснабжения помещений / В.А. Сучилин, А.С. Кочетков. Заявл.: 12.02.2016. Оpubл.: 17.11.2017.
9. Патент РФ №2645812. МПК F24T 10/01. Внешний грунтовой горизонтальный контур для теплонасосных установок / В.А. Сучилин, Н.Н. Губанов, А.С. Кочетков. Заявл.: 14.12.2016. Оpubл.: 28.02.2018.
10. Oberdorfer P., Hu R., Rahman M., Azizur, Holzbecher E. and others. Coupling heat transfer in heat pipe arrays with subsurface porous media flow for long time predictions of solar rechargeable geothermal systems. Web-source: comsol.com. Access date: October 15, 2018. References — see page 94.

Study of the influence of soil properties on the efficiency of heat exchangers of vertical wells for heat pump systems in COMSOL Multiphysics. Pp. 60–64.

V. A. Suchilin, PhD, Professor; **A. S. Kochetkov**, graduate student; **N. N. Gubanov**, graduate student, Russian State University of Tourism and Service

1. Filippov S.P. *Malaja jenergetika v Rossii* [Small Energy in Russia]. *Teplojenergetika* ["Heat Power Engineering" Magazine]. 2009. No. 8. Pp. 38–42.
2. Timofeev D.V., Maljavina E.G. *Jefferktivnost' raboty geotermal'noj teplonasosnoj sistemy teplosnabzhenija v zhilom dome* [The efficiency of the geothermal heat pump heating system in a residential house]. *Zhurnal Santehnika, otoplenie, kondicionirovanie (S.O.K.)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2018. No. 2. Pp. 47–50.
3. Suchilin V.A., Kochetkov A.S., Golikov S.A. *Avtonomnaja sistema otoplenija i gorjachego vodosnabzhenija na osnove teplovych nasosov* [Autonomous system of heating and hot water supply based on heat pumps]. *Sovremennye koncepcii tehniki i tehnologii: problemy, sostojanie i perspektivy. CNS "Interaktiv plus"* [Modern concepts of equipment and technology: problems, status and prospects. "Interactive plus" Center for Scientific Cooperation]. Cheboksary. Web-source: interactive-plus.ru. Access date: October 15, 2018.
4. Suchilin V.A., Kochetkov A.S., Gubanov N.N. *Modelirovanie vneshnih teploobmennikov k bytovym teplovym nasosam s pomoshh'ju COMSOL Multiphysics* [Simulation of external heat exchangers for domestic heat pumps using COMSOL Multiphysics]. *Vestnik Evrazijskoj nauki* [The Eurasian Scientific Journal]. 2018. No. 1. Web-source: esj.today. Access date: October 17, 2018.
5. Suchilin V.A., Kochetkov A.S., Gubanov N.N. *Issledovanie jefferktivnosti gruntovogo gorizonta'nogo teploobmennika bytovogo teplovogo nasosa s pomoshh'ju COMSOL Multiphysics* [Investigation of the efficiency of the ground horizontal heat exchanger of a domestic heat pump using COMSOL Multiphysics]. *Vestnik Evrazijskoj nauki* [The Eurasian Scientific Journal]. 2018. No. 2. Web-source: esj.today. Access date: October 17, 2018.
6. Aver'janova O.V., Kukolev M.I. *Raschjot godovogo jenergotreblenija krupnogo ob#ekta s teplovymi nasosami, vkljuchjonnymi v edinyj kontur* [Calculation of the annual energy consumption of a large object with heat pumps included in a single circuit]. *Zhurnal Santehnika, otoplenie, kondicionirovanie (S.O.K.)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2018. No. 6. Pp. 70–74.
7. Solov'jov A.A. *Nauchno-issledovatel'skie razrabotki vozobnovljaemyh istochnikov jenerгии* [Research and development of renewable energy sources]. *Zhurnal Santehnika, otoplenie, kondicionirovanie (S.O.K.)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2018. No. 7. Pp. 86–91.
8. The patent of the Russia No. 2636018. IPC F24D 15/00. *Sistema otoplenija i gorjachego vodosnabzhenija pomeshhenij* [The system of heating and hot water supply of premises]. Suchilin V.A., Kochetkov A.S. Decl. February 12, 2016. Publ. November 17, 2017.
9. The patent of the Russia No. 2645812. IPC F24T 10/01. *Vneshnij gruntovoj gorizonta'lnyj kontur dlja teplonasosnyh ustanovok* [External ground horizontal contour for heat pump installations]. Suchilin V.A., Gubanov N.N., Kochetkov A.S. Decl. December 14, 2016. Publ. February 28, 2018.
10. Oberdorfer P., Hu R., Rahman M. Azizur, Holzbecher E. et al. Coupling heat transfer in heat pipe arrays with subsurface porous media flow for long time predictions of solar rechargeable geothermal systems. Web-source: comsol.com. Access date: October 15, 2018.