

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2018, №5, Том 10 / 2018, No 5, Vol 10 <https://esj.today/issue-5-2018.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/19SAVN518.pdf>

Статья поступила в редакцию 20.09.2018; опубликована 11.11.2018

Ссылка для цитирования этой статьи:

Сучилин В.А., Кочетков А.С., Губанов Н.Н. Исследование эффективности теплообменников вертикальных скважин теплонасосных установок в Comsol Multiphysics // Вестник Евразийской науки, 2018 №5, <https://esj.today/PDF/19SAVN518.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

For citation:

Suchilin V.A., Kochetkov A.S., Gubanov N.N. (2018). Research of efficiency of heat exchangers of vertical wells of heat pump systems in Comsol Multiphysics. *The Eurasian Scientific Journal*, [online] 5(10). Available at: <https://esj.today/PDF/19SAVN518.pdf> (in Russian)

УДК 621.577.2, 621.577.4

ГРНТИ 44.31.41

Сучилин Владимир Алексеевич

ФБГОУ «Российский государственный университет туризма и сервиса», Москва, Россия
Профессор
Доктор технических наук
E-mail: suchilinv@mail.ru
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7467-5033>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=446556

Кочетков Алексей Сергеевич

ФБГОУ «Российский государственный университет туризма и сервиса», Москва, Россия
Старший преподаватель
Магистр
E-mail: alesha2701@mail.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=638450

Губанов Николай Николаевич

ФБГОУ «Российский государственный университет туризма и сервиса», Москва, Россия
Старший преподаватель
Магистр
E-mail: gubanov.nik@yandex.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=632242

Исследование эффективности теплообменников вертикальных скважин теплонасосных установок в Comsol Multiphysics

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы исследования теплообменника в виде вертикальных скважин к теплонасосным установкам методом компьютерного моделирования. Практика показывает, что наиболее перспективными источниками низкопотенциальной энергии являются теплообменники в вертикальных скважинах, как наиболее эффективное решение для участков, где нет возможности установки горизонтальных грунтовых теплообменников. Однако эффективность их работы во многом зависит от свойств грунта, в котором помещаются трубы теплообменника, от структуры теплообменника и многих других факторов теплонасосной системы.

В связи с этим, прежде чем устанавливать тепловой насос для отопления, например, в частных домах, необходимо оценить потенциальные энергетические возможности грунта на соответствующем участке и провести предварительное исследование проектируемого грунтового теплообменника на модели с учетом параметров данного источника низкопотенциальной энергии.

Нами предлагается структура грунтового теплообменника, размещенного в четырех вертикальных скважинах, отличающаяся компактностью расположения. Представлена также методика моделирования и исследования функционирования теплообменника на базе COMSOL Multiphysics в условиях нестабильности энергетических возможностей грунта, что соответствует особенностям работы бытовых малых и средних теплонасосных установок. При моделировании грунт в области скважин характеризуется физикой сплошных сред с использованием принятых расчетных интерфейсов Heat Transfer in Solids (ht) и Heat Transfer in Pipes (htp), позволяющих проводить исследование функционирования в диапазоне востребованных эксплуатационных показателей бытовых теплонасосных установок.

Техническим результатом исследований является определение возможностей повышения эффективности данного вида теплообменников к бытовым тепловым насосам.

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

Потребность в энергии во всем мире растет из года в год быстрыми темпами, особенно это заметно в системах отопления и горячего водоснабжения. В то же время возможности получения ее в необходимом количестве не столь высоки. В связи с этим возобновляемые источники энергии стали весьма актуальны, в частности, геотермальная энергетика является в настоящее время растущей отраслью, отличающейся тенденциями активных исследований и технических разработок. Так в течение последних нескольких десятилетий в мире были созданы методы для извлечения геотермальной теплоты с различных глубин грунта, водоемов, канализационных вод и др.

Возрос интерес и у нас в стране к теории и практике применения теплонасосных установок (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 строительства комплексов многоэтажных домов. А в западных странах, например, в Германии, Швейцарии и др. тепловую энергию для отопления и горячего водоснабжения (ГВС) от тепловых насосов уже много лет получают не только отдельные коттеджи, но и целые поселки, продолжая при этом непрерывное развитие техники и технологии освоения альтернативной энергии [1].

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 тепловых насосов (ТН). При этом низкопотенциальная тепловая энергия подается к ТН с помощью теплоносителя (как правило, специальной жидкости) от внешних теплообменников, чаще всего – трубчатых конструкций, которые помещаются в грунт или в водоемы. Таким образом, ТН и внешний теплообменник, наряду с различными приборами отопления, составляют основную часть структуры ТНУ [2].

Внешние грунтовые теплообменники к ТН практически всегда индивидуальны по структуре и условиям эксплуатации. Вызвано это тем, что грунты, в которые помещаются

теплообменники, обладают разными возможностями накапливать и хранить низкопотенциальную энергию.

В связи с этим прежде чем устанавливать ТН для отопления, например частного дома, необходимо оценить потенциальные энергетические возможности грунта на соответствующем участке. Другими словами, провести предварительно моделирование внешнего теплообменника ТН с учетом параметров данного источника низкопотенциальной энергии [3-9].

Основные структуры внешних грунтовых теплообменников следующие: горизонтальный грунтовой теплообменник; вертикальный грунтовой теплообменник в скважине; вертикальный или наклонный грунтовой теплообменник кластерного типа.

Горизонтальный грунтовой теплообменник требует значительной площади земельного участка, больших затрат на земляные и монтажные работы для прокладки труб низкопотенциального теплоносителя, что является существенным препятствием для широкого внедрения ТН в практику альтернативного теплоснабжения населения.

Вертикальный грунтовой теплообменник в глубоких скважинах наиболее подходит для домов с небольшими свободными участками земли. Однако главное требование для подобных скважин – полная изоляция всех без исключения горизонтов подземных вод. В противном случае попадание теплоносителя ТН в нижележащие горизонты можно будет расценивать как загрязнение с негативными экологическими последствиями. Это жестко 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 трудоемкий 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.

Предлагается несколько иная структура грунтового вертикального теплообменника, отличающаяся тем, что включает несколько неглубоких вертикальных скважин диаметром 250 мм глубиной 15-30 м. В скважины помещаются полимерные трубы диаметром 25-32 мм. Труба, подающая теплоноситель от испарителя ТН, вертикально опускается до дна первой скважины и затем поднимается вверх по винтовой линии, касаясь стен скважины, что значительно повышает длину трубы в скважине и, следовательно, передачу тепловой энергии грунтом теплоносителю в трубе. Далее последовательно образуются следующие элементы общего грунтового теплообменника в других скважинах. Расстояние между соседними скважинами составляет 5 м. На поверхности земли они занимают квадратную площадку. Участки труб, соединяющие элементы общего грунтового теплообменника в скважинах, и трубы от испарителя ТН до первой скважины, и трубы, возвращающей нагретый теплоноситель из последней скважины в испаритель ТН, помещены на глубину 2 м и покрыты теплоизоляционным материалом, что предохраняет от потери температуры теплоносителя в теплообменнике вблизи зоны промерзания грунта.

В качестве примера рассматривается модель теплообменника, состоящего из четырех вертикальных скважин по 15 м, содержащих около 200 м полимерных труб, по которым циркулирует теплоноситель (рассол), обеспечивающий съем низкопотенциальной энергии с грунта и перенос ее в испаритель ТН. Назначение данного теплообменника – теплонасосное отопление помещений, как в частном секторе, так и в коммунальном хозяйстве и службе быта. Буровые и монтажные работы не требуют сложной техники, возможно выполнение скважин с помощью механического ручного и электромеханического инструмента и оборудования.

Предлагается также методика моделирования и исследования представленной структуры грунтового вертикального теплообменника на основе COMSOL Multiphysics. Методика оценивает эффективность работы теплообменника с учетом энергетического потенциала грунта, а также условий эксплуатации внешнего теплообменника в течение намеченного срока службы в реальных условиях. Для моделирования геотермальных отопительных систем существует общая методика исследования подобных процессов [10], однако, реальные условия эксплуатации ТНУ требуют учета множества недостаточно исследованных факторов при индивидуальном подходе к оценке работоспособности грунтовых теплообменников.

Приведенное решение выполнено на основе численных методов компьютерного моделирования функционирования ТНУ типа грунт-вода в разное время года. За основу взята известная модель геотермального нагрева от грунтового теплообменника, помещенного в плотную сплошную среду, которой соответствует расчетный интерфейс Heat Transfer in Solids (ht). Динамика неизолированного движения жидкости в трубах описывается интерфейсом Heat Transfer in Pipes (htp). При их совместном использовании задаются и решаются уравнения теплообмена между грунтом и потоком жидкости в системе труб теплообменника. Учтены особенности структурной геометрии теплообменника, помещенного в грунт, потенциально возможный на дачных участках средней полосы России. Эта модель использует параметры реальных условий эксплуатации ТНУ. В частности, используются табличные данные температуры на поверхности земли и температуры грунта на различных глубинах (для Московского региона), по которым вычисляется температурный градиент по глубине залегания в грунте теплообменника и на глубине скважин от 2 до 15 м в зависимости от времени года. Исследовались различные типы грунтов: глинистые (с удельной теплоемкостью 980 Дж/(кг*К)) и песчаные (820 Дж/(кг*К)) с коэффициентом теплопроводности, зависящим от влажности.

Результатом исследования функционирования теплообменника, помещенного в четыре вертикальные скважины, подключенные к ТН мощностью 4 кВт, стали графики температуры теплоносителя в трубах на входе и выходе теплообменника, температуры внутри грунта, причем по слоям с определенным градиентом изменения по месяцам года. Наиболее эффективной оказалась работа теплообменника во влажном (15%-20% влажности) песчаном грунте.

На рис. 1 показано распределение температуры теплоносителя в трубах теплообменника четырех скважин в момент времени 7,5 ч (0,3125 суток), соответствующий завершению активной фазы суточного цикла работы ТН, выработавшего плановый объем тепловой энергии в 30 кВт*ч в январе месяце при отрицательной температуре окружающего воздуха. При этом на входе трубы первой скважины теплообменника температура $-1,11^{\circ}\text{C}$ и на выходе четвертой скважины $-0,12^{\circ}\text{C}$. Таким образом теплоноситель из теплообменника поступает в испаритель ТН с отрицательной температурой. Хладагент в испарителе все же будет кипеть, на данный момент времени обеспечивая работу теплового насоса, но в целом предложенные характеристики грунтового теплообменника в январе уже не в состоянии повысить температуру теплоносителя на необходимую величину для обеспечения эффективной работы ТНУ, следовательно, не обеспечат комфортную температуру в отопительной системе помещения, не говоря уже о снабжении ГВС.

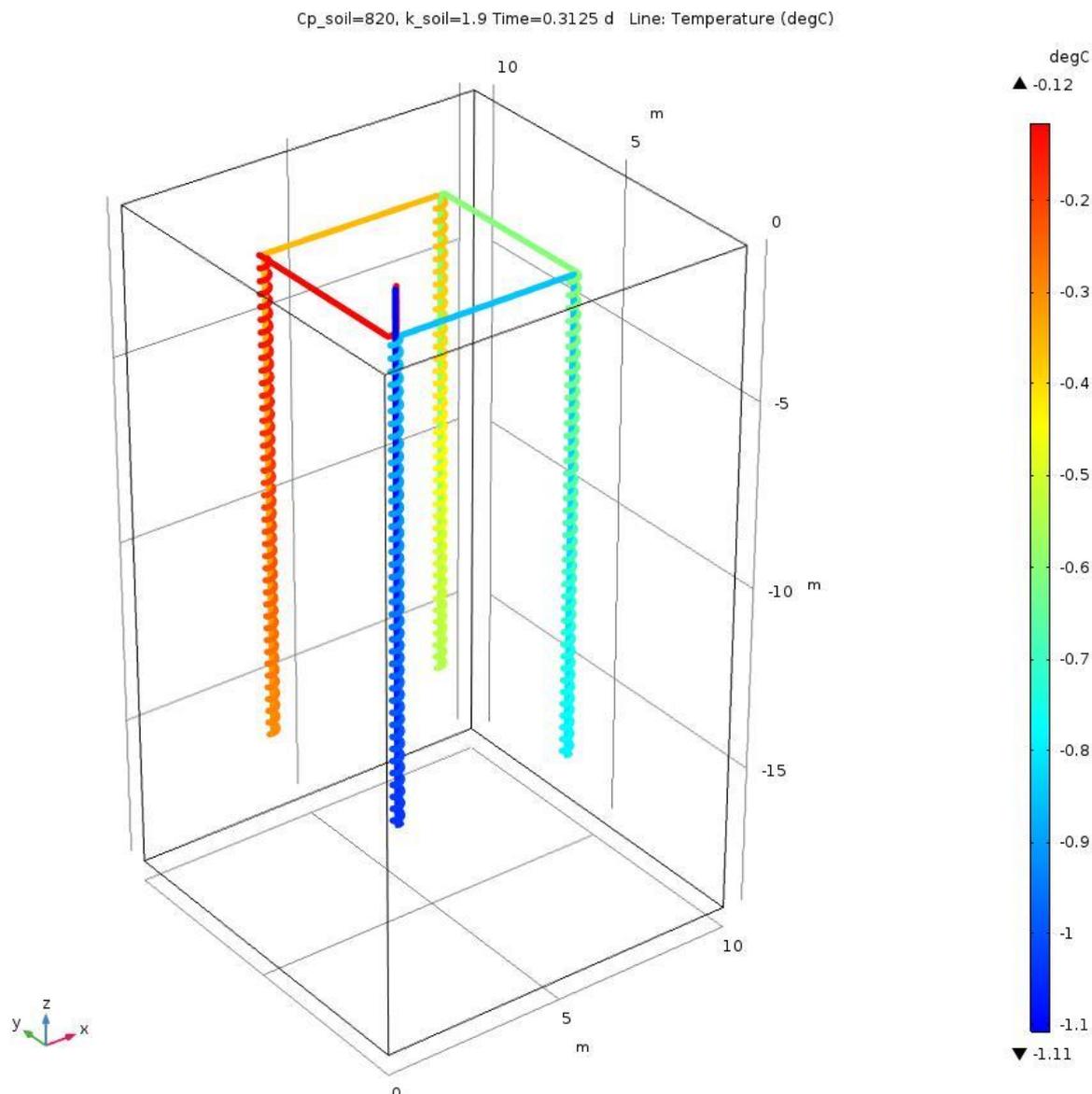


Рисунок 1. Распределение температуры теплоносителя в трубах грунтового теплообменника (четыре скважины) в зимний период (разработано автором)

Для решения возникшей проблемы достаточно изменить некоторые параметры геометрии модели, например, увеличить количество скважин и их глубину, что приведет к увеличению длины труб в теплообменнике и, следовательно, к росту теплосъема с грунта теплообменником. Полученные результаты численного моделирования эффективности данного теплообменника позволяют еще на этапе проектирования воспользоваться известными в этом случае рекомендациями по подключению дополнительного источника обогрева помещения, например, электрического обогревателя, т. е. систему отопления спланировать бивалентной, с возможностью компенсации недостающего тепла в зимний период. Или, например, использовать технические рекомендации, изложенные в патентах [11-12]. Все это также можно заложить в данную модель и найти оптимальное решение для целого ряда бытовых ТНУ, отличающихся исходными условиями и потребностями клиентов в комфортном отоплении и горячем водоснабжении помещений.

На рис. 2 показан график температуры теплоносителя на входе трубы первой скважины теплообменника за двое суток исследования модели. После включения ТН за время его работы

0,3125 суток теплообменник обеспечил ТН плановый тепловой объем энергии в 30 кВт*ч, а температура теплоносителя при этом упала с 1,88 до -1,11°C. После чего до конца суток тепловой насос отключался и не потреблял тепловой энергии от теплообменника (по условию эксперимента), а теплоноситель циркулировал через испаритель с пониженной скоростью (0,1 л/с) для восстановления температуры теплоносителя в системе труб теплообменника и изучения состояния грунта, его окружающего. Цикл работы ТН составляет одни сутки, затем процесс повторяется с уменьшением минимальной температуры теплоносителя до -1,94°C на вторые сутки.

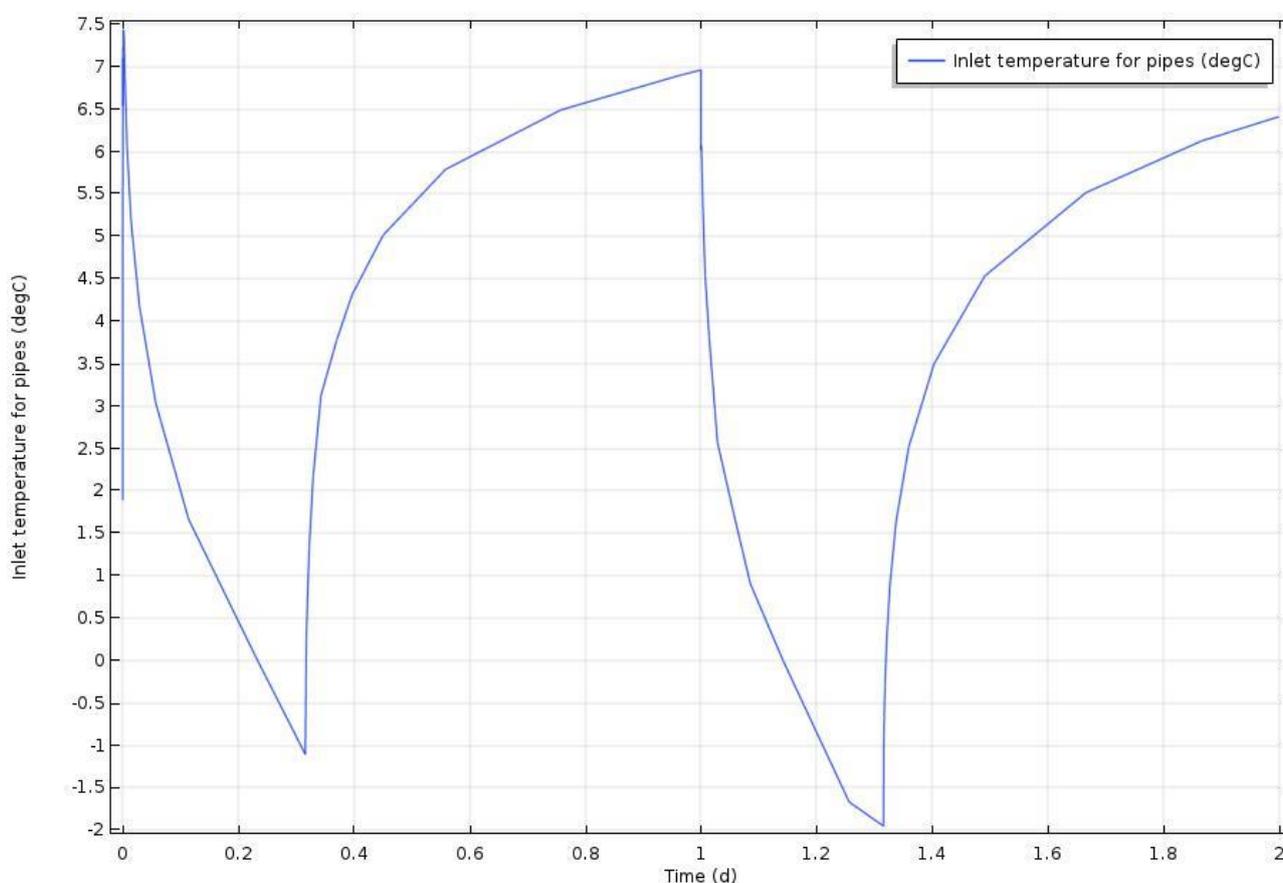


Рисунок 2. Температура теплоносителя на входе трубы грунтового теплообменника за трое суток исследования (разработано автором)

На рис. 3 показана температура теплоносителя на выходе трубы грунтового теплообменника за двое суток исследования. Температура теплоносителя в трубах теплообменника от момента фиксации ее значения -0,12°C на графике рис. 1 восстановилась практически за 0,9 суток до максимума в 6,93°C. На вторые сутки это значение уменьшилось до 6,39°C. Важно отметить, что максимальная температура теплоносителя (на выходе), как и минимальная (на входе) в трубах теплообменника на протяжении двух суток падала, что приведет в дальнейшем к снижению эффективности работы ТНУ и к возможному промерзанию грунта при ее эксплуатации в зимний период.

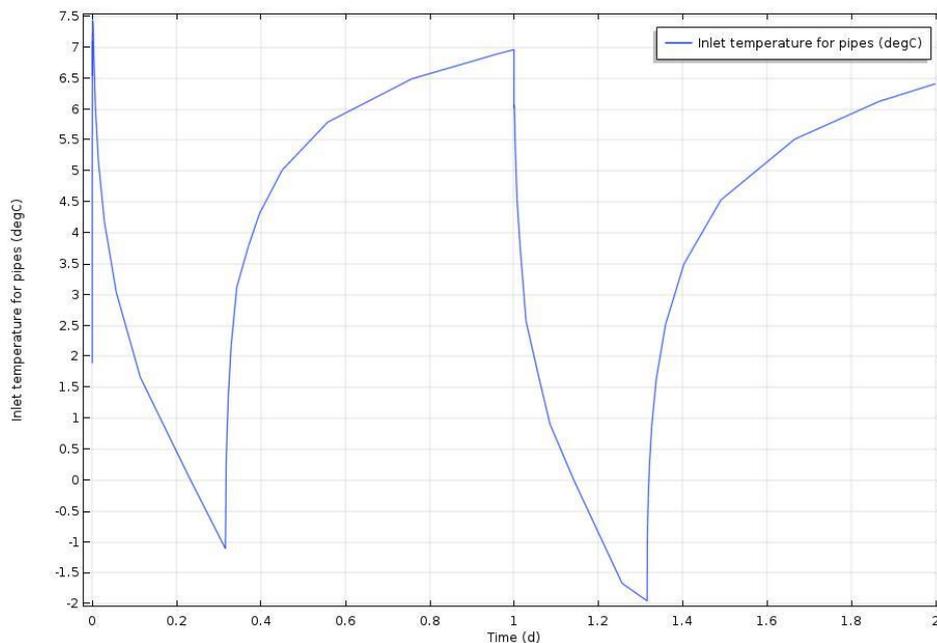


Рисунок 3. Температура теплоносителя на выходе трубы
грунтового теплообменника за трое суток исследования (разработано автором)

На рис. 4 показано распределение температуры в области теплообменника в момент времени 7,5 ч (0,3125 суток) для случая сухого песчаного грунта.

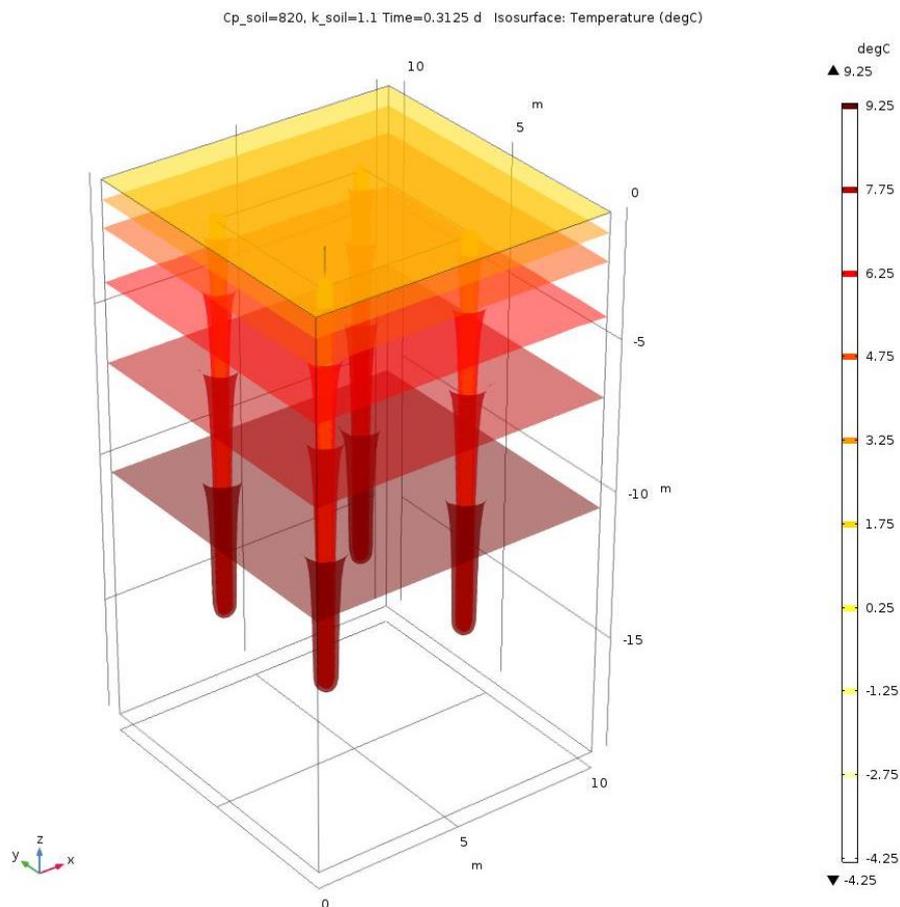


Рисунок 4. Распределение температуры грунта
в области теплообменника в зимний период (разработано автором)

График показывает, что на уровне возможного промерзания грунта 2 м температура около $-1,25^{\circ}\text{C}$. Это подтверждает выше сделанные предварительные выводы о необходимости теплоизоляции участков труб теплообменника, расположенных выше скважин. На уровне поверхности земли температура в январе в Московском регионе отрицательна, а на глубине 15 м еще $+9,25^{\circ}\text{C}$. Температура грунта на исследуемой глубине вполне достаточна для эффективной работы теплообменника, но по причине низкой теплопроводности грунта (сухой песчаный грунт) теплосъем с грунта и передача его теплоносителю низкая. Известно, что увлажненный грунт обладает более высокой теплопроводностью, следовательно, при проектировании подобных теплообменников на конкретном участке земли предварительно необходимы оценочные работы по выявлению более перспективных с точки зрения энергетического потенциала мест монтажных работ.

Заключение

1. Техническим результатом исследования является подтверждение возможностей повышения эффективности теплообменников в вертикальных скважинах к бытовым тепловым насосам.
2. Моделирование структуры теплообменников в вертикальных скважинах, грунт которых характеризуется физикой сплошных сред с использованием принятых расчетных интерфейсов Heat Transfer in Solids (ht) и Heat Transfer in Pipes (htp), позволяет проводить исследование их функционирования в диапазоне востребованных эксплуатационных показателей бытовых ТНУ.
3. Показано, что в зимний период в средней полосе России минимальное число вертикальных скважин глубиной 15 м под теплообменник к бытовым ТНУ не должно быть меньше четырех с общей длиной полимерных труб около 200 м для низкопотенциального теплоносителя.
4. Показано, что участки труб, соединяющие элементы теплообменника между скважинами и труб из первой и последней скважины, подающей теплоноситель в теплообменник и возвращающей его в испаритель ТН, должны быть помещены в грунт на глубину ниже промерзания и покрыты теплоизоляционным материалом.
5. Предложен вывод, что эффективность вертикальных теплообменников для бытовых ТНУ может быть значительно повышена при размещении скважин в пористых грунтовых средах, характеризующихся насыщенностью влагой или на уровень горизонтов подземных вод.

ЛИТЕРАТУРА

1. Филиппов С.П. Малая энергетика в России // Теплоэнергетика. – 2009. – №8. – С. 38-42.
2. Васильев Г.П. Использование низкопотенциальной тепловой энергии земли в теплонасосных установках / Г.П. Васильев, Н.В. Шилкин // АВОК. – 2003. – №2. – С. 52-60.
3. Тимофеев Д.В. Эффективность работы геотермальной теплонасосной системы теплоснабжения в жилом доме / Д.В Тимофеев, Е.Г. Малявина // СОК. – 2018. – №2 [Электронный ресурс] – Режим доступа: URL: <https://www.c-o->

- k.ru/articles/effektivnost-raboty-geotermalnoy-teplonasosnoy-sistemy-teplosnabzheniya-v-zhilom-dome, свободный. – Загл. с экрана. – 17.09.18.
4. Сучилин В.А. Автономная система отопления и горячего водоснабжения на основе тепловых насосов / В.А. Сучилин, А.С. Кочетков, С.А. Голиков // Современные концепции техники и технологии: проблемы, состояние и перспективы [Электронный ресурс] – Режим доступа: URL: https://interactive-plus.ru/discussion_platform.php?requestid=18271, свободный. – Загл. с экрана. – 15.09.18.
 5. Сухих А.А. Испытание теплового насоса для теплоснабжения индивидуального дома / А.А. Сухих, К.С. Генералов, И.А. Акимов // РосТепло.ру – все о теплоснабжении в России [Электронный ресурс] – Режим доступа: URL: www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_stablon.php?id=224, свободный. – Загл. с экрана. – 20.09.18.
 6. Фролов В.П. Анализ эффективности использования тепловых насосов в централизованных системах горячего водоснабжения / В.П. Фролов, С.Н. Щербаков, М.В. Фролов, А.Я. Шелгинский // Энергосбережение – 2004. – №2 [Электронный ресурс] – Режим доступа: URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles/php?nid=2431, свободный. – Загл. с экрана. – 17.09.18.
 7. Васильев Г.П. Теплонасосные системы теплоснабжения (ТСТ) для потребителей тепловой энергии в сельской местности // Теплоэнергетика. – 1997. – №4. – С. 24-27.
 8. Сучилин В.А. Моделирование внешних теплообменников к бытовым тепловым насосам с помощью Comsol Multiphysics / В.А. Сучилин, А.С. Кочетков, Н.Н. Губанов // Вестник Евразийской науки – 2018. – №1 [Электронный ресурс] – Режим доступа: URL: <https://esj.today/PDF/49SAVN118.pdf>, свободный. Загл. с экрана. – 17.09.18.
 9. Сучилин В.А. Исследование эффективности грунтового горизонтального теплообменника бытового теплового насоса с помощью Comsol Multiphysics / В.А. Сучилин, А.С. Кочетков, Н.Н. Губанов // Вестник Евразийской науки – 2018. – №2 [Электронный ресурс] – Режим доступа: URL: <https://esj.today/PDF/38SAVN218.pdf>, свободный. Загл. с экрана. – 17.09.18.
 10. Oberdofter P. Coupling heat transfer in heat pipe arrays with subsurface porous media flow for long time predictions of solar rechargeable geothermal systems / P. Oberdofter, R. Hu, Rahman M., E. Holzbecher and others [Электронный ресурс] – Режим доступа: URL: <https://www.comsol.com/paper/coupling-heat-transfer-in-heat-pipe-arrays-with-subsurface-porouos-media-flow-for-13383>, свободный. – Загл. с экрана. – 17.09.18.
 11. Патент 2636018 Российская федерация, МПК F24D 15/00. Система отопления и горячего водоснабжения помещений / Сучилин В.А., Кочетков А.С.; заявитель и патентообладатель Российский государственный университет туризма и сервиса. – №2016104802; заявл. 12.02.16; опубл. 17.11.17, Бюл. №32. – 3с.
 12. Патент 2645812 Российская федерация, МПК F24T 10/01. Внешний грунтовой горизонтальный контур для теплонасосных установок / Сучилин В.А., Губанов Н.Н., Кочетков А.С.; заявитель и патентообладатель Российский государственный университет туризма и сервиса. – №2016149178; заявл. 14.12.16; опубл. 28.02.18, Бюл. № 7. – 3 с.

Suchilin Vladimir Alekseevich

Russian state university of tourism and service, Moscow, Russia
E-mail: suchilinv@mail.ru

Kochetkov Alexey Sergeevich

Russian state university of tourism and service, Moscow, Russia
E-mail: alesha2701@mail.ru

Gubanov Nikolay Nikolaevich

Russian state university of tourism and service, Moscow, Russia
E-mail: gubanov.nik@yandex.ru

Research of efficiency of heat exchangers of vertical wells of heat pump systems in Comsol Multiphysics

Abstract. The article deals with the research of a heat exchanger in the form of vertical wells to heat pump systems using the computer simulation method. Practice shows that the most promising sources of low-potential energy are heat exchangers in vertical wells, as the most effective solution for sites where there is no possibility of installing horizontal ground heat exchangers. However, the efficiency of their operation depends largely on the properties of the soil in which the heat exchanger tubes are placed, from the structure of the heat exchanger and many other factors of the heat pump system.

In this regard, before installing a heat pump for heating, for example, in private houses, it is necessary to evaluate the energy potential of the soil in the relevant area and carry out a preliminary study of the projected ground heat exchanger on the model, taking into account the parameters of this source of low-potential the energy.

We propose a structure of a ground heat exchanger located in four vertical wells, characterized by a compact arrangement. A methodology for simulating and exploring the functioning of a heat exchanger based on COMSOL Multiphysics is also presented in conditions of instability of the energy potential of the soil, which corresponds to the features of the operation of household small and medium heat pump systems. In the simulation, the ground in the well area is characterized by the physics of continuous media using the accepted calculation interfaces Heat Transfer in Solids (ht) and Heat Transfer in Pipes (htp), which allow research of the functioning of household heat pumps systems in the range of performance.

The technical result of the research is to determine the possibilities of increasing the efficiency of this type of heat exchangers to domestic heat pumps.

Keywords: heating; heat pumps; heat pump systems; ground heat exchangers; vertical wells; efficiency of functioning; modeling of systems; research methodology; software; COMSOL Multiphysics