

УДК 556.555

ТЕХНОЛОГИЯ И ЭКОНОМИКА ОСВОЕНИЯ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ

Э.И.БОГУСЛАВСКИЙ¹, В.В.ФИЦАК²

¹ Санкт-Петербургская горная проектно-инжиниринговая компания ПитерГОРпроект, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

В статье представлено экономическое обоснование применимости приповерхностных геотермальных установок в Лужском районе, выполненное на базе результатов технико-экономических расчетов, а также интегрированного технического и экономического сравнения вариантов прогнозов теплоснабжения традиционного и за счет геотермальной теплонасосной установки (ГТНУ).

При строительстве приповерхностной геотермальной системы затраты могут быть на 50-100 % больше, чем затраты при центральном обогреве электроэнергией. Но эксплуатационные затраты на выработку тепловой энергии ПГС на 50-70 % ниже, чем от традиционных источников обогрева.

В настоящее время эта технология является весьма актуальной и применяется во многих странах мира (США, Германия, Япония, Китай и др.), использует как приповерхностные, так и глубокие скважины, в зависимости от региона. Представлен обзор мирового применения приповерхностных геотермальных установок.

Ключевые слова: теплоснабжение, приповерхностные слои земли, геотермальные ресурсы, недра, тепловой насос, энергия, экономическая оценка, теплообеспечение, тепловая продукция

Как цитировать эту статью: Богуславский Э.И. Технология и экономика освоения приповерхностных геотермальных ресурсов / Э.И.Богуславский, В.В.Фицак // Записки Горного института. 2017. Т. 224. С. 189-198. DOI: 10.18454/PMI.2017.2.189

Введение. Топливо-энергетический потенциал нашей планеты складывается из различных источников энергии космического и земного происхождения, в первую очередь из содержащихся в недрах топливо-энергетического сырья органического происхождения (газ, нефть, уголь, горючие сланцы, торф) или за счет специфических свойств отдельных элементов (в частности урана, тория), способных в ходе атомных реакций выделять внутриядерную энергию [8, 11].

В группу возобновляемых источников энергии включаются гидроэнергия, излучение солнца, геотермальная теплота, энергия ветра, биомассы и другие, которые являются практически неисчерпаемыми, в значительной степени возобновляемыми и экологически более благоприятными [1, 9]. Это связано с тем, что энергия природных процессов используется напрямую без сжигания топлива или производства ядерных реакций в атомных котлах.

Наиболее активно в разных странах используется энергия падающей воды, в связи с тем, что мощность гидростанций на крупных реках может достигать значительных величин. Остальные виды нетрадиционных, возобновляемых источников энергии обладают высокой степенью рассеянности, не позволяющей генерировать мощности, сопоставимые с тепловыми станциями на органическом топливе или АЭС. Из всех этих видов энергии определенными преимуществами обладает геотермальная, отличающаяся повсеместностью распространения, возможностью высокой концентрации тепла в зонах современного вулканизма и гидротермальной деятельности, а главное, независимостью от сезонных и суточных колебаний по сравнению с солнечной и ветровой энергией [5, 17].

В последнее десятилетие наметилось существенное расширение возможностей использования геотермальной энергии для теплоснабжения за счет вовлечения в сферу практического применения низкотемпературных ресурсов приповерхностной зоны земной коры. Это стало возможным благодаря освоению новых технологий, связанных с использованием тепловых насосов и грунтовых (скважинных) теплообменников [19, 21].

Освоение приповерхностных тепловых ресурсов недр. Использование низкотемпературной геотермальной энергии малых глубин можно рассматривать как некоторый технико-экономический феномен или реальную революцию в системе теплообеспечения. Меньше чем за 30 лет в мире была разработана многовариантная технология и построены миллионы дейст-

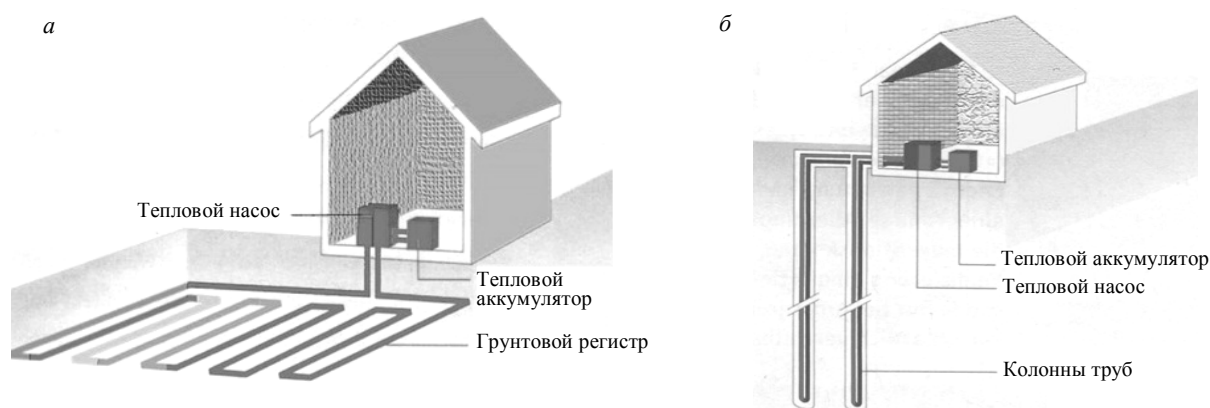


Рис. 1. Приповерхностная (малоглубинная) геотермальная система с теплообменом в горизонтальных каналах (а), в скважинах (б)

вующих систем теплоснабжения. Приповерхностные (малоглубинные) геотермальные системы используются для обогрева и охлаждения различных типов жилых домов (от очень дешевых до роскошных индивидуальных или многоквартирных), бензозаправок, супермаркетов, церквей, офисов образовательных учреждений и т.д. [3, 18, 20].

Суть рассматриваемых технологий заключается в создании подземного теплообменника [4], расположенного на малой глубине до 200-300 м с замкнутым или открытым контуром, присоединенного к тепловому насосу, расположенному внутри отапливаемого помещения (рис.1). При этом используются температуры пород в интервале от -5 до $+15$ °С.

Эти системы используют не только геотермальную энергию, накопленную в горных породах или в воде, но и солнечную. Конкретная доля той или иной энергии, используемая источником, зависит от глубины расположения теплообменника, климатических и гидрогеологических условий района. Предполагается, что для мелкозалегающих горизонтальных теплообменников основной вклад составляет доля солнечной энергии. Приповерхностные системы могут обеспечить теплоснабжение для преобладающих условий в любой стране или ее регионах, определить местную экономическую жизнеспособность и нормы роста производства.

Многие страны уже имеют установки, которые обеспечивают рост использования приповерхностных геотермальных ресурсов. Большинство находятся в Северной Америке, Европе и Китае. Количество стран с такими установками увеличилось от 26 в 2000 г. до 33 в 2005 г., 43 в 2010 г. и 48 в 2015 г. Мощность установок варьируется от 5,5 кВт для жилого сектора до 150 кВт для коммерческих нужд. Число установок мощностью по 12 кВт (типичных для домов США и Западной Европы) составляет приблизительно 4,16 млн [20].

Геотермальные теплонасосные установки (ГТНУ) были признаны весьма эффективным источником производства возобновляемой теплоты, однако установлена еще более важная их роль в борьбе с парниковым эффектом. Это подтверждает мнение канадских энергетиков: «Вряд ли будет потенциально большим смягчение отрицательного эффекта эмиссии углекислого газа и уменьшение негативного воздействия отопления зданий от других источников, рыночно доступной технологии, чем от грунтовых тепловых насосов».

Основные направления использования тепловой продукции приповерхностных (малоглубинных) геотермальных систем (установок) с учетом особенностей потребителей:

- отопление и горячее водоснабжение индивидуальных домов;
- теплоснабжение и кондиционирование индивидуальных домов; многоэтажных жилых домов; школ, больниц и других муниципальных зданий; офисов предприятий; жилых массивов или групповых строений;
- оттаивание снежного и ледяного покрова на тротуарах и проезжей части дорог.

При строительстве ГТНУ применяются две основных технологии [2]: соединенная в грунте закрытая петля и грунтовая вода (открытая петля). Эти системы (рис.2, 3) могут быть установлены горизонтально, вертикально в породах или в водоемах (реках, озерах, морях). В приповерхностных слоях Земли целесообразно строить теплонасосную установку, если бурение скважин экономически выгодно или на участке уже есть скважины.

В соединенной в грунте схеме закрытая петля трубы размещаются горизонтально (на глубине 1-3 м) или вертикально (на глубине от 20 до 300 м). Теплообмен водного антифриза происходит через пластмассовые трубы, чтобы забрать теплоту грунта зимой или отдать теплоту грунту летом.

Открытые системы используют грунтовую воду или воду водоема непосредственно в теплообменнике и затем сбрасывают ее в этот или другой поток, либо в грунт, или для ирригации. Эффективность ГТНУ характеризуется коэффициентом преобразования энергии (КПЭ), который является отношением энергии продукции к входной энергии (электричество для компрессора) и изменяется от 3 до 6 для существующего оборудования (чем выше число, тем лучше эффективность). Таким образом, КПЭ = 4 показывает, что единица электрической энергии произвела четыре единицы теплоты.

При оценке мировой экономии органического топлива в тоннах нефтяного эквивалента (т о.е.) и потока CO_2 благодаря работе геотермальных теплонасосных установок может быть сделано несколько предположений. Например, если ежегодное использование геотермальной энергии 28000 ТДж (7800 ГВт·ч) сравнить с производством тепловой энергии станциями, использующим топливную нефть с эффективностью 30 %, то экономия составит 15,4 млн баррелей нефти или 2,3 млн т о.е. Это исключит выброс приблизительно 7 млн т CO_2 [20]. В частности, сокращение эмиссии CO_2 за счет освоения ГТНУ совершенно очевидно. Например, связь грунтовых тепловых насосов с постоянной британской тепловой сетью может привести к сокращениям эмиссии CO_2 более чем на 50 % по сравнению с обычными отопительными технологиями, основанными на органическом топливе.

Предложим классификацию технологии геотермальных теплонасосных установок (рис.4).

Опыт применения геотермальных тепловых насосов в США. Большинство модулей геотермальных теплонасосных установок в США построено для охлаждающей нагрузки и в меньшей мере для нагревающей, составляющей в среднем только 1000 ч в год [14].

В Европе большинство модулей установлено для нагревающих нагрузок и часто предлагается обеспечивать только базовую нагрузку совместно с органическим топливом в пиках. Поэтому европейские установки могут использоваться от 2000 до 6000 ч нагрузки в год, в среднем около 2300 ч годовой предельной нагрузки.

Даже при том, что охлаждение возвращает теплоту земле и таким образом ГТНУ не полностью являются геотермальным источником, это безусловно не органическое топливо вносит вклад в «чистую окружающую среду». В США в 2005 г. ГТНУ устойчиво составляли в тепло- и холодо-снабжении приблизительно 12 %, главным образом в среднезападных и восточных штатах от Северной Дакоты до Флориды. На этот период ежегодно устанавливалось около 50000 модулей, из которых 46 % – вертикальные закрытые петлевые системы, 38 % – горизонтальные закрытые петлевые системы и 15 % – открытые петлевые системы. Более 600 школ установили эти модули для отопления и кондиционирования, они особенно распространены в штате Техас. ГТНУ для типичных жилищных потребностей имеет установленную мощность около 10,5 кВт.

Одно из крупных геотермальных теплонасосных сооружений в США работает в гостинице «Galt» в Луисвилле, штат Кентукки. Нагревание и кондиционирование воздуха обеспечены ГТНУ для 600 гостиничных номеров, 100 квартир, 89000 м² офиса, всего 161650 м². ГТНУ прокачивает 177 л/с в четыре скважины с температурой 14 °С, обеспечивая 15,8 МВт охлаждающей и 19,6 МВт нагревающей нагрузки. Используемая тепловая энергия по сравнению со смежным подобным зданием, где нет ГТНУ, позволяет экономить около 50000 дол. в месяц.



Рис.2. Схема «закрытая петля» для ГТНУ

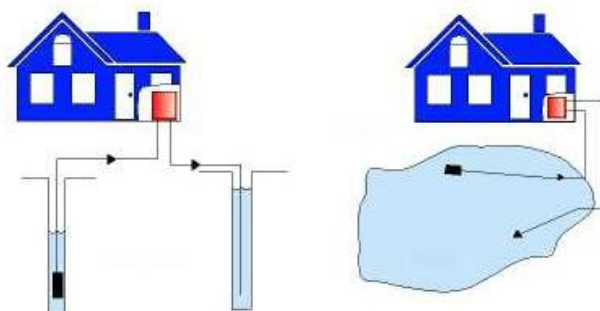


Рис.3. Схема «открытая петля» для теплового насоса

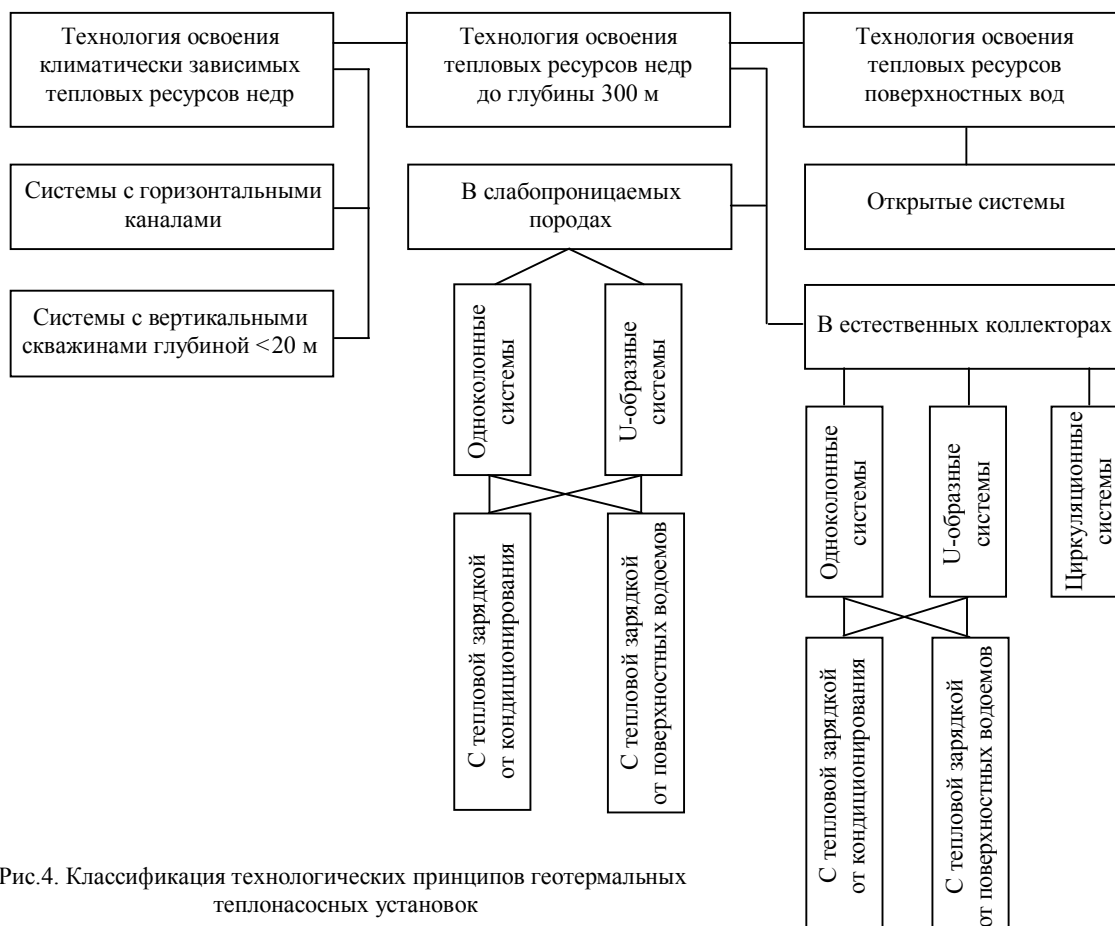


Рис.4. Классификация технологических принципов геотермальных теплонасосных установок

Европейский опыт освоения геотермальных приповерхностных ресурсов. Геотермальные тепловые насосы могут применяться для тепло- и хладоснабжения фактически в любом месте и с большой гибкостью, чтобы отвечать любым требованиям. В западных и центральных европейских странах прямое использование глубинной геотермальной энергии для снабжения теплотой районов с большим числом клиентов пока ограничено областями с определенными геолого-геотермическими условиями. В этой ситуации использование вездесущих приповерхностных геотермальных ресурсов децентрализованными ГТНУ – очевидный выбор [15].

Результат – активное рыночное проникновение таких систем; число коммерческих компаний, работающих в этой области, постоянно увеличивается и их продукция существенно возрастает. Больше 20 лет назад в Европе утвердилась концепция поддержки этой технологии, как и озвученного типового проекта и инсталляционных критериев. Типичная ГТНУ с буровой скважиной «вертикальная петля» показана на рис.5.



Рис.5. Типичное применение домашней системы теплоснабжения с геотермальным тепловым насосом в Центральной Европе (глубина скважин ≥ 100 м)

Системы геотермальных ТНУ в Китае. Геотермальная ТНУ основана на оригинальной инновационной технологии освоения тепловой энергии приповерхностного слоя Земли, которая была изобретена и развита для обеспечения теплоснабжения зданий и сооружений. С появления в 2001 г. она привлекла внимание пользователей и правительственных служб Китая [24]. Успешно действуют геотермальные ТНУ в различных частях Китая, охватывают широкий диапазон строений: жилые здания, здания офисов, гостиницы, больницы, торговые центры, школы, Национальный театр. Системы использовались при проведении Олимпийских игр в Пекине (2008).

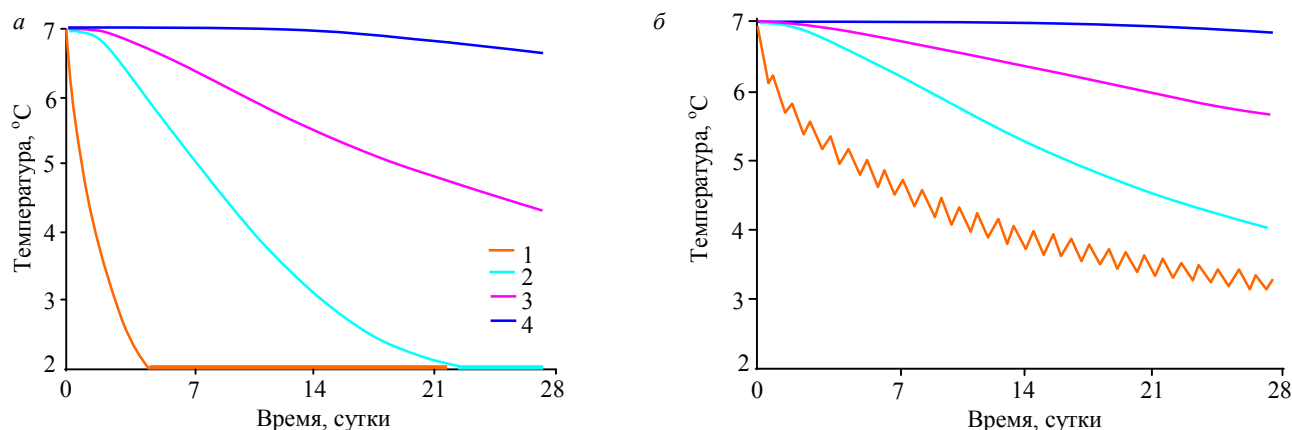


Рис.6. Подземная температурная характеристика для непрерывной (а) и прерывистой (б) нагревающих операций
1 – 3,2 м от трубы; 2 – 1,2 м; 3 – 0,1 м; 4 – 1 м между двумя трубами

Работа теплового насоса от грунтового источника малой глубины в Японии. Экспериментально на системе приповерхностной ТНУ в городе Таканоси были установлены температуры пород вокруг скважины для непрерывных (постоянных) и прерывистых процессов нагрева теплоносителя [23]. При прерывистых операциях системой управляли с 6 ч 00 мин до 21 ч 30 мин в цикле 30-минутной циркуляции жидкости и 30-минутной остановки. На рис.6 показаны температурные изменения в приповерхностных породах для непрерывных и прерывных операций.

В случае непрерывной операции температура пород около скважины быстро уменьшается, в частности на расстоянии 0,1 м от нее снижается через 6 дней до температуры подаваемого теплоносителя.

В случае прерывной операции температура пород снижается медленнее, чем при непрерывной. Это означает, что температура пород вокруг скважины восстанавливается в периоды остановок циркуляции.

Геотермальные системы с тепловым насосом в России. Эффективность использования энергии – индикатор научного, технического и экономического потенциала общества, позволяющий оценить уровень развития.

Сравнение параметров эффективности энергии в разных странах показывает, что в экономике России определенный расход энергии полного внутреннего продукта (валовой национальный продукт) в несколько раз выше, чем в передовых странах. Уровень единицы потребления энергии сопоставимого валового национального продукта России приблизительно в четыре раза выше, чем в США – стране с высокой установленной мощностью производства товаров и поставки услуг, в 2,5 и в 3,6 раза выше, чем в Германии и Японии. Это предполагает, что экономия, по крайней мере 40-50 % потребления энергии возможна в России [13, 16, 22].

Получение высокой температуры с помощью тепловых насосов – одно из самых многообещающих направлений в области энергосбережения и в настоящее время привлекает большее внимание во всем мире.

Энергетический кризис 70-х годов XX века был мощным стимулом к развитию ТНУ. Например, в США в течение этого периода объем изготовления тепловых насосов был утроен и достиг уровня 300 тыс. в год, а количество установленных ТНУ – около 1 млн. В 80-х годах уровень применения ТНУ стабилизировался, а затем начал расти из-за изменения экологии и инициативы экономии энергии. В России, к сожалению, только несколько индивидуальных зданий были оборудована геотермальными ТНУ.

В 1994-1997 гг., с целью демонстрации использования нетрадиционных энергетических технологий для зданий с нормальными эксплуатационными режимами был введен в эксплуатацию комплекс парка отдыха «ECOPARK FILI» в Москве [10]. Демонстрационный комплекс включал технические здания и два здания офиса типа «Улитки». Полная площадь зданий в комплексе 1000 м². Комплекс расположен на территории площадью 1 га. Для зданий комплекса установлены автоматизированные системы теплового насоса (ATNU – Automated heat pump systems of heat supply), использующие тепловую энергию низкого потенциала от приповерхностных слоев Земли. Геотермальные ТНУ включают грунтовые коллекторы для извлечения из Земли 40 кВт·ч теплоты



низкого потенциала. Они связаны с четырьмя тепловыми насосами ATNU-15 (российского производства), которые обеспечивают выпуск 60 кВт·ч продукции с высокой температурой.

Результаты мониторинга систем теплового насоса и зданий в целом представлены ниже:

Параметр	Здание 1	Здание 2
Сопротивление теплопередаче внешней защиты, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$		
Стены	1,2	3,0
Окна	0,4	0,4
Текущее потребление, МВт·ч в год	143,5	49,8
Освещение и домашние потребности	48,0	18,0
Горячее водоснабжение	16,0	12,0
Нагревание	79,5	19,8
Определенное потребление ресурсов мощности, кВт·ч/м ² в год	478	166

При оценке эффективности энергии для зданий комплекса была принята во внимание вся подводимая энергия: для нагревания помещений, горячего водоснабжения, освещения, оборудования офиса и домашние потребности.

В Ярославской обл. в 1998 г. впервые сельская школа в России была оборудована геотермальной ТНУ. Двухэтажное здание школы построено из кирпича, площадь $\sim 2000 \text{ м}^2$, объем $\sim 6900 \text{ м}^3$, толщина стен 640-680 мм, площадь окон и дверных проемов $\sim 230 \text{ м}^2$ и $\sim 20 \text{ м}^2$. Здание имеет подземное помещение. Школа расположена в деревне Филиппово в 100 км от Ярославля и предназначена для 162 учеников и 20 преподавателей. Тепловой насос расположен отдельно в здании, которое было запланировано под размещение угольной котельной.

Следует отметить, что при проектировании системы были допущены некоторые ошибки, в частности: существенно занижено расстояние между скважинами, принята весьма малая их глубина. Это привело к довольно низкому коэффициенту преобразования электрической энергии в тепловую – всего 2-3 % [7].

Некоторые результаты мониторинга действия системы отопления школы:

Параметр	5 октября 2001- 4 ноября 2001	4 ноября 2001- 23 марта 2002
Производство тепловой энергии, кВт·ч	33348,8	244878,0
Расход электроэнергии, кВт·ч	21465,0	183810,0
Количество энергии, извлеченной из грунта, кВт·ч	18368,8	92168,0
Экономия энергии (без учета ГВС), %	45	31
Коэффициент преобразования, доли единицы	3,23	2,16
Среднее количество извлеченной теплоты с 1 м длины теплообменника в земле, Вт/м	182	126

Экспериментальный дом с геотермальным теплоснабжением был построен и сдан в эксплуатацию в 2001 г. в Москве на ул. Академика Анохина.

Результаты строительства показаны в табл.1 как сравнение проекта и экспериментально полученных фактических параметров.

Таблица 1

Результаты проекта и фактических параметров геотермального теплоснабжения
в доме на ул. Академика Анохина, Москва

Параметры	Основной дом		Энергетически эффективный дом	
	Проект	Эксперимент	Проект	Эксперимент
Потребляемая тепловая мощность, кВт				
на отопление	362,5	388,6	379	370
на горячее водоснабжение	453,6	723,3	90	83
Годовое потребление зданием, МВт·ч				
тепловая энергия для отопления	1059	1008	577	560
электроэнергия для ТНУ	182,5	27,3	384	430
Годовое потребление на 1 м ² площади квартир, кВт·ч				
тепловая энергия для отопления	162	154	87,6	85,0
электрическая энергия	124,5	80,1	132,4	157
Годовой расход топлива на 1 м ² , кг у.т./м ²	55,1	40,9	27	30
Экономия энергии по сравнению с базовым домом (проект), %	0		50	45,5

В табл.2 представлены результаты интегрированного технического и экономического сравнения вариантов прогнозов теплоснабжения традиционного и за счет геотермальной теплонасосной установки (ГТНУ) для Москвы в 2020 г. Это сравнение было выполнено при следующих условиях:

1. Стоимость 1 т условного топлива – 100 дол.
2. Капиталовложение в 1 кВт обычного оборудования (районная тепловая станция, индивидуальный газовый котел в здании и т.д.) – 100 дол. без учета капиталовложений в тепловые сети.
3. Капиталовложение на 1 кВт теплопроизводительности ГТНУ – 250 дол., переключение системы на сбор низкопотенциальной теплоты – 50 дол.
4. Фундаментальные инвестиции в ГТНУ обеспечиваются без затрат для городского бюджета только за счет инвесторов построенных или восстановленных объектов.
5. Средний ежегодный коэффициент преобразования ТНУ принят равным 3,5.

Таблица 2

Результаты технико-экономического сравнения вариантов прогнозов традиционного и геотермального теплоснабжения Москвы в 2020 г.

Технико-экономический параметр	Вариант	
	Базовый	Геотермальный
Мощность установленного оборудования, МВт	66700	66700
Электрическое оборудование, МВт	9500	14500
Тепловые насосы	–	5000
Тепловое оборудование, МВт	57200	57200
Тепловые насосы	–	17500
Экономия ресурсов за год		
млн МВт·ч	–	32,25
млн т о.т.	–	3,84
Капиталовложения в теплонасосные установки, млн дол.		5605
из городских источников		1230
из источников бюджета		4375
Экономия эксплуатационных муниципальных расходов на закупке первичного топлива, млн дол.	–	384

Капитальные затраты на строительство приповерхностной геотермальной системы (ПГС) могут оказаться на 50-100 % выше затрат на создание систем прямого обогрева электроэнергией [6]. В США считают приемлемым достижение окупаемости в течение 4-8 лет. Однако эксплуатационные затраты на выработку тепловой энергии ПГС на 50-70 % ниже традиционных источников обогрева на электричестве или нефтепродуктах. Срок окупаемости снижается в условиях резко континентального климата, где системы зимой используются для отопления, а летом – для охлаждения зданий. Расчет затрат на строительство ПГС в доме на одну семью в Швейцарии (в тысячах долларов) подтверждает сказанное:

Затраты	ПГС	Котельная на нефтепродуктах
Скважинный теплообменник до глубины 135 м	8,05	–
Тепловой насос	7,35	–
Регулировка систем отопления	1,61	–
Материалы и установка	2,94	–
Комнатный котел, горелка с низким NO	–	5,6
Пластиковая емкость для нефтепродуктов	–	4,2
Дымоходные трубы	–	4,9
Итого	19,55	14,7

Приведем результаты расчетов на базе экономико-математического моделирования системы геотермального теплоснабжения коттеджа в Лужском районе в 2016 г. На базе созданной экономико-математической модели [6] были выполнены исследования и оптимизационные расчеты [12] параметров и показателей ПГС:

Природные, экономические условия и исходные параметры

Количество жителей, чел.....	5
Максимальная температура воды в прямом трубопроводе, °С.....	70
Максимальная температура воды в обратном трубопроводе, °С.....	40
Температура воды в период летнего ГВС, °С.....	50
Температура холодной воды зимой, °С.....	3
Температура сброса воды ТНУ, °С.....	3
Диаметр водовыдающей трубы (става), м.....	0,1
Желательный срок эксплуатации ГЦС, год.....	15
Длина добычной скважины, м.....	200
Дебит добычной скважины, м ³ /ч.....	3
Температура пород на забое скважины, °С.....	10
Мощность коллектора, м.....	180
Расстояние между скважинами, м.....	15
Расстояние между рядами скважин, м.....	15
Цена электроэнергии, руб./Вт·ч.....	0,00337
Ставка банка, %	7
Цена топлива (дизельное), руб./т у.т.....	35800
Максимальная тепловая нагрузка отопительного периода, МДж/ч....	85,29
Суммарная годовая тепловая нагрузка, ГДж/год.....	244,0
Расход сетевой воды при $Q_{\max}$, м ³ /ч.....	0,624
Температура воды на выходе из добычного трубопровода, °С.....	4,79
Расход геотермального теплоносителя по ГЦС, м ³ /ч.....	9,60
Диаметр скважины, м.....	0,250
Максимальное количество скважин, шт.....	4
Срок службы скважины, год.....	15,0
Длина теплотрассы, м.....	60,0
Диаметр наружной теплотрассы, м.....	0,041
Суммарное максимальное давление нагнетания, МПа.....	0,3044
Годовая выработка теплоты СГТ, т у.т./год.....	10,49
Максимальная потребляемая мощность СГТ, кВт.....	6,82
Максимальная потребляемая мощность ГЦС, кВт.....	1,32
Максимальная потребляемая мощность ТНУ, кВт.....	5,50
Расход электроэнергии СГТ, кВт·ч/год.....	14963
Расход электроэнергии на ТНУ, кВт·ч/год.....	13928

Экономические показатели ГЦС

Суммарные капиталовложения в ГЦС, тыс. руб.....	2887,78
Инвестиции на строительство скважин, тыс. руб.....	1830,95
Инвестиции на став труб в скважинах, тыс. руб.....	536,77
Инвестиции на теплотрассу, тыс. руб.....	64,55
Инвестиции в насосную установку, тыс. руб.....	88,22
Эксплуатационные затраты (с выплатой кредита), тыс. руб./год.....	300,75
Затраты на электроэнергию, тыс. руб./год.....	3,49
Издержки производства (субсидии), тыс. руб./год.....	13,89
Выплата кредита и процентной ставки, тыс. руб./год.....	286,85

Экономические показатели ТНУ

Капиталовложения, тыс. руб.....	855,89
Эксплуатационные затраты (кредит), тыс./руб.....	132,35
Затраты на электроэнергию, тыс. руб./год.....	46,94
Годовые издержки производства (субсидии), тыс. руб./год.....	47,33
Выплата кредита и процентной ставки, руб./год.....	85,02

Экономические показатели СГТ

Капиталовложения, тыс. руб.....	3743,67
Годовые эксплуатационные затраты (кредит), тыс. руб./год.....	433,09
Годовые издержки производства (субсидии), тыс. руб./год.....	61,22
Выплата кредита и процентной ставки, тыс. руб./год.....	371,87

Экономические критерии эффективности СГТ

Себестоимость производства теплоты (кредит), руб./МДж.....	1,775
Себестоимость производства теплоты (субсидии), руб./МДж.....	0,251
Срок окупаемости (субсидии), лет.....	9,82

Выводы

1. Низкотемпературная геотермальная энергия от приповерхностного слоя Земли представляет мощный источник теплоты или холода. Применение приповерхностных геотермальных установок – существенный и широко распространенный ресурс, который может использоваться в теплоснабжении жилищных, жилищно-коммунальных, промышленных и сельскохозяйственных объектов.
2. Система геотермальных ТНУ обеспечивает технологическое решение с низкими капитальными и эксплуатационными расходами.
3. Рассмотренная система – замкнутая, без эмиссии любого газа, жидкости и загрязнителей.
4. Широко распространенный опыт системы будет стимулировать эффективность геотермальной энергии и защиту окружающей среды, а также одновременно развивать уменьшение стоимости геотермальной энергии.
5. Экономия ископаемого топлива (угля) для отопления площадей 2,5 млн м² является эквивалентной уходу от эмиссии 260 тыс.т CO₂, 2,2 тыс.т SO₂ и 1,6 тыс.т NO₂.
6. В работе кратко обобщены и проанализированы состояние развития и практика использования сравнительно новой технологии извлечения геотермальной энергии для нужд теплоснабжения – геотермальных теплонасосных установок (систем).
7. Сделана приближенная оценка возможности и целесообразности строительства таких систем в условиях Лужского района Ленинградской области.
8. Техничко-экономические расчеты показали технологическую и экономическую приемлемость такого решения проблем теплоснабжения в этом регионе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Альтернативные источники энергии: Материалы советско-итальянского симпозиума. М.: Изд-во ЭНИН, 1983. 285 с.
2. Богуславский Э.И. Локальное теплоснабжение на базе приповерхностных геотермальных установок // Энергоназор. 2008. № 1. С. 37-40.
3. Богуславский Э.И. Перспективы освоения приповерхностных геотермальных ресурсов // VII Международная конференция «Новые идеи в науках о Земле». М.: Изд-во КДУ. 2005. Т. 3. С. 194-195.
4. Богуславский Э.И. Тепломассообмен в приповерхностных геотермальных системах / Э.И.Богуславский, Н.Н.Смирнова, С.В. Егоров // Записки Горного института. 2010. Т.187. С. 24-28.
5. Богуславский Э.И. Техничко-экономическая оценка освоения тепловых ресурсов недр. Л.: Изд-во ЛГУ. 1984. 168 с.
6. Богуславский Э.И. Экономико-математическое моделирование и оптимизация параметров и показателей приповерхностных геотермальных систем // Вестник Ярославского регионального отделения РАЕН. 2008. Т. 2. № 3. С.70-75.
7. Васильев Г.П. Геотермальные системы с тепловым насосом для поставки высокой температуры / World Geothermal Congress. Antalya, Turkey. 2005. С. 50-55.
8. Мелентьев Л.А. Энергетический комплекс СССР / Л.А.Мелентьев, А.А.Макарова. М.: Экономика. 1983. 260 с.
9. Непорожний П.С. Энергетика мира // Докл. XI конгресса МИРЭК. М.: Энергоатомиздат, 1982. 216 с.
10. Попель О.С. Состояние и перспективы развития возобновляемых источников энергии // Региональная энергетика и энергосбережение. 2013. № 4. С. 42-49.
11. Старшинов Ю.И. Мировая энергетика: прогноз развития до 2020 г. М.: Энергия. 1980. 135 с.
12. Boguslavsky E.I. Methods and Recommendations for Investment Substantiation of Geothermal Power Plant Developments / E.I.Boguslavsky, A.I.Mikheyev // Proceedings World Geothermal Congress. Bali, Indonesia. 25-29 April 2010.
13. Boguslavsky E.I. Integration in the use of geothermal, solar and wind energy / E.I.Boguslavsky, V.V.Elistratov, A.I.Mikheyev // Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University. Stanford, California. 30 January – 1 February 2012.
14. Boyd T.L. The United States of America Country Update / T.L.Boyd, A.Sifford, J.W.Lund // Proceedings World Geothermal Congress. Melbourne, Australia, International Geothermal Association. 2015. P. 12.
15. European Geothermal Congress. Pisa, Italy. European Geothermal Energy Council and the International Geothermal Association – European Branch, Secretariat, Brussels, Belgium. 2013.
16. Kononov V. Geothermal Development in Russia: Country Update Report 2010-2015 / V.Kononov, O.Povarov // Proceedings World Geothermal Congress. Antalya, Turkey, International Geothermal Association. 2005. P. 5.
17. Litvinenko V.S. Deep Seated and Near-Surface Geothermal Resources of Russia / V.S.Litvinenko, E.I.Boguslavsky, B.N.Khakhaev // Proceedings World Geothermal Congress. Bali, Indonesia. 25-29 April 2010.
18. Lund J.W. Direct Utilization of Geothermal Energy 2010 Worldwide Review / J.W.Lund, H.Derek, K.Freeston, L.Tonya, A.Boyd // Proceedings World Geothermal Congress. Bali, Indonesia. 25-29 April 2010.
19. Lund J.W. Direct Utilization of Geothermal Energy / J.W.Lund, D.H.Freeston, T.L.Boyd // Worldwide Review. Geothermics. Elsevier. 2011. P. 159-180.
20. Lund J.W. Direct Utilization of Geothermal Energy 2015 Worldwide Review / J.W.Lund, T.L.Boyd. Geo-Heat Center, Oregon Institute of Technology, Klamath Falls, OR 97601, USA. Proceedings World Geothermal Congress. Melbourne, Australia. 19-25 April 2015.



21. Rybach L. Status and Prospects of Geothermal Energy // Proceedings World Geothermal Congress. Bali, Indonesia. 25-29 April 2010.
22. Svalova V. Geothermal Energy Use in Russia. Country Update for 2010-2015 / V.Svalova, K.Povarov // Proceedings World Geothermal Congress. Melbourne, Australia, International Geothermal Association. 2015. P. 5.
23. Yasukawa K. Country Update of Japan: Renewed Opportunities / K.Yasukawa, M.Sasad // Proceeding World Geothermal Congress. Melbourne, Australia, International Geothermal Association. 2015. P. 6.
24. Speeding up Industrialized Development of Geothermal Resources in China – Country Update Report 2010-2014 / K.Zheng, Y.Dong, Z.Chen, T.Tian, G.Wang // Proceeding World Geothermal Congress. Melbourne, Australia, International Geothermal Association. 2015. P. 9.

Авторы: **Э.И.Богуславский**, д-р техн. наук, профессор, boguslEI@yandex.ru (Санкт-Петербургская горная проектно-инжиниринговая компания ПитерГОРпроект, Санкт-Петербург, Россия), **В.В.Фицак**, канд. техн. наук, доцент, fvv@spmi.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Статья принята к публикации 31.10.2016.