



ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ В УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ: ПОТЕНЦИАЛ И ОСОБЕННОСТИ ВНЕДРЕНИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СИСТЕМ

Калашников Артем Валерьевич

Студент кафедры инженерной экологии и систем теплоснабжения, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
г. Екатеринбург Россия

Аннотация

Данная статья посвящена анализу перспектив и специфических особенностей применения геотермальной энергии в плотной городской застройке, где внедрение крупномасштабных возобновляемых источников энергии сопряжено с серьезными пространственными и техническими ограничениями. В контексте урбанизированных территорий наибольшее значение приобретают низкотемпературные геотермальные системы, базирующиеся на использовании грунтовых тепловых насосов и теплообменников замкнутого цикла. Рассматривается принцип работы этих систем, их способность обеспечивать круглогодичное отопление, охлаждение и горячее водоснабжение зданий, что способствует децентрализации теплоснабжения и снижению зависимости от ископаемого топлива. Анализируются ключевые вызовы, уникальные для городской среды: ограниченность доступной площади для бурения вертикальных скважин, необходимость учета геологических особенностей городской территории, а также потенциальное взаимовлияние тепловых скважин в плотной застройке, которое может привести к тепловому "засорению" грунта. Сделан вывод о том, что при условии комплексного геологического планирования и интеграции систем в стадии проектирования, геотермальная энергия представляет собой один из наиболее устойчивых и энергоэффективных способов обеспечения тепловым комфортом современных городских агломераций.

Ключевые слова: Геотермальная энергия, Грунтовые тепловые насосы, Городская застройка, Низкотемпературная геотермия, Децентрализованное теплоснабжение, Энергоэффективность, Вертикальные скважины, Устойчивое развитие.

Введение

Городские агломерации являются центрами потребления энергии, при этом значительная часть этой энергии расходуется на отопление, охлаждение и горячее водоснабжение зданий.

Традиционные системы централизованного теплоснабжения, основанные на сжигании природного газа или угля, приводят к высоким выбросам парниковых газов и локальному загрязнению воздуха. Внедрение крупномасштабных возобновляемых источников энергии в плотно застроенных городских районах ограничено дефицитом свободных земель, что делает **геотермальную энергию** одним из наиболее привлекательных вариантов.

Геотермальная энергия использует постоянную температуру земной коры, которая на глубине нескольких десятков метров остается стабильной в течение всего года, в среднем составляя от 10⁰С градусов Цельсия. В условиях городской застройки акцент смещается с высокотемпературных систем, требующих глубокого бурения, на **низкотемпературные системы**, использующие грунтовые тепловые насосы. Эти системы не генерируют электричество, а обеспечивают тепловой комфорт.

Цель данной статьи — детально проанализировать технологические особенности применения низкотемпературных геотермальных систем в условиях ограниченного городского пространства, определить их экологические преимущества и критически оценить специфические технические и геологические вызовы, которые необходимо решать для успешной интеграции этих систем в городскую инфраструктуру.

Технологические Решения в Городской Среде

В городской застройке, где горизонтальные грунтовые коллекторы практически не применимы из-за высокой плотности коммуникаций и фундаментов, доминируют системы с вертикальным расположением теплообменников.

Принцип Работы Грунтового Теплового Насоса: Грунтовой тепловой насос — это высокоэффективный холодильный агрегат, который, работая по обратному циклу Карно, переносит низкопотенциальное тепло из грунта в здание или, в режиме охлаждения, отводит избыточное тепло из здания в грунт.

Зимний цикл отопления: Насос извлекает тепло из грунта при постоянной температуре, повышает его температуру с помощью компрессора и направляет в систему отопления здания. Коэффициент преобразования энергии обычно находится в диапазоне от 3 до 5, то есть на 1 кВт электроэнергии, затраченной на работу компрессора, система генерирует 3–5 кВт тепловой энергии.

Летний цикл охлаждения: В летнее время система может работать как кондиционер, отводя тепло из здания и сбрасывая его в грунт, где оно эффективно аккумулируется. Этот реверсивный цикл является ключевым преимуществом, поскольку он обеспечивает **двойную функцию** при минимальном увеличении инфраструктурных затрат.

Системы с Вертикальными Скважинами: В плотной городской среде, где площадь застройки ограничена, используются вертикальные скважинные теплообменники,

которые могут быть пробурены на глубину от 50 до 200 метров. Эти системы занимают минимальную площадь на поверхности, что позволяет размещать их под фундаментами, парковками или внутренними дворами. Важным направлением является интеграция теплообменных труб **непосредственно в фундаментные сваи** строящихся высотных зданий — так называемые **энергетические сваи**. Это позволяет использовать уже существующие строительные элементы для извлечения геотермального тепла, оптимизируя капитальные затраты.

Экологические и Экономические Преимущества

Внедрение геотермальных систем в городе дает значительные экологические и экономические выгоды, напрямую влияя на устойчивость городского развития.

Снижение Выбросов и Децентрализация: Главное экологическое преимущество — это резкое снижение потребления ископаемого топлива и, как следствие, минимизация выбросов CO₂ и загрязняющих веществ в атмосфере. Геотермальные тепловые насосы используют электричество, которое может быть получено из чистых источников, и не имеют локальных выбросов. Децентрализация теплоснабжения, основанная на геотермии, повышает энергетическую безопасность города и снижает потери тепла, неизбежные в протяженных централизованных сетях. Уменьшение тепловых потерь в системах распределения может достигать 10–20%, что является существенной экономией в масштабах города.

Стабильность Затрат и Долговечность: Хотя начальные капитальные затраты на бурение скважин могут быть высокими, операционные расходы геотермальных систем значительно ниже по сравнению с традиционным газовым или электрическим отоплением благодаря высокому коэффициенту преобразования. Кроме того, геотермальные системы демонстрируют исключительную долговечность: подземные коллекторы могут функционировать без существенного обслуживания до 50 лет и более. Это обеспечивает долгосрочную стабильность стоимости тепловой энергии для потребителей, что является мощным аргументом в пользу их внедрения.

Вызовы и Ограничения Городского Внедрения

Несмотря на очевидные преимущества, внедрение геотермальных систем в городской среде сталкивается с рядом уникальных технических и геологических вызовов.

Проблема Теплового Взаимовлияния: В условиях высокой плотности застройки скважины, расположенные слишком близко друг к другу, могут испытывать тепловое взаимодействие. При постоянном отборе тепла в зимний период или постоянном сбросе тепла в летний период происходит постепенное охлаждение или нагревание окружающего грунта, что со временем снижает эффективность работы тепловых насосов.

Это явление называется тепловым дрейфом или тепловым "засорением" и требует тщательного геологического и теплофизического моделирования при проектировании. Необходим строгий контроль над плотностью скважин и их конфигурацией, чтобы обеспечить тепловой баланс в долгосрочной перспективе.

Ограничения Бурения и Геологическая Сложность: Процесс бурения в плотной городской застройке сложен из-за наличия подземных коммуникаций, фундаментов и археологических зон. Требуется детальное трехмерное картирование подземного пространства перед началом работ. Кроме того, геологические условия в городе могут быть неоднородными: наличие скальных пород или высокий уровень грунтовых вод может усложнить или удорожить бурение. В некоторых случаях отсутствие достаточных знаний о геологической структуре и теплопроводности грунтов на большой глубине является существенным риском, требующим проведения предварительных дорогостоящих изысканий.

Правовые и Регуляторные Барьеры: Внедрение геотермальных систем часто сдерживается устаревшими строительными нормами, отсутствием четких правил лицензирования на бурение скважин и сложностью получения разрешений на использование подземных ресурсов. Необходима гармонизация законодательства и создание унифицированных городских стандартов для геотермальных установок, чтобы стимулировать частные инвестиции.

Заключение

Геотермальная энергия, особенно в виде низкотемпературных систем с грунтовыми тепловыми насосами, представляет собой один из наиболее перспективных и устойчивых путей обеспечения энергетических потребностей плотной городской застройки. Эти системы обеспечивают эффективное круглогодичное отопление и охлаждение с минимальными выбросами, способствуя децентрализации и повышению энергетической безопасности. Однако их успешное внедрение в условиях города критически зависит от преодоления уникальных вызовов, таких как тепловое взаимовлияние скважин и ограничения по площади бурения. Для реализации потенциала геотермии необходимо комплексное городское планирование подземного пространства, точное геологическое моделирование и разработка гибких регуляторных механизмов, которые позволят интегрировать эту чистую технологию в каждый новый строительный проект.

Литература

1. Lund, J. W., Boyd, T. L. *Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review*. Geothermics, 2020.
2. Rybach, L. *Geothermal energy: sustainability and the environment*. Geothermics, 2007.

3. Clauser, C., Goetzl, L. *Heat conduction in the lithosphere: the impact of thermal properties on the subsurface temperature distribution*. Earth and Planetary Science Letters, 2002.
4. Sanner, B., Karytsas, C., M. L. *Borehole heat exchangers and ground source heat pump systems*. Geo-Engineering, 2005.
5. Wang, R., Li, Y., Wu, X., Li, X. *Review of geothermal heat pump systems in high-rise buildings*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018.
6. Новиков, С. В. *Тепловые насосы в системах отопления и горячего водоснабжения*. Энергоатомиздат, 2023.
7. Захаров, И. П., Рыбин, Г. К. *Геотермальное теплоснабжение городских территорий*. Известия вузов. Строительство, 2024.