РАЗДЕЛ VI. ТЕХНОЛОГИИ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

CHAPTER VI. TECHNOLOGIES FOR DECENTRALIZED GEOTHERMAL ENERGY

УДК 556.3+536.7

Передовые технологии использования тепла Земли

С.Л. Елистратов

[1]*Институт теплофизики им.С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*
elistratov@itp.nsc.ru
[2]*Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия*
[3]*Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга, Петропавловск-Камчатский, Россия*

Представлены передовые технологии двух взаимосвязанных направлений развития геотермальной энергетики: добычи геотермальных ресурсов широкого температурного потенциала и технологий их практического использования в теплоэнергетических целях.

Advanced Technologies for Harnessing Earth's Heat

Sergey L. Elistratov

[1]*S.S. Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia*
elistratov@itp.nsc.ru
[2]*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*
[3]*Vitus Bering Kamchatka State University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

Advanced technologies of two interrelated directions of geothermal energy development are presented: extraction of geothermal resources of wide temperature potential and technologies of their practical use for heat and power engineering purposes.

Передовые технологии использования тепла Земли решают разные задачи: от прямого отопления домов до масштабной выработки электричества. В целом тренд их развития направлен на более универсальное использование тепла Земли, преодоление локальности подземных тепловых ресурсов, снижение стоимости и расширение географии применения. Развитие крупных геотермальных электростанций и микрогеотермальных систем может обеспечить энергетическую независимость многих регионов, а также сократить выбросы вредных веществ парниковых газов. Уже сейчас существуют технологии, позволяющие генерировать энергию из тепла земных недр даже там, где отсутствуют залежи термальных вод.

Первостепенное значение имеют технологии извлечения и доставки тепловой энергии для наземного использования в теплоэнергетических установках. Современная геотермальная энергетика имеет высокие затраты на строительство и эксплуатацию геотермальных систем, а также ограниченность месторождений воды с высокой температурой. Бурение новых скважин сопряжено с большими капитальными затратами, составляющими более 50% стоимости ГеоЭС. По этой причине в качестве практической альтернативы рассматриваются уже пробуренные критически *обводненные нефтегазовые скважины* [1]. Наличие уже готовой инфраструктуры делает их применение весьма привлекательным для создания локальных инвестиционно привлекательных геотермальных энерго- и теплоисточников.

В последние годы обозначился тренд на использование *усовершенствованных геотермальных систем* (*Enhanced Geothermal Systems, EGS),* формирующих искусственные резервуары в горячих сухих породах, в т.ч. за счет гидроразрыва пласта как в нефтегазовой отрасли для увеличения площади контакта закачиваемой воды с высоконагретыми горными

породами. Главное преимущество EGS – возможность использовать глубинное тепло практически в любом регионе, а не только там, где есть естественные горячие водоносные горизонты. Технология позволяет работать с «сухими» горячими породами за счёт искусственного создания проницаемости (например, гидроразрывом) и организации циркуляции теплоносителя между нагнетательной и добычной скважинами. Это резко увеличивает потенциально доступный ресурсный фонд: по оценкам, запасы тепла в сухих породах на глубинах до 10 км многократно превышают текущие мировые энергопотребности. Перспективной областью применения EGS является петротермальная энергетика, которая фокусируется на глубинных сухих горячих породах, где температура может достигать +350 ℃ и более. Это позволяет извлекать на поверхность водяной пар сверхкритических параметров для выработки электроэнергии с КПД ≥60%. У *сверхкритических технологий* в геотермальной энергетике большой потенциал применения. В сверхкритическом состоянии: при температуре более 374 ℃ и давлении свыше 22.1 МПа, − у воды чрезвычайно высокий эксергетический потенциал, позволяющий на одной пробуренной скважине создавать ГеоЭС мегаваттного класса.

Для достижения глубин до 15 км и более рассматриваются технологии *сверхглубокого бурения* на основе мегаваттных гиротронов российского производства. Это открывает доступ к огромным запасам тепла, которые раньше были недоступны. Фирма Quaise Energy уже приступила к реализации этой технологии, где для разрушения твердых скальных пород на большой глубине используют не механическое долото, а миллиметровые волны. инициируемые в зоне контакта с горными породами мощным гиротороном. Излучение нагревает породу до нескольких тысяч градусов, а продуты ее испарения под давлением удаляются на поверхность, попутно формируя стеклообразную стенку скважины. Это решает проблему износа оборудования в твёрдых и очень горячих породах и потенциально открывает доступ к сверхгорячим слоям Земли. Имеются реальные примеры исследований и пилотных проектов. Например, согласно исландской программе Iceland Deep Drilling Project (IDDP) уже пробурены скважины в зоне вулкана Крафла и получен флюид с температура свыше 450 ℃, а в Китае в 2026 году запустили демонстрационный проект с замкнутым циклом на сверхкритическом CO_2.Перспективным решением для замкнутых циклов при освоении неглубоко залегающих подземных источников тепла может рассматриваться использование вместо воды *сверхкритического углекислого газа* CO_2 (критические параметры: 31.1 ℃ и 7.39 МПа). Как теплоноситель CO_2 обладает существенно меньшей вязкостью, что снижает потери при прокачке, повышает теплоотдачу и уменьшает энергопотребление на единицу утилизируемой тепловой энергии. В настоящее время также признано целесообразным совмещать добычу тепловой энергии с извлечением ценных компонентов, например лития, из геотермальных рассолов.

В перечень наземного оборудования входят геотермальные парокомпрессионные и абсорбционные тепловые насосы, энергетические установки на водяных и органических циклах Ренкина, гибридные энергосистемы с использованием теплоты сжигания водорода для перегрева водяного пара перед турбиной, а также комбинированные системы с накопителями электроэнергии.

Геотермальные тепловые насосы используют широко распространенные источники низкопотенциального (до 40 ℃) тепла верхних слоев грунта, грунтовых и артезианских вод для отопления и горячего водоснабжения. Один и тот же агрегат решает сразу несколько задач: отопления зимой, охлаждения летом (работает в режиме реверса как кондиционер) и нагрев горячей воды круглогодично. Это снижает общее количество оборудования и упрощает инженерные системы, что важно при проектировании и оценке жизненного цикла теплонасосных технологий. Современные модели геотермальных насосов, особенно их высокотемпературные модификации [2], используют в качестве рабочих тел вещества природного происхождения (CO_2, аммиак, изобутан и др.) с низким потенциалом глобального потепления, что соответствует мировому тренду на декарбонизацию. В качестве

перспективных для геотермального теплоснабжения рассматриваются абсорбционные тепловые насосы повышающего типа, способные трансформировать до половины некондиционного для теплоснабжения тепла воды низкотемпературных (40–45 °С) геотермальных скважин до уровня 60–75 °С для целей отопления и ГВС с предельно минимальными затратами 35–40 кВт электроэнергии на выработку 1.0 МВт тепла [3].

Бинарные энергетические установки, использующие для своей работы органические циклы Ренкина, позволяют эффективно генерировать электроэнергию на базе геотермальных источников с температурой 80–120 °С. Это принципиально расширяет базу полезно используемых геотермальных ресурсов: можно использовать не только высокотемпературные пароводяные смеси, но и тёплые воды. Их удобно также интегрировать в действующие ГеоЭС в качестве вторичного утилизационного контура, например, использовать тепло отсепарированной воды после основной паровой турбины. Это в итоге повышает общий КПД станции и увеличивает глубину полезной утилизации тепла геотермальных источников.

Новое решение в геотермальной энергетике – автоматизированные геотермальные теплоэнергетические комплексы (АГТЭК), – сочетают работу бинарных энергоустановок с накопителями электроэнергии и тепловыми насосами различных типов, оптимальным образом обеспечивая потребности потребителей в электроэнергии, теплоте и холоде (процесс тригенерации). Эта технология расширяет возможности создания децентрализованных систем жизнеобеспечения на базе геотермальных источников.

Работа выполнена при поддержке проекта FZSS-2025-0008 «Исследования и моделирование жизненного цикла объектов возобновляемой энергетики на территории Камчатского края».

Список литературы

1. *Елистратов С.Л.* Геотермальная энергия: настоящее и будущее. Вектор на Татарстан / *С.Л. Елистратов, С.В. Алексеенко, С.Р. Сверчков* // Наука и технологии Сибири. 2025. № 4 (19). С. 92–107.

2. *Елистратов С.Л.* Высокотемпературные тепловые насосы // В книге «Десять прорывных идей в энергетике на ближайшие десять лет» // Глобальная энергетическая ассоциация по развития международных исследований и проектов в области энергетики. 2021. С. 85–99.

3. *Алексеенко С.В.* Оценка эффективности применения абсорбционных тепловых насосов повышающего типа для теплоснабжения на основе среднетемпературных геотермальных источников / *С.В. Алексеенко, Д.Г. Мухин, К.И. Степанов, С.Л. Елистратов, Н.В. Миронова* // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2023. № 3 (60). С. 46–55. DOI: 10.17212/1727-2769-2023-3-46-58.