

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 504.(054+058)/662.99

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

© 2021 г. С. В. Черкасов^{1,*}, А. М. Фархутдинов², И. М. Фархутдинов¹

¹ ФГБУН Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского РАН,
ул. Моховая, д. 11, стр. 11, Москва, 125009 Россия

² ФГБОУ Башкирский государственный университет, ул. Заки Валиди, д. 32, Уфа, 450076, Россия

*E-mail: s.cherkasov@sgm.ru

Поступила в редакцию 07.12.2020 г.

После доработки 11.01.2021 г.

Принята к публикации 20.01.2021 г.

Геоэкологические аспекты геотермальной энергетики связаны с существующими технологиями использования тепла Земли, как прямого (использование теплоэнергетических вод для получения тепловой энергии — гидротермальные системы), так и с производством электроэнергии (искусственные/усовершенствованные геотермальные системы — Enhanced geothermal system (EGS) и геотермальные системы на природных пароводяных смесях, петро- и гидротермальные системы, соответственно). С позиций геоэкологии рассматриваются преимущества использования геотермальных ресурсов по сравнению с другими источниками энергии, а также геоэкологические риски, связанные с эксплуатацией геотермальных природно-техногенных систем. На качественном уровне анализируется вероятность негативного воздействия объектов геотермальной энергетики на окружающую среду в результате возможного химического загрязнения при утечках на поверхности минерализованных подземных вод, техногенного нарушения гидродинамического равновесия резервуара теплоэнергетических вод и его истощения, а также — понижения температуры подземных вод в результате обратной закачки охлажденного теплоносителя. Минимизация перечисленных рисков осуществляется посредством полной обратной закачки и мониторинга утечек теплоносителя, мониторинга микросейсмической активности в районе эксплуатации петротермальных ресурсов, прогнозированием негативных процессов методами математического моделирования и оптимизацией циркуляционных систем теплоотбора. Рассматривается опыт минимизации геоэкологических рисков на предпроектной стадии создания Ханкальской опытно-промышленной геотермальной станции. На основе качественного анализа геоэкологических рисков геотермальной энергетики и существующих технологий теплоотбора делается вывод о преимуществе гидротермальных природно-техногенных систем перед петротермальными при современном уровне развития технологий бурения и теплоотбора. Устанавливается, что месторождения теплоэнергетических вод при полной обратной закачке отработанного флюида являются наиболее экологически чистым возобновляемым источником энергии, не зависящим от погодных условий. Отмечается, что технологии, разрабатываемые для гидротермальных природно-техногенных систем, создают основу как для повышения эффективности гидротермальной, так и для развития петротермальной энергетики.

Ключевые слова: геоэкологические риски, геотермальные подземные воды, геотермальные ресурсы, гидротермальные ресурсы, возобновляемая энергетика

DOI: 10.31857/S0869780921020028

ВВЕДЕНИЕ

Геотермальная энергетика представляет собой одну из наиболее экологически чистых отраслей энергетики, а среди возобновляемых источников энергии геотермальные ресурсы выделяются отсутствием зависимости от погодных факторов. Технологии извлечения глубинного тепла Земли на поверхность основаны на транспорте по скважинам разогретого теплоносителя, в качестве которого могут выступать как природные подземные термальные воды или пароводяные смеси (гидротермальные ресурсы), так и флюид, закачиваемый в область развития горячих сухих пород

для использования петротермальных ресурсов. Любая реализация этих технологий представляет собой сложную природно-техногенную систему, в которую входит природный или искусственный резервуар и, в общем случае, — система водозаборных и нагнетательных скважин, насосное и теплообменное оборудование. Многие исследователи относят к геотермальной энергетике технологии тепловых насосов, но эти технологии относятся, скорее, к энергосберегающим, поскольку не производят энергию как таковую, но повышают эффективность отопительных систем. Данная работа ограничивается рассмотрением

Таблица 1. Характеристика геотермальных ресурсов по использованию в энергетике

Использование	Вид ресурсов	Теплоноситель	Температура теплоносителя, °C
Прямое	Гидротермальные	Вода	50–95
Бинарные технологии		Пароводяная смесь	95–150
Производство электроэнергии	Гидро- и петротермальные	Пар	Более 150

геоэкологических аспектов петро- и гидротермальных природно-техногенных систем. При этом решаются задачи сравнения с позиций геоэкологии как геотермальной энергетики с другими отраслями энергетики, так и петротермальных систем с гидротермальными.

Вопросы взаимодействия геотермальных природно-техногенных систем с окружающей средой широко обсуждаются в литературе, однако авторы редко пытаются оценить геоэкологические аспекты геотермальной энергетики в целом [13, 14], и публикации касаются, как правило, частных вопросов, например, вопросов наведенной сейсмичности для петротермальных систем [11]. Приведенный ниже сравнительный анализ геоэкологических рисков обеспечивает определение приоритетных направлений развития геотермальной энергетики.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫХ СИСТЕМ

Энергетические геотермальные ресурсы по способу их использования делятся на три основных класса: ресурсы для прямого использования теплоэнергетических вод с целью получения тепловой энергии, пригодной для целей отопления; ресурсы, позволяющие использовать бинарные технологии (система Калины и органический цикл Ренкина) производства электроэнергии; ресурсы, обеспечивающие производство электроэнергии с использованием паровой турбины и электрогенератора (табл. 1).

Собственно геотермальные природно-техногенные системы решают задачу транспортировки флюида из природного или искусственного резервуара на поверхность, а также, для петротермальных систем и гидротермальных с обратной закачкой – задачу закачки флюида в резервуар. Таким образом, в настоящее время в практике геотермальной энергетики используются три типа природно-техногенных систем:

- 1) гидротермальные без обратной закачки;
- 2) гидротермальные с обратной закачкой;
- 3) петротермальные.

Согласно российской классификации, гидротермальные ресурсы представлены месторожде-

ниями теплоэнергетических вод – частный случай месторождений подземных вод, определяемых как пространственно ограниченная часть водоносной системы, в пределах которой под влиянием комплекса геолого-экономических факторов создаются благоприятные условия для отбора подземных вод в количестве, достаточном для их целевого использования.

На сегодняшний день в Российской Федерации разведано 66 гидротермальных месторождений, запасы термальных вод и пара которых оцениваются в 307 тыс. м³/сут и 40.7 тыс. м³/сут соответственно, но только 50% из этих запасов используется для производства 1.5 млн гигакалорий тепла, что эквивалентно сжиганию около 300 тыс. т условного топлива [2].

Последние исследования позволили в глобальном масштабе провести анализ перспективности территорий на прямое использование гидротермальных ресурсов [19]. При анализе рассматривались: мощность осадочного чехла, как индикатор вероятности существования резервуара подземных вод; температурный градиент, определяющий глубину локализации гидротермальных ресурсов, и потенциальный спрос на обогрев или охлаждение жилых и производственных (в частности – тепличных) помещений. В результате исследований построены карты технической возможности прямого использования гидротермальных ресурсов в различных целях. Также установлено, что в настоящий момент эти возможности используются менее чем на 0.1%.

Петротермальные ресурсы имеются в любой точке планеты, поскольку температура горных пород растет с глубиной, однако возможность их использования при существующих технологиях теплоотбора осложняется, во-первых, необходимостью глубокого бурения для достижения комплексов горных пород с температурой более 220–250°C, и во-вторых – сложностью прогноза характеристик искусственного резервуара на этих глубинах.

Реальных работ по использованию петротермальных ресурсов в Российской Федерации не ведется, а за рубежом такие работы наиболее развиты в Австралии [18], США [25] и Франции [21], носят экспериментальный и опытно-промышленный характер.

Таблица 2. Геоэкологические аспекты энергетики (по источникам энергии)

Источ- ник энер- гии		Горючие материалы			Атом	Солнце	Вода		Ветер	Геотермы	
		Водород	Угле- водо- роды	Другие			Поток	Прилив		Теплоэнер- гетические воды	Тепло горных пород
Преобразование	1) в утилизируемое тепло	Реакции окисления			Ядерные реакции	Нагрева- ние теп- лоноси- теля	—		—	Прямое использо- вание	Прокачка теплоно- сителя через искус- ственный резервуар
	2) в электроэнергию	Паровая турбина и электрогенератор				Фото- электри- ческое преобра- зование	Кинетическая энергия потока, турбина, электро- генератор		Кинети- ческая энергия ветра, элек- трогене- ратор	Паровая турбина или тур- бина бинарной системы и элетроге- нератор	Паровая турбина и электро- генератор
Геоэкологические аспекты		Аспекты, связан- ные с произ- водством водорода	Выделение CO ₂ и других продук- тов горения, воздействие добычи углево- дородов и угля на окружаю- щую среду		Воздействие на окружаю- щую среду добычи и обогащения радиоактив- ного сырья, и утилиза- ции отходов, риски	Произ- водство и утилиза- ция пане- лей	Изменение есте- ственных пото- ков		Измене- ние ланд- шафта	—	Негатив- ные послед- ствия гид- роразрыва

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Любое производство энергии воздействует на окружающую среду (табл. 2). При производстве энергии используются три основные схемы: получение тепловой энергии (реакции окисления, ядерные реакции, нагревание теплоносителя за счет солнечного или геотермального тепла); преобразование тепловой энергии в электрическую с применением турбинного и генераторного оборудования; прямое получение электрической энергии (гидроэлектростанции и ветрогенераторы — посредством преобразования кинетической энергии в электрическую, солнечные панели — посредством фотоэлектрического преобразования энергии фотонов).

При этом возникающие геоэкологические аспекты связаны со следующими процессами:

1) получение энергетического сырья и производство оборудования для получения энергии (добыча и переработка углеводородов и радиоактивного сырья, получение чистого водорода, производство солнечных панелей и т.д.);

2) получение и преобразования энергии (химические и ядерные реакции, изменение физико-химических характеристик природных объектов и процессов, в том числе — водных потоков, ландшафта, массивов горных пород);

3) образование отходов производства энергии (например, продукты сжигания горючих материалов, в том числе — золошлаковые отходы и углекислый газ, отработанное оборудование).

Как видно из табл. 2, только гидротермальная энергетика в целом характеризуется отсутствием явного негативного воздействия на окружающую среду. Тем не менее, и в гидротермальной, и в

большей степени — в петротермальной энергетике существуют геоэкологические риски, которыми нельзя пренебрегать. Эти риски связаны:

- с возможным химическим загрязнением в результате разлива на поверхности подземных вод, часто — минерализованных;

- с техногенным изменением гидродинамического равновесия и, соответственно, поля напряжений как в резервуаре подземных вод, так и в массиве сухих горячих пород при прокачке через них теплоносителя;

- с истощением резервуара и понижением температуры подземных вод в результате обратной закачки охлажденного теплоносителя.

Минимизация перечисленных рисков осуществляется посредством мониторинга утечек теплоносителя, микросейсмической активности в районе эксплуатации петротермальных ресурсов, прогнозированием негативных процессов методами математического моделирования, и оптимизацией циркуляционных систем (ЦС) теплоотбора. На эффективность гидротермальных природно-техногенных систем, кроме этого, могут воздействовать вызванные минерализацией подземных вод процессы коррозии оборудования и осаждения минералов. Воздействие минерализованных вод на оборудование ЦС может регулироваться посредством ввода в ЦС ингибиторов.

Вопрос химического загрязнения территорий связан как с утилизацией отработанных теплоэнергетических вод, так и с их аварийными разливами. Практически полную гарантию отсутствия такого загрязнения дает реализация схемы теплоотбора с полной обратной закачкой отработанных вод. Такая схема представляет собой первичный контур геотермальной станции и предусматривает создание “дублетной” циркуляционной системы, в которую входят, в общем случае, сеть водозаборных и нагнетательных скважин, насосное оборудование, обеспечивающее стабильный дебит системы и обратную закачку, и теплообменник, передающий тепло во вторичный (потребительский) контур.

На практике проблема решается по-разному. В большинстве европейских стран обратная закачка является обязательной для геотермальных проектов. Так, во Франции, где около 500 тысяч жителей Парижского региона обеспечены геотермальным отоплением, все (более 25) тепловые станции построены по “дублетной” схеме (одна водозаборная и одна нагнетательная скважина). Однако таких требований нет в законодательствах, например, Исландии и Китая. В Исландии в течение долгого времени считалось, что при низкой минерализации термальных вод и покрывающей их расход подпитке, обратная закачка не требуется [10]. Работы по закачке начались в этой

стране только в начале XXI в., и до сих пор значительная доля отработанных вод сливается в океан.

В Российской Федерации требования к обратной закачке отработанного флюида практически отсутствуют, причем нормативными документами допускается сброс отработанных вод на рельеф [4], а критерии необходимости обратной закачки не определены. Более того, в государственном стандарте РФ “Геотермальная энергетика” полностью отсутствует понятие обратной закачки [3].

Обратная закачка решает проблему химического загрязнения при работе геотермальных установок, но минерализация термальных вод влияет и на оборудование станций. Высокотемпературные минерализованные растворы вызывают коррозию скважинного, насосного, трубопроводного и теплообменного оборудования, а низкотемпературные — осаждение минералов на стенках оборудования [9]. На рис. 1 показаны результаты коррозии устьевого оборудования на одной из старых скважин Ханкальского месторождения теплоэнергетических вод.

Проблема минерализации решается вводом ингибиторов, замедляющих коррозию, на призабойную зону водозаборной скважины [22], и ингибиторов, препятствующих осаждению минералов — в циркуляционную систему после теплообменника [26].

При эксплуатации гидротермальных систем встречаются проблемы с эмиссией сероводорода, метана, и углекислого газа при дегазации теплоносителя на поверхности [17], однако они полностью решаются при обеспечении герметичности наземного оборудования первичного контура ЦС.

В мировой практике исследовались риски, связанные с присутствием радиоактивных газов в природных термальных водах [23, 24] и в теплоносителе петротермальных систем [12], но на настоящий момент примеры сколько-нибудь опасного содержания радиоактивных элементов неизвестны.

Петротермальная энергетика, с точки зрения геоэкологии, характеризуется рисками, связанными с наведенной сейсмичностью при стимуляции искусственного резервуара в результате гидродинамического и температурного воздействия на поле напряжений в массиве пород [20].

Так, петротермальный проект в Базеле, Швейцария, был закрыт после того, как при стимуляции резервуара на глубине около 5 км в период с декабря 2006 г. по март 2007 г. было зарегистрировано около 200 сейсмических колебаний с амплитудой от 0.7 до 3.4 балла, все — с эпицентрами в радиусе 1 км от забоя нагнетательной скважины [11].

Работы по минимизации наведенной сейсмичности проводятся во всем мире, наиболее представительные результаты в этом направлении получены в рамках проекта по искусствен-



Рис. 1. Влияние минерализации теплоэнергетических вод на оборудование геотермальной станции. Скважина № 27–32 Ханкальского месторождения, Чеченская Республика.

ным геотермальным системам в Сольце (Soultz-sous-Forêts), Франция, где с 1988 по 2007 г. 15 раз проводилась стимуляция трех искусственных резервуаров [21]. Также появляются успехи в изучении механизма наведенной сейсмичности с использованием математического моделирования [20].

В табл. 3 сведены геоэкологические риски геотермальной энергетики и способы их минимизации. Из таблицы видно, что самой низкой вероятностью реализации геоэкологических рисков характеризуются гидротермальные природно-

техногенные системы с обратной закачкой теплоносителя. При этом риски возможного влияния химического состава природных подземных вод на оборудование и окружающую среду относительно легко поддаются минимизации: в настоящее время разработаны и успешно используются технологии борьбы с коррозией оборудования и осаждением минералов. Математическое моделирование температурного режима резервуара позволяет при проектировании системы определить оптимальное расстояние между забоями скважин и режим работы циркуляционной систе-

Таблица 3. Вероятность реализации геоэкологических рисков использования геотермальных ресурсов и способы ее минимизации

Ресурсы Риски	Гидротермальные		Петротермальные	Способы минимизации рисков
	без обратной закачки	с обратной закачкой		
Химическое загрязнение на поверхности	средняя	низкая	низкая	Теплоотбор с полной обратной закачкой теплоносителя, мониторинг исправности оборудования
Коррозия оборудования и осаждение минералов	средняя	средняя	низкая	Ввод ингибиторов, замедляющих коррозию и осаждение минералов
Выбросы CO ₂ , метана и других газов	средняя	низкая	низкая	Герметичность первичного контура при полной обратной закачке теплоносителя
Истощение резервуара или понижение температуры теплоносителя	средняя	низкая	низкая	Математическое моделирование изменения свойств резервуара и оптимизация режима работы циркуляционной системы
Наведенная сейсмичность	низкая	низкая	высокая	Мониторинг наведенной сейсмической активности и оптимизация режима работы циркуляционной системы

мы, обеспечивающие необходимый срок службы станции [16]. Остальные значимые риски гидротермальных систем связаны только с возможными неисправностями оборудования и практически полностью элиминируются при корректном проектировании систем контроля и управления геотермальной станции. Для минимизации геоэкологических рисков в масштабе месторождения теплоэнергетических вод, для разработки которого может использоваться несколько гидротермальных природно-техногенных систем, необходима организация мониторинга эксплуатации месторождения, например — с использованием инфракрасной аэросъемки [15].

МИНИМИЗАЦИЯ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ НА ПРИМЕРЕ ХАНКАЛЬСКОЙ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОЙ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ТЕПЛОВОЙ СТАНЦИИ

Задачи минимизации геоэкологических рисков решались, в основном, на предпроектной стадии создания опытно-промышленной станции и включали в себя:

- выбор типа гидротермальной природно-техногенной системы (изначально определен как дублетный с полной обратной закачкой),
- выбор продуктивного пласта,
- локализацию дублетной системы на месторождении,
- определение значимых геоэкологических рисков и способов их минимизации с учетом геологических, гидрогеологических, гидродинамических и теплофизических параметров Ханкальского месторождения теплоэнергетических вод.

Ханкальское месторождение теплоэнергетических вод представляет собой часть Восточно-Предкавказского артезианского бассейна, который является гидрогеологической структурой II порядка площадью 250 тыс. км². В пределах бассейна на территории Ханкальского месторождения выделяется 23 песчаных пласта, из которых 10 приурочены к отложениям чокракского возраста, 13 — караганского (средний миоцен) [7].

Выбор типа гидротермальной природно-техногенной системы определен, исходя из необходимости минимизации геоэкологических рисков. На основе анализа французского опыта использования термальных подземных вод [5] (близкий по параметрам с Восточно-Предкавказским Парижский артезианский бассейн разрабатывается уже более 50 лет) выбран дублетный тип циркуляционной системы с полной обратной закачкой флюида в резервуар.

Для выбора продуктивного ресурса дублетной ЦС на Ханкальском месторождении рассматривались несколько вариантов. Наиболее благоприятными для реализации циркуляционной схемы

теплоотбора являются имеющие максимальный дебит при самоизливе и наилучшие фильтрационные параметры продуктивные пласты IV–VII, XIII, XVI и XXII. Поскольку добыча воды из XXII пласта запрещена Госгортехнадзором для защиты Серноводских источников от истощения, при выборе продуктивного пласта рассматривались только пласты IV–VII, XIII и XVI.

XIII пласт караганского горизонта — один из самых продуктивных на территории Ханкальского месторождения термальных подземных вод с довольно выдержанной по площади мощностью (в среднем 47 м) и низкой минерализацией (0.7–1.8 г/л). Наряду с гидрогеологическими характеристиками выбор XIII пласта обусловлен наличием сравнительно большого количества данных, позволивших включить его в 3D-геологическую модель Ханкальского месторождения, а также положительным опытом обратной закачки вод в пласт в 1980-е годы [1].

XIII пласт в пределах Ханкальского месторождения теплоэнергетических вод расположен на глубине 750–900 м благодаря антиклинальной складке, погружающейся в юго-восточном направлении и двум взбросам, формирующим дислокацию типа горст, севернее и южнее которых продуктивные пласты погружаются на большие глубины (до 2500–3000 м). Определение положения водозаборной и нагнетательной скважин на основе построенной трехмерной геологической модели месторождения производится таким образом, чтобы, с одной стороны, глубина скважин была минимальной, т.е. скважины расположены в ядре складки, а с другой — чтобы забои скважин располагались на максимально возможном удалении от взбросов (на рис. 2 — Разлом 1 и Разлом 2).

На предпроектной стадии также было установлено, что благодаря низкой минерализации теплоэнергетических вод XIII пласта принятие дополнительных мер борьбы с рисками коррозии оборудования и осаднения минералов не требуется.

Для предотвращения температурной деградации резервуара и на предпроектной стадии работ, и в процессе эксплуатации Ханкальской опытно-промышленной геотермальной станции осуществлялся прогноз изменений температурного режима на забое водозаборной скважины. Методами математического моделирования также оценивалось влияние на изменение температуры таких параметров как: дистанция между забоями продуктивной и нагнетательной скважин, общий региональный поток подземных вод, возможная непроницаемость разломов [16, 6].

Кроме этого, выполнено моделирование использования эффекта остаточного дебита [8], когда при отключенном насосном оборудовании циркуляция воды продолжается. Результат моделирования показывает (рис. 3), что если при

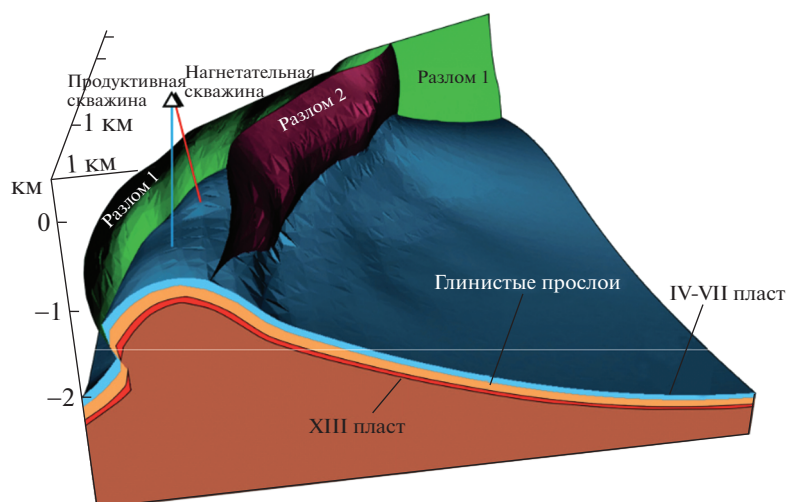


Рис. 2. Выбор положения водозаборной (продуктивной) и нагнетательной скважин с использованием построенной 3-мерной геологической модели Ханкальского месторождения теплоэнергетических вод.

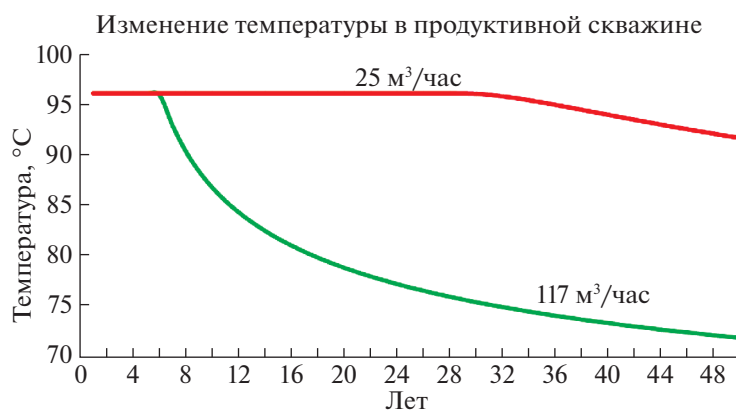


Рис. 3. Изменение температуры на забое продуктивной скважины для принудительной (нижняя линия) и самопроизвольной (верхняя линия) циркуляции.

принудительном дебите ГЦС через 15 лет эксплуатации температура флюида в зоне забоя продуктивной скважины понижается на 15°C, то при использовании эффекта остаточного дебита, когда самопроизвольная циркуляция составляет 25 м³/час, незначительное снижение температуры начинает наблюдаться только через 30 лет эксплуатации.

Тепловая мощность станции составляет до 10 МВт и до 1.3 МВт для принудительной и самопроизвольной циркуляции соответственно. При этом для принудительной циркуляции необходима работа нагнетательного насоса мощностью 250 Вт, что эквивалентно примерно 3 МВт тепловой мощности, если производить электроэнергию с использованием бинарной установки на флюиде Ханкальской станции. Также необходимо учитывать, что при принудительной циркуля-

ции за 15 лет тепловая мощность Ханкальской станции понизится на 16–18%.

Таким образом, эффективная тепловая мощность (за вычетом мощности, расходуемой на принудительную циркуляцию) изменяется от 7 до 1.3 МВт в зависимости от режима работы ГЦС, и управление режимом может осуществляться в соответствии с потребностью в тепловой энергии.

Таким образом, основные геоэкологические риски минимизируются на предпроектной стадии создания объекта геотермальной энергетики, и в дальнейшем сводятся к вопросам исправности оборудования геотермальной станции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Геотермальные ресурсы представляют собой наиболее экологически чистый неиссякаемый

источник энергии, не зависящий от климатических факторов. Тем не менее, для разных типов геотермальных природно-техногенных систем характерны различные геоэкологические риски, которые необходимо учитывать при создании и эксплуатации геотермальных станций.

Основными геоэкологическими рисками в геотермальной энергетике являются: для гидротермальных систем — риски, связанные с минерализацией теплоэнергетических вод, а для петротермальных — риски наведенной сейсмичности при стимуляции и эксплуатации искусственного резервуара.

Риски гидротермальных систем минимизируются и практически полностью исключаются при исправном оборудовании станций за счет обратной закачки (исключаются разливы теплоносителя на поверхности) и ввода ингибиторов, нейтрализующих компоненты теплоносителя, негативно влияющих на оборудование геотермальных станций.

Для петротермальных систем минимизация рисков наведенной сейсмичности осуществляется при помощи математического моделирования и последующего подбора наиболее безопасного режима эксплуатации, полное исключение этих рисков невозможно.

Анализ геоэкологических аспектов геотермальной энергетики демонстрирует (при современном уровне развития технологий теплоотбора) преимущества гидротермальных природно-техногенных систем с обратной закачкой флюида как перед гидротермальными системами без обратной закачки, так и перед петротермальными системами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аветисянц А.А., Крылов В.Б.* Опыт строительства циркуляционной системы на Ханкальском геотермальном месторождении // Физические процессы при разработке геотермальных месторождений. Л.: ЛГИ, 1983. С. 85–88.
2. *Алхасов А.Б.* Возобновляемая энергетика. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. 256 с.
3. ГОСТ Р 56909-2016. Нетрадиционные технологии. Геотермальная энергетика. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2016. 12 с.
4. Правила разработки месторождений теплоэнергетических вод ПБ 07-599-03. М.: Государственное унитарное предприятие “Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России”, 2003. 8 с.
5. *Фархутдинов А.М., Исмаилов Р.А., Фархутдинов И.М., Черкасов С.В., Минцаев М.Ш.* Перспективы использования теплоэнергетических вод Чеченской республики на базе опыта аналогичных работ во Франции (Парижский бассейн) // Вестник Томского государственного университета. 2015. № 398. С. 257–264.
6. *Фархутдинов А.М., Фархутдинов И.М., Черкасов С.В., Исмаилов Р.А., Хайрулина Л.А.* Применение компьютерного моделирования для устойчивой эксплуатации термальных подземных вод Ханкальского месторождения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 12. С. 7–17.
7. *Фархутдинов А.М., Черкасов С.В., Минцаев М.Ш., Шаипов А.А.* Термальные подземные воды Чеченской Республики: новый этап использования // Природа. 2017. № 3 (1219). С. 28–35.
8. *Черкасов С.В., Фархутдинов А.М., Шаипов А.А.* Об эффекте остаточного дебита геотермальной циркуляционной системы теплоотбора // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки, 2020. Т. 491. С. 90–92.
9. *Черкасов С.В., Чурикова Т.Г., Бекмурзаева Л.Р., Гордейчик Б.Н., Фархутдинов А.М.* Состояние и перспективы использования геотермальных ресурсов в Российской Федерации / GEOENERGY. Матер. Междунар. научно-практ. конференции. Грозный: Изд-во ГГНТУ, 2015. С. 303–322.
10. *Axelsson G.* Role and management of geothermal reinjection. Short Course on Geothermal Development and Geothermal Wells. Santa Tecla, Salvador: UNU-GTP. 2012. 21 p.
11. *Baisch S., Carbon D., Dannwolf U., Delacou B., Devaux M., et al.* Deep Heat Mining Basel – Seismic Risk Analysis. Basel: SERIANEX, 2009. 21 p.
12. *Battye D.L., Ashman P.J.* Radiation associated with Hot Rock geothermal power. Australian Geothermal Energy Conference, 2009. https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/AGEC/2009/Battye_Ashman_2009.pdf
13. *Bošnjaković M., Stojkov M., Jurjević M.* Environmental Impact of Geothermal Power Plants // Technical Gazette. 2019. V. 26 (5). P. 1515–1522. <https://doi.org/10.17559/TV-20180829122640>
14. *Brown K., Webster-Brown J.* Environmental impacts and mitigation. In Geothermal energy: utilization and technology. Dickson M.H., Fanelli M. (ed.) Routledge. 2013. P. 155–171. <https://doi.org/10.4324/9781315065786>
15. *Cherkasov S.V., Farkhutdinov A.M., Rykovanov D.P., Shaipov A.A.* The use of unmanned aerial vehicle for geothermal exploitation monitoring: Khankala field example // J. of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems. 2018. Т. 6. № 2. P. 351–362.
16. *Farkhutdinov A., Goblet P., de Fouquet C., Cherkasov S.* A case study of the modeling of a hydrothermal reservoir: Khankala deposit of geothermal waters // Geothermics. 2016. V. 59. Part A. P. 56–66. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.10.005>
17. *Gunnarsson I., Aradóttir E.S., Sigfússon B., Gunnlaugsson E., Júlíusson B.M.* Geothermal Gas Emission From Hellisheiði and Nesjavellir Power Plants, Iceland // GRC Transactions. 2013. V. 37. P. 785–789.
18. *Holl H.-G.* What did we learn about EGS in the Cooper Basin? Milton, Australia: Geodynamics Limited, 2015. 79 p. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33547.49443>

19. Limberger J., Boxemb T., Pluymaekers M., Bruhn D., Manzella A., et al. Geothermal energy in deep aquifers: a global assessment of the resource base for direct heat utilization // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. № 82. P. 961–975.
20. Parisio F., Vilarrasa V., Wang W., Kolditz O., Nagel Th. The risks of long-term re-injection in supercritical geothermal systems // *Nature Communications*. 2019. V. 10. P. 4391.
<https://doi.org/10.1038/s41467-019-12146-0>
21. Schill E., Genter A., Cuenot N., Kohl T. Hydraulic performance history at the Soultz EGS reservoirs from stimulation and long-term circulation tests // *Geothermics*. 2017. V. 7. P. 110–124.
22. Tomarov G., Kolesnikov D., Semenov V., Podverbny V., Shipkov A. Prevention of Corrosion and Scaling in Geothermal Power Plants Equipment // *Proc. World Geothermal Congress 19–25 April 2015*. Melbourne, Australia, 2015, 6 p.
<https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2015/27032.pdf>
23. Vengosh A., Hirschfeld D., Vinson D., Dwyer G., Raanan H., et al. High Naturally Occurring Radioactivity in Fossil Groundwater from the Middle East. *Environ // Sci. Technol.* 2009. V. 43. № 6. P. 1769–1775.
24. Walczak K., Olszewski J., Zmyslony M. Estimate of radon exposure in geothermal SPAs in Poland // *J. of Environmental and Occupational Health*. 2016. V. 29 (1). P. 161–166.
25. Zemach E., Drakos P., Spielman P., Akerley J. Desert Peak East enhanced geothermal systems (EGS) project. Draft Final Report. Reno, NV, USA: Ormat Technologies, Inc. 2017. 87 p.
26. Zotzmann J., Regensburg S. Evaluating the Efficiency of Scaling Inhibitors in Geothermal Fluids at High Pressures and High Temperatures // *Proc. World Geothermal Congress 19–25 April 2015*. Melbourne, Australia, 2015, 5 p.
https://gfzpublic.gfz-potsdam.de/pubman/item/item_1267890

GEOECOLOGICAL ASPECTS OF GEOTHERMAL POWER ENGINEERING

S. V. Cherkasov^{a, #}, A. M. Farkhutdinov^b, and I. M. Farkhutdinov^a

^a Vernadsky State Geological Museum RAS, ul. Mokhovaya, 11, bld. 11, Moscow, 125009 Russia

^b Bashkir State University, ul. Zaki Validi, 32, Ufa, 450076 Russia

[#] E-mail: s.cherkasov@sgm.ru

Geoeological aspects of geothermal power engineering are related to the existing technologies in using the Earth's heat. It is both the direct use (the use of hot groundwater for heat production, i.e., hydrothermal systems), and the production of electricity (enhanced geothermal systems, EGS, as well as geothermal systems based on natural steam-water mixtures, i.e., petro- and hydrothermal systems, respectively). The advantages of using geothermal resources in relation to other energy sources are considered in geoeological respect. Geoeological risks associated with the operation of geothermal natural and man-made systems are considered. These risks are related to possible chemical contamination resulting from the mineralized groundwater spills on the surface, with technological change in hydrodynamic equilibrium, with the depletion of the reservoir and lowering the temperature of underground waters caused by reinjection of the cooled heat-transfer fluid. These risks could be minimized by full reinjection of the used fluid, monitoring of heat-transfer fluid leaks, microseismic activity monitoring in the area of operation of petrothermal resources, predicting negative processes using computer mathematical modeling methods, and optimizing circulation systems for heat extraction. The experience of minimizing geoeological risks by the example of the Khankala experimental industrial geothermal station is considered in the article. The advantage of hydrothermal natural and technogenic systems over petrothermal ones at the current level of development of drilling and heat extraction technologies is proved proceeding from the qualitative analysis of geoeological risks and existing heat extraction technologies. It is determined that the deposits of geothermal water with full reinjection of the used fluid is the most environmentally friendly renewable energy source that does not depend on weather conditions. At the same time, it is noted that the technologies created for hydrothermal natural and human-made systems form the basis for both improving the efficiency of hydrothermal and petrothermal energy development.

Keywords: geoeological risks, geothermal groundwater, geothermal resources, hydrothermal systems, renewable energy

REFERENCES

1. Avetisyan, A.A., Krylov, V.B. *Opyt stroitel'stva tsirkulyatsionnoi sistemy na Khankal'skom geotermal'nom mestorozhdenii* [Experience in the construction of a circulation system at the Khankala geothermal field]. *Fizicheskie protsessy pri razrabotke geotermal'nykh mestorozhdenii* [Physical processes in the exploitation of geothermal deposits]. Leningrad, LGI Publ., 1983, pp. 85–88. (in Russian)
2. Alkhasov, A.B. *Vozobnovlyаемая энергетика* [Renewable energy]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2012, 256 p. (in Russian)
3. *GOST P 56909-2016. Netraditsionnye tekhnologii. Geotermal'naya energetika. Terminy i opredeleniya* [State

- Standard P 56909-2016. Nontraditional technologies. Geothermal energy. Terms and definitions]. Moscow, Standartinform Publ., 2016, 12 p. (in Russian)
4. *Pravila razrabotki mestorozhdenii teploenergeticheskikh vod PB 07-599-03* [Rules for the exploitation of thermal energy water deposits 07-599-03]. Moscow. State unitary enterprise "Scientific and technical center for industrial safety of Gosgortekhnadzor of Russia". 2003, 8 p. (in Russian)
 5. Farkhutdinov, A.M., Ismagilov, R.A., Farkhutdinov, I.M., Cherkasov, S.V., Mintsae, M.Sh. *Perspektivy ispol'zovaniya teploenergeticheskikh vod Chechenskoi Respubliki na baze opyta analogichnykh rabot vo Frantsii (Parizhskii bassein)* [Prospects for the use of geothermal waters of the Chechen Republic on the basis of the experience of similar works in France (Paris basin)]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, no. 398, pp. 257–264. (in Russian)
 6. Farkhutdinov, A.M., Farkhutdinov, I.M., Cherkasov, S.V., Ismagilov, R.A., Khairulina, L.A. *Primenenie komp'yuternogo modelirovaniya dlya ustoichivoi ekspluatatsii termal'nykh podzemnykh vod Khankal'skogo mestorozhdeniya* [Use of computer modeling for sustainable exploitation of the Khankala geothermal water]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*. 2019, vol. 330, no. 12, pp. 7–17. (in Russian)
 7. Farkhutdinov, A.M., Cherkasov, S.V., Mintsae, M.Sh., Shaipov, A.A. *Termal'nye podzemnye vody Chechenskoi Respubliki: novyi etap ispol'zovaniya* [Geothermal waters of the Chechen Republic: a new stage of use]. *Priroda*, 2017, no. 3 (1219), pp. 28–35.
 8. Cherkasov, S.V., Farkhutdinov, A.M., Shaipov, A.A. *Ob effekte ostatochnogo debita geotermal'noi tsirkulyatsionnoi sistemy teplootbora* [On residual flow effect in a geothermal loop]. *Doklady Rossiiskoi Akademii Nauk. Fizika, tekhnicheskie nauki*, 2020, vol. 491, pp. 90–92. (in Russian)
 9. Cherkasov, S.V., Churikova, T.G., Bekmurzaeva, L.R., Gordeichik, B.N., Farkhutdinov, A.M. *Sostoyanie i perspektivy ispol'zovaniya geotermal'nykh resursov v Rossiiskoi Federatsii* [State-of-art and prospects for the use of geothermal resources in the Russian Federation]. *GEOENERGY. Proc. International Scientific and Practical Conference*, 2015, pp. 303–322. (in Russian)
 10. Axelsson, G. Role and management of geothermal re-injection. Short course on geothermal development and geothermal wells. Santa Tecla, Salvador, UNU-GTP Publ., 2012, 21 p.
 11. Baisch, S., Carbon, D., Dannwolf, U., Delacou, B., Devaux, M., Dunand, F., Jung, R., Koller, M., Martin, C., Sartori, M., Secanell, R., Vör, R. Deep heat mining Basel – seismic risk analysis. Basel, SERIANEX Publ., 2009, 21 p.
 12. Battye, D.L., Ashman, P.J. Radiation associated with Hot Rock geothermal power. Australian Geothermal Energy Conference, 2009. https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/AGEC/2009/Battye_Ashman_2009.pdf
 13. Bošnjaković, M., Stojkov, M., Jurjević, M. Environmental impact of geothermal power plants. *Technical Gazette*, 2019, vol. 26 (5), pp. 1515–1522. <https://doi.org/10.17559/TV-20180829122640>
 14. Brown, K., Webster-Brown, J. Environmental impacts and mitigation. In: *Geothermal energy: utilization and technology*. Dickson M.H., Fanelli M. (eds.) Routledge. 2013. P. 155–171. <https://doi.org/10.4324/9781315065786>
 15. Cherkasov, S.V., Farkhutdinov, A.M., Rykovanov, D.P., Shaipov, A.A. The use of unmanned aerial vehicle for geothermal exploitation monitoring: Khankala field example. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 2018, vol. 6, no 2, pp. 351–362.
 16. Farkhutdinov, A., Goblet, P., de Fouquet, C., Cherkasov, S. A case study of the modeling of a hydrothermal reservoir: Khankala deposit of geothermal waters. *Geothermics*, 2016, vol. 59, part A, pp. 56–66. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.10.005>
 17. Gunnarsson, I., Aradóttir, E. S., Sigfússon, B., Gunnlaugsson, E., and Júlíusson, B. M. Geothermal gas emission from Hellisheiði and Nesjavellir power plants, Iceland. *GRC Transactions*. 2013, vol. 37, pp. 785–789.
 18. Holl, H.-G. What did we learn about EGS in the Cooper Basin? Milton, Australia: Geodynamics Limited, 2015, 79 p. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33547.49443>
 19. Limberger, J., Boxemb, T., Pluymaekers, M., Bruhn, D., Manzella, A., Calcagno, P., Beekman, F., Cloetingh, S., Van Wees, J.D. Geothermal energy in deep aquifers: a global assessment of the resource base for direct heat utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018, no. 82, pp. 961–975.
 20. Parisio, F., Vilarrasa, V., Wang, W., Kolditz, O., Nagel, Th. The risks of long-term re-injection in supercritical geothermal systems. *Nature Communications*, 2019, vol. 10, pp. 4391. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12146-0>
 21. Schill, E., Genter, A., Cuenot, N., Kohl, T. Hydraulic performance history at the Soultz EGS reservoirs from stimulation and long-term circulation tests. *Geothermics*, 2017, vol. 7, pp. 110–124.
 22. Tomarov, G., Kolesnikov, D., Semenov, V., Podverbnny, V., Shipkov, A. Prevention of corrosion and scaling in geothermal power plants equipment. *Proc. World Geothermal Congress 19-25 April 2015*. Melbourne, Australia, 2015, 6 p. <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2015/27032.pdf>
 23. Vengosh, A., Hirschfeld, D., Vinson, D., Dwyer, G., Raanan, H., et al. High naturally occurring radioactivity in fossil groundwater from the Middle East. *Environ. Sci. Technol.*, 2009, vol. 43, no. 6, pp. 1769–1775.
 24. Walczak, K., Olszewski, J., Zmyślony, M. Estimate of radon exposure in geothermal SPAs in Poland. *Int J Occup Med Environ Health*. 2016, vol. 29(1), pp. 161–166.
 25. Zemach, E., Drakos, P., Spielman, P., Akerley, J. Desert Peak East enhanced geothermal systems (EGS) project. Draft Final Report. Reno, NV, USA: Ormat Technologies, Inc. 2017, 87 p.
 26. Zotzmann, J., Regenspurg, S. Evaluating the efficiency of scaling inhibitors in geothermal fluids at high pressures and high temperatures. *Proceedings World Geothermal Congress 19–25 April 2015*. Melbourne, Australia, 2015. 5 p. https://gfzpublic.gfz-potsdam.de/pubman/item/item_1267890