

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ ОСВОЕНИИ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ

И.С. Аванесова, Г.Ф. Галстян, Г.С. Акопджанян, У.А. Хачатрян

*Национальный политехнический университет Армении*

Область применения и эффективность использования геотермальных ресурсов того или иного месторождения зависят от его энергетического потенциала, общего запаса и дебита (производительности) буровых скважин, химического состава, минерализации и агрессивности вод, наличия потребителя и его отдаленности, температурного и гидравлического режимов буровых скважин и ряда других факторов. Поэтому эксплуатация геотермальных источников должна базироваться на предварительных геологических исследованиях.

В условиях Армении наиболее перспективными источниками могут быть близ-поверхностные очаги недавних вулканических извержений. Во время разведки были выявлены три перспективных участка в Сюникском вулканическом нагорье. Дальнейшее глубокое изучение дало основание считать эти участки геотермальных полей геотермальными месторождениями.

В настоящее время в нашей стране закартированы и изучены 550 потухших вулканов, очаги которых, по геологическим данным, залегают в пределах нескольких километров от земной поверхности. А вулканические очаги заключают в себе огромные запасы тепловой энергии. Развитие геотермальной энергетики является перспективным направлением, которое может существенно решить вопрос энергетической безопасности Армении. Это единственная технология, с помощью которой возможно обеспечить гарантированное производство электроэнергии, так как источники другой энергии (солнечной, ветряной, регенеративной) носят сезонный характер.

Бурение геотермальных скважин в связи с высокой температурой скважинной среды оказывает влияние на многие технологические процессы.

В статье показаны технологические риски, возникающие при бурении геотермальных скважин, и пути их предотвращения, а также экологические проблемы и меры, которые необходимо предпринять для минимизации негативных последствий.

**Ключевые слова:** геотермальные ресурсы, бурение, температурный фактор, экологические проблемы, тампонажный раствор, высокоингибирующий буровой раствор на водной основе.

**Введение.** Геотермальная энергия – один из немногих возобновляемых источников энергии, способных круглосуточно обеспечивать устойчивое энергоснабжение. При надлежащих условиях геотермальная энергия может

выдерживать экономическую конкуренцию с углем или природным газом. Это означает, что страны, обладающие такими запасами, получают возможность уменьшить свою зависимость от импортируемого топлива и упрочить свою энергетическую безопасность.

Задачи освоения и эффективного использования геотермальной энергии особенно актуальны для Республики Армения ввиду отсутствия собственной топливно-энергетической базы. В условиях Армении наиболее перспективными источниками могут быть близповерхностные очаги недавних вулканических извержений. Во время разведки были выявлены три перспективных участка в Сюникском (Сисианском) вулканическом нагорье. Дальнейшее глубокое изучение дало основание считать эти участки геотермальных полей геотермальными месторождениями. Была пробурена разведочная скважина на участке Джермахпур на глубину 900 м, где зафиксирована температура  $96^{\circ}\text{C}$ . На заданном участке на глубине 1,8...2,5 км расположен магматический очаг, который находится на стадии активности, где ожидается температура  $250\ldots400^{\circ}\text{C}$ . Это подтвердили и проведенные сейсморазведочные работы [1].

При бурении геотермальных скважин (рис. 1) возникают технологические проблемы, связанные с высокой температурой и давлением, агрессивностью подземной среды, которые влияют на выбор бурового оборудования и материалов.

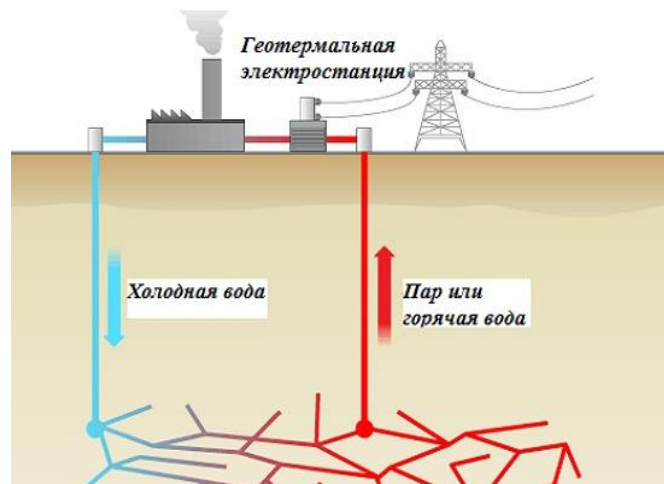


Рис. 1. Принципиальная схема добычи геотермальных ресурсов

Осложнения, возникающие в условиях высокой температуры горных пород, связаны с влиянием температуры на:

- свойства промывочной жидкости;
- изнosoустойчивость бурильных труб и рабочей части долот;
- устойчивость стенок скважин при колебаниях температуры при спуско-подъемных операциях;
- деформацию обсадных труб.

Высокая температура горных пород отрицательно влияет на материалы, входящие в состав промывочной жидкости. Как химические реагенты, так и глины при высоких температурах становятся слабоактивными и нестабильными и не могут достаточно эффективно обеспечивать необходимый режим бурения. При прогреве химически необработанных глинистых растворов до  $140^{\circ}\text{C}$  происходит термодиспергирование глинистой фазы – растворы загустевают до нетекучего состояния.

При бурении геотермальных скважин на поверхности контакта долота с забоем возникает высокая температура ( $450\ldots 650^{\circ}\text{C}$  и выше). Материал долота теряет прочность, изнашивается, теряются алмазы, твердосплавные вставки [2].

Экологические риски включают загрязнение подземных вод и почвы химикатами и буровыми растворами, нарушение геологических структур, ведущее к оползням, и выбросы парниковых газов.

**Постановка задачи и методы исследования.** Бурение является одним из основных методов разведки геотермальных районов, с помощью которого уточняются все данные, полученные при геофизических исследованиях.

Для сооружения геотермальных скважин используются, в основном, установки для вращательного бурения - роторные установки для глубоких скважин до 4000 метров (рис. 2).

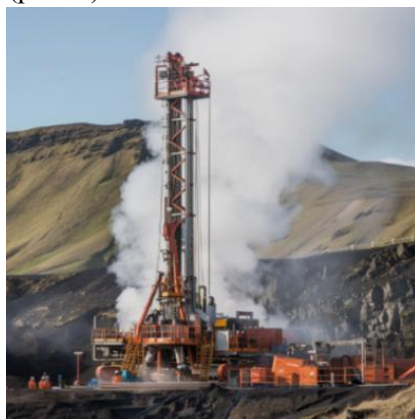


Рис. 2. Роторная буровая установка БУ-80 БрД (до 2800 м)

Современные алмазные долота PDC (Polycrystalline Diamond Compact) играют ключевую роль в процессе бурения в нефтегазовой и геотермальной отраслях. Они имеют фиксированные режущие элементы из синтетического алмаза на подложке из карбида вольфрама, которые позволяют им резать горные породы, а не дробить их. Благодаря этому PDC-долота (рис. 3) отличаются высокой скоростью проходки, длительным сроком службы и износостойкостью, что особенно важно в условиях высоких температур и абразивных пород, характерных для геотермальных скважин [3-5].



Рис. 3. Алмазные долота PDC

Ключевые особенности и преимущества использования алмазных долот PDC:

- **Принцип действия:** работают по принципу среза и царапания, а не ударного дробящего действия традиционных долот, что увеличивает скорость бурения.
- **Конструкция:** не имеют подвижных элементов в отличие от шарошечных долот, что снижает риск поломок и потери инструмента в скважине.
- **Стойкость и самозатачивание:** резцы покрыты алмазным слоем толщиной 0.5...5 мм. При износе твердосплавного основания алмазный слой остается острым, обеспечивая самозатачивающийся эффект и продлевая срок службы долота в 3...5 раз по сравнению с шарошечными.
- **Эффективность:** сокращают время бурения геотермальных скважин до 40% и снижают эксплуатационные расходы.
- **Универсальность:** используются для различных типов скважин, включая геотермальные, нефтяные, газовые и водные, и эффективно работают в мягких, среднетвёрдых и твёрдых абразивных породах.

В условиях коррозионного воздействия горячего флюида и кислотообразующих газов (при содержании  $H_2S$  до 25...30%) рекомендуется в качестве меры профилактики использовать обсадные трубы из сталей специальных марок - углеродистая сталь, нержавеющая сталь С-95. Такая сталь способна

выдерживать высокие температуры без деформации или потери характеристик, а также устойчива к воздействию агрессивных и химических сред.

Буровой раствор играет ключевую роль в процессе бурения нефтяных и геотермальных скважин. Он обеспечивает транспортировку выбуренной породы, охлаждение и смазку бурового инструмента, а также борьбу с поглощением и стабилизацию стенок скважины.

На сегодняшний день водные буровые растворы (WBM) остаются одними из самых востребованных в геотермальной и нефтегазовой промышленности. Их популярность объясняется низкой стоимостью, простотой приготовления и экологичностью. Как правило, такие растворы состоят из воды, глинистых материалов и различных химических добавок, определяющих их свойства. Однако не менее важным является правильный выбор этих добавок. Растворы на углеводородной основе (РУО) обладают высокой термической стабильностью и хорошими ингибирующими свойствами, но их применение связано с экологическими рисками и высокими затратами. Поэтому все большее внимание уделяется разработке более безопасных и экономически эффективных вариантов [6, 7].

Решением этих проблем стало внедрение высокоингибирующих буровых растворов на водной основе (HPWBM). HPWBM продемонстрировали улучшенные фильтрационные и реологические свойства, высокую скорость бурения и пониженное воздействие на окружающую среду при бурении в сложных геологических условиях (рис. 4). Рекомендовано применение полимерных добавок, таких как полиакриламид (ПАА), полианионная целлюлоза (РАС) и карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ), а также гелеобразный анионный полимер LIQUI-POL. Эти полимеры используются в качестве реагентов для улучшения буровых растворов, они повышают их вязкость, снижают водоотдачу, стабилизируют стенки скважины, предотвращая обвалы и прихваты инструментов [7].

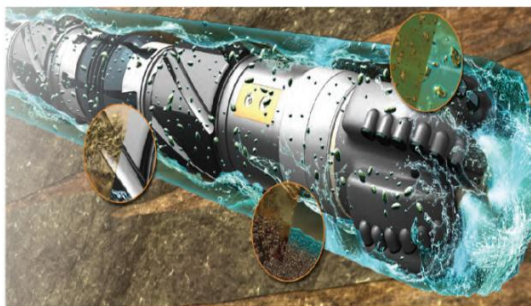


*Рис. 4. Современные высокоингибирующие буровые растворы на водной основе (HPWBM)*

С целью предотвращения грифообразования (внезапный выход флюида под высоким давлением на поверхность из-за нарушения герметичности обсадной колонны) затрубное пространство тщательно тампонируется и проверяется на герметичность [8].

В качестве вяжущих применяют следующие материалы:

- тампонажный шлакопесчаный цемент (ШПЦ) (рис. 5). Это тонкоизмельченные шлаки с кварцевым песком. При температуре более 200 °С соотношение компонентов 1:1. Для повышения стабильности раствора иногда добавляют бентонит (до 12,5%). При температуре до 100...120 °С в смесь вводят утяжеленный шлаковый цемент (УШЦ) и интенсификатор твердения – портландцемент (до 10%);
- УШЦ2-200 для скважин с температурой 80...220 °С;
- белито-кремнеземистый цемент (БКЦ) для высокотемпературных скважин. Это смесь отходов производства глинозема, соды (1...5%) и поташа из нефелинового материала, а также кварцевого песка (30...70%). При 160...200 °С и давлении 6...7 МПа начало схватывания раствора БКЦ составляет 1,5...4,5 ч, конец – не позднее 10 ч.

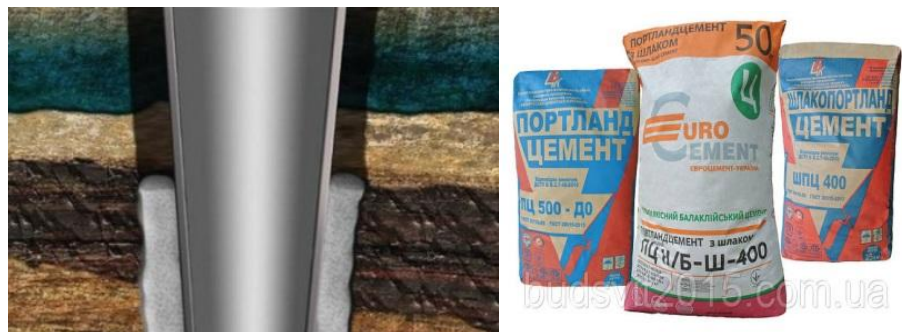


Рис. 5. Использование шлакопесчаного цемента для предотвращения грифообразования

**Методы борьбы с экологическими проблемами.** Для снижения экологического ущерба при бурении геотермальных скважин используют комплекс методов: применение закрытых систем бурения и замкнутых циклов для минимизации отходов, использование биоразлагаемых химикатов, а также герметизация скважины с помощью качественных обсадных труб и цементирование для предотвращения загрязнения водоносных горизонтов. Важным этапом является также последующая рекультивация нарушенных земель (рис. 6).

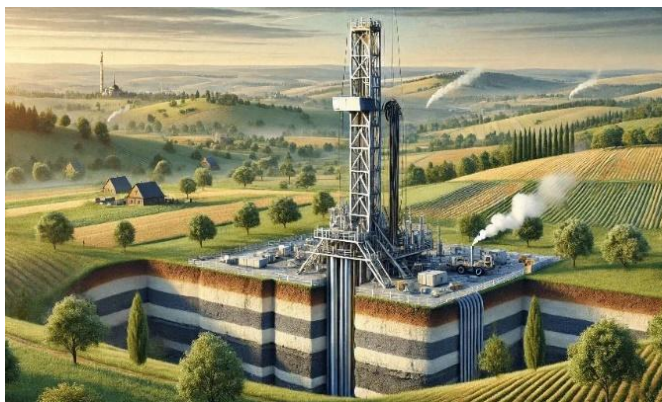


*Рис. 6. Рекультивация земель вблизи эксплуатации геотермальных скважин*

Загрязнение грунтовых вод — одна из самых серьезных угроз, связанных с бурением геотермальных скважин. Важно принять меры по предотвращению попадания токсичных веществ в грунтовые воды. Своевременное обнаружение и устранение возможных проблем позволит минимизировать риски и обеспечить сохранение качества подземных вод [9].

Для минимизации негативного воздействия на окружающую среду следует:

- проводить экологическую оценку перед началом бурения;
- использовать технологии и методы, минимизирующие воздействие на природу;
- разрабатывать и внедрять планы рекультивации территорий после завершения бурения;
- контролировать уровень загрязнения и предпринимать меры по его устранению, применяя малотоксичные и биоразлагаемые химикаты для буровых растворов, которые быстро разлагаются на безвредные компоненты.

**Автоматизация и цифровые технологии.** Современные инновации в области автоматизации и цифровых технологий также оказывают существенное влияние на процесс бурения геотермальных скважин. Они могут увеличить точность, снизить риски и сократить затраты.

**Системы мониторинга в реальном времени.** Благодаря развитию датчиков и системе сбора данных, буровики могут в реальном времени отслеживать параметры бурения, такие как температура, давление, скорость вращения и другие показатели. Это позволяет оптимизировать процесс и быстро реагировать на непредсказуемые ситуации [8].

**Заключение.** Анализ проведенных исследований позволяет сделать следующие выводы.

***Для решения технологических проблем необходимо предусмотреть следующие меры:***

- применение буровых установок роторного типа;
- применение современных алмазных долот PDC (Polycrystalline Diamond Compact), которые отличаются высокой скоростью проходки, длительным сроком службы и износостойкостью, что особенно важно в условиях высоких температур и абразивных пород, характерных для геотермальных скважин;
- использование обсадных труб из сталей специальных марок - углеродистая сталь, нержавеющая сталь С-95. Такие стали способны выдерживать высокие температуры без деформации или потери характеристик, а также устойчивы к воздействию агрессивных и химических сред;
- внедрение высокоингибирующих буровых растворов на водной основе (HPWBM). Эти системы успешно применялись при бурении нестабильных и высокотемпературных скважин, в том числе в сложных геологических условиях. HPWBM продемонстрировали улучшенные фильтрационные и реологические свойства, высокую скорость бурения и пониженное воздействие на окружающую среду;
- тщательное тампонирование и проверка на герметичность затрубного пространства с целью предотвращения грифообразования.

***Для снижения экологического ущерба при бурении геотермальных скважин необходимо проводить комплекс мер:***

- использование буровых установок с закрытыми системами и технологиями “замкнутого цикла”, что позволяет собирать, обрабатывать и повторно использовать буровой раствор, предотвращая их утечку в окружающую среду;
- применение малотоксичных и экологически безвредных полимерных добавок для буровых растворов (таких как полиакриламид, карбоксил-метилцеллюлоза, LIQUI-POL и др.);
- использование высококачественных обсадных труб и цементных растворов для изоляции скважины от водоносных горизонтов;
- постоянный контроль состояния окружающей среды в реальном времени для оперативного реагирования на возможные проблемы;
- мониторинг подземных вод для выявления и устранения любых загрязнений;
- восстановление ландшафта после завершения работ, включая восстановление плодородия почвы и нарушенной экосистемы;

• **обучение персонала, строгое соблюдение экологических стандартов и норм, что обеспечивает контроль за выполнением экологически безопасных практик на всех этапах бурения.**

### **Литература**

1. **Азизбекян О.Г.** Отчет отряда глубинного тепла о результатах работ, проведенных в 1984-87 гг. в Сисианском районе Республики Армения.- Ереван, 1987.- 296 с.
2. **Lund J.W.** Characteristics, development and utilization of geothermal resources // Geo-Heat Center Quarterly Bulletin.- 2007.- Vol. 28, issue 2.
3. Enhanced geothermal systems (EGS): A review / **P. Olasolo, M.C. Juárez, M.P. Morales, S. D'Amico, I.A. Liarte** // Renewable and Sustainable Energy Reviews.- 2015–2016.- Vol. 56.- P. 133–144.
4. **Augustine C., Updated U.S.** Geothermal supply characterization and representation for market penetration model input / U.S. Department of Energy (DoE); NREL.- Golden, Colorado, U.S., 2011.- 103 p.
5. **Алхасов А.Б.** Геотермальная энергетика: проблемы, ресурсы, технологии. - М.: Физматлит, 2008.- 376 с.
6. **Крылов В.И., Крещул В.В.** Реологические особенности буровых полимерных жидкостей. - Ухта: Изд-во УГТУ, 2010.- 235 с.
7. **Акопян Р.З., Аванесова И.С.** Специальные составы буровых растворов для борьбы с поглощением// Вестник ГИУА: Сборник научных статей. – Ереван, 2014. – Вып. 2, - С. 489-494.
8. **Агеев А.** Геотермальная электростанция: принцип работы, преимущества и проблемы // Новости высоких технологий, науки и техники.- 2021. <https://www.techcult.ru>.
9. **Малышкин М.М.** Экологизация технологии бурения скважин // Записки горного инженера.- СПб., 2013.- С. 63-66.

*Поступила в редакцию 01.12.2025.*

*Принята к опубликованию 26.05.2026.*

### **ԵՐԿՐԱՋԵՐՄԱՅԻՆ ՌԵՍՈՒՐՍՆԵՐԻ ԶԱՐԳԱՅՄԱՆ ԸՆԹԱՅՔՈՒՄ ԱՌԱՋԱՅՈՂ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱԿԱՆ ԽՆԴԻՐՆԵՐԸ ԵՎ ԲՆԱՊԱՀՊԱՆԱԿԱՆ ԱՍՊԵԿՏՆԵՐԸ**

**Ի.Ս. Ավանեսովա, Գ.Ֆ. Գալստյան, Գ.Ս. Հակոբջանյան, Հ.Ա. Խաչատրյան**

Այս կամ այն հանքավայրի երկրաջերմային ռեսուրսների կիրառման ոլորտը և օգտագործման արդյունավետությունը կախված են նրա էներգետիկ ներուժից, ընդհանուր պաշարից, հորատանցքերի դեբիտից (արտադրողականությունից), քիմիական կազմից, ջրերի հանքայնացումից և ագրեսիվությունից, սպառողի առկայությունից և դրա հեռավորությունից, հորատանցքերի ջերմաստիճանից, հիդրավլիկ ռեժիմներից և մի շարք այլ գործոններից:

Հայաստանի պայմաններում երկրաջերմային էներգիայի ամենահեռանկարային աղբյուրներից կարող են լինել մակերևույթին մոտ գտնվող հրաբխային ժայթքումների օջախները: Հետախուզման ընթացքում հայտնաբերվել են Սյունիքի հրաբխային բարձրավանդակի երեք հեռանկարային հատվածներ: Հետագա խոր ուսումնասիրությունները հիմք են տվել երկրաջերմային դաշտերի այս հատվածները համարել երկրաջերմային հանքավայրեր:

Հետևաբար, երկրաջերմային աղբյուրների շահագործումը պետք է հիմնված լինի նախնական երկրաբանական ուսումնասիրությունների վրա: Ներկայումս մեր երկրում քարտեզագրվել և ուսումնասիրվել են 550 հանգած հրաբուխներ, որոնց օջախները, ըստ երկրաբանական տվյալների, գտնվում են երկրի մակերևույթից մի քանի կիլոմետր խորություններում: Իսկ հրաբխային օջախները պարունակում են ջերմային էներգիայի հսկայական պաշարներ: Երկրաջերմային էներգետիկայի զարգացումը հեռանկարային ուղղություն է, որը կարող է էապես լուծել Հայաստանի էներգետիկ անվտանգության հարցը: Սա միակ տեխնոլոգիան է, որով հնարավոր է ապահովել էլեկտրաէներգիայի երաշխավորված արտադրություն, քանի որ այլ էներգիայի (արևային, հողմային, ռեգեներատիվ) աղբյուրները սեզոնային բնույթ են կրում:

Երկրաջերմային հորատանցքերի հորատումը հորատանցքային միջավայրի բարձր ջերմաստիճանի պատճառով ազդում է բազմաթիվ տեխնոլոգիական գործընթացների վրա:

Հոդվածում ներկայացված են երկրաջերմային հորերի հորատման ընթացքում առաջացող տեխնոլոգիական ռիսկերը և դրանց կանխարգելման ուղիները, ինչպես նաև բնապահպանական խնդիրները և այն միջոցները, որոնք պետք է ձեռնարկվեն՝ բացասական հետևանքները նվազագույնի հասցնելու համար:

**Առանցքային բաներ.** Երկրաջերմային ռեսուրսներ, հորատում, ջերմաստիճանի գործոն, բնապահպանական խնդիրներ, տամպոնաժային լուծույթ, ջրի հիմքով բարձր պոլիմերային հորատման լուծույթ:

## TECHNOLOGICAL PROBLEMS AND ENVIRONMENTAL ASPECTS ARISING FROM THE DEVELOPMENT OF GEOTHERMAL RESOURCES

I.S. Avanesova, G.F. Galstyan, G.S. Hakobjanyan, U.A. Khachatryan

The field of application and the efficiency of using geothermal resources of a deposit depend on its energy potential, the total reserve and flow rate (productivity) of drilling wells, the chemical composition, mineralization and aggressiveness of waters, the presence of a consumer and his remoteness, the temperature and hydraulic conditions of drilling wells and a number of other factors.

In the conditions of Armenia, the most promising sources may be near-surface foci of recent volcanic eruptions. During the exploration, three promising sites were identified in the

Syunik volcanic highlands. Further in-depth studies gave grounds to consider these areas of geothermal fields as geothermal deposits.

Therefore, the operation of geothermal sources should be based on preliminary geological studies. Currently, 550 extinct volcanoes have been mapped and studied in our country, the foci of which, according to geological data, lie within several kilometers of the earth's surface. And volcanic foci contain huge reserves of thermal energy. The development of geothermal energy is a promising area that can significantly solve the issue of Armenia's energy security. This is the only technology that can ensure guaranteed electricity production, since sources of other energy (solar, wind, regenerative) are seasonal in nature.

Drilling of geothermal wells due to the high temperature of the borehole environment affects many technological processes.

The article shows the technological risks that arise when drilling geothermal wells and ways to prevent them, as well as environmental problems and measures that need to be taken to minimize negative consequences.

**Keywords:** geothermal resources, drilling, temperature factor, environmental problems, grouting mud, highly polymer water-based drilling mud.