

4. Копылов И. П. Проектирование электрических машин / Б. К. Клоков, В. П. Морозкин, Б. Ф. Токарев; под ред. И. П. Копылова. 3-е изд., испр. и доп. М.: Высш. шк., 2002. 757 с.
5. Седова И. Ю., Романенко И. Г. Моделирование динамических режимов тягового двигателя постоянно-го тока // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2008. Т. 4. № 5. С. 19–23.
6. Ключев В. И. Теория электропривода. М.: Энергоатомиздат, 1985. 560 с.
7. Теория автоматического управления. Ч. I. Теория линейных систем автоматического управления / Н. А. Бабаков, А. А. Воронов, А. А. Воронова [и др.]; под ред. А. А. Воронова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1986. 367 с.

УДК 621. 484

**Стоянов Николай Иванович, Смирнова Алла Викторовна,
Смирнова Анастасия Александровна**

ПОВЫШЕНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ПЕТРОТЕРМАЛЬНОЙ СКВАЖИНЫ

В статье представлена новая технология повышения теплоотдачи петротермальной скважины за счет увеличения поверхности контакта теплоносителя с грунтом путем гидравлического разрыва пласта.

Ключевые слова: петротермальная энергия, альтернативная энергетика.

**Nikolay Stoyanov, Alla Smirnova, Anastasia Smirnova
IMPROVING HEAT EMISSION IN PETROTHERMAL WELL**

The authors reveal a new technology to increase heat transfer in petrothermal wells through increasing the contact surface between the coolant and the ground through hydraulic fracturing.

Key words: petrothermal energy, alternative energy.

Возможности использования экологически чистой повсеместно доступной возобновляемой энергии привлекают все большее внимание. В соответствии с прогнозами уже в течение ближайших 15–20 лет возобновляемые источники энергии (энергия Солнца, геотермальная энергия) должны занять заметное место в мировом энергетическом балансе, обеспечивая замещение истощающихся запасов органического топлива и экологическое оздоровление окружающей среды.

Отличием большинства установок возобновляемой энергии от традиционных установок является отсутствие в процессе эксплуатации энергетических затрат на топливообеспечение, что существенно снижает расходную часть. Основными статьями расходов энергии при создании и эксплуатации таких установок являются затраты на производство оборудования и строительство зданий и сооружений. Причем для установок небольшой мощности, строительство каких-либо объектов часто не требуется, поэтому данная статья расходов присутствует не всегда [1–3].

Стратегическими целями использования возобновляемых источников энергии и местных видов топлива являются:

- сокращение потребления невозобновляемых топливно-энергетических ресурсов;
- снижение экологической нагрузки от деятельности топливно-энергетического комплекса;
- обеспечение децентрализованных потребителей и регионов с дальним и сезонным завозом топлива;
- снижение расходов на дальнепривозное топливо [4].

Геотермальными ресурсами слабопроницаемых горных пород являются петрогеотермальные. Использование петротермальной энергии Земли в настоящее время в основном направлено на использование тепла пород глубиной до 100 м. Проводимые исследования предполагают использование тепла глубинных пород от 2 000 до 3 000 м и в перспективе до 7 000 м [5; 10–13].

Основная проблема использования петротермальной энергии заключается в низкой теплоотдаче грунтов скважины (тепловая мощность скважины при глубине до 3 000 м достигает 1–1,2 МВт) [5–9]. Это связано с низкими коэффициентами теплопроводности грунтов (термическая характеристика горных пород в основном определяется физическими свойствами, зависящими от их структурно-текстурных особенностей, свойств породообразующих минералов и среды, заполняющей пространство между минералами), что приводит к низким значениям коэффициента теплопередачи, и низкими температурными градиентами скважин ($\text{grad}T = (20 - 90) \text{ } ^\circ\text{C} / \text{км}$) [10–13]. Т. е. температура грунтов может достигать значений 60–180 $^\circ\text{C}$. Причем в большинстве районов достигается температура грунтов по нижнему температурному пределу, а более высокие значения температуры грунтов наблюдаются в основном в районах с повышенной геологической активностью, что делает малоперспективным использование петротермального тепла для нужд теплоснабжения в этих районах как в малозаселенных. Основываясь на основном законе теплопередачи

$$Q = kF\Delta t,$$

где Q – тепловая мощность, Вт; k – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²К); Δt – среднелогарифмический температурный напор, $^\circ\text{C}$; F – площадь поверхности теплообмена, м², для повышения теплоотдачи петротермальной скважины при одинаковом температурном напоре Δt и коэффициенте теплопередачи k необходимо увеличение поверхности контакта грунтов с теплоносителем (площади поверхности теплообмена F).

Известны способы увеличения поверхности контакта теплоносителя с грунтом путем создания каверны ядерным взрывом, которая создается между двумя скважинами, что, во-первых, нарушает экологию, во-вторых, связано с высокими капитальными затратами (необходимо бурение двух скважин вместо одной). В связи с проведенным анализом более перспективным видится – с точки зрения экологичности и снижения капитальных затрат – способ гидравлического разрыва пласта при бурении одиночной петротермальной скважины, который применяется в настоящее время для увеличения нефтеотдачи нефтеносного пласта [14]. Гидравлическим разрывом называется процесс, при котором давление жидкости воздействуют непосредственно на породу пласта вплоть до ее разрушения и образования трещины. Продолжающееся воздействие давления жидкости расширяет трещину вглубь от точки разрыва. В закачиваемую жидкость добавляется расклинивающий материал, например, песок, керамические шарики или агломерированный боксит. Назначение этого материала – удержать созданную трещину в раскрытом состоянии после сброса давления жидкости. Таким образом, создается новый более просторный канал притока. Канал объединяет существующие природные трещины и создает дополнительную площадь дренирования скважины.

Сущность гидравлического разрыва пласта (ГРП) в том, что посредством закачки жидкости при высоком давлении происходит раскрытие естественных или образование искусственных трещин в продуктивном пласте и при дальнейшей закачке песчано-жидкостной смеси или кислотного раствора для расклинивания образованных трещин с сохранением их высокой пропускной способности после окончания процесса и снятия избыточного давления. Эта технология была впервые использована в США в конце 40-х годов XX в. для приобщения к разработке пластов с нарушенной проницаемостью возле ствола скважины и увеличения продуктивности скважин в низкопроницаемых коллекторах. Трещины могут быть горизонтальными, вертикальными и наклонными. Пространственная ориентация трещины определяется напряженным состоянием горных пород в зоне скважины и изменениями, обусловленными распределением напряжений. Напряжения формируются главным образом под действием гравитационных сил. Технология гидравлического разрыва пластов достаточно хорошо отработана на нефтяных скважинах и не требует разработки специализированного оборудо-

дования. Также в качестве петротермальных скважин могут использоваться отработанные нефтяные скважины, в которых уже выполнялись работы по гидравлическому разрыву пластов для повышения нефтеотдачи, что существенно снизит основные капитальные затраты на обустройство скважины. Таким образом, поверхность контакта теплоносителя с грунтом может быть увеличена на 30–60 %, что, как ожидается, приведет к увеличению теплоотдачи петротермальной скважины также на 30–60 %.

В основу предлагаемого способа повышения теплоотдачи петротермальной скважины положена технология извлечения петротермальной энергии, разработанная на кафедре теплогазоснабжения и вентиляции института строительства, транспорта и машиностроения ФГАОУ ВПО СКФУ [7].

Известно, что капитальные затраты на бурение скважины находятся в квадратичной зависимости от глубины бурения. В свою очередь теплоотдача скважины увеличивается с увеличением глубины бурения в связи с увеличением температуры грунтов. Однако применение гидравлического разрыва пласта, как показано выше, позволяет увеличить теплоотдачу, в результате чего возможно снижение глубины бурения скважины без потери тепловой мощности петротермальной скважины при одновременном снижении капитальных затрат, т. к. технология гидравлического разрыва пласта менее затратна по сравнению с глубинным бурением. Таким образом, задачей оптимизации с целью снижения капитальных затрат является определение требуемой глубины скважины и площади поверхности раскрытия трещин при гидравлическом разрыве для обеспечения заданной тепловой мощности. Наиболее сложной задачей является прогнозирование раскрытия трещин при гидравлическом разрыве, т. к. эта характеристика зависит от нескольких трудно определяемых факторов, таких как геология грунтов, энергия разрыва пласта, свойства расклинивающих материалов, и может быть определена только с достаточной долей вероятности.

Основной проблемой предлагаемого способа повышения теплоотдачи петротермальной скважины представляется экологический фактор, который заключается в том, что для укрепления образующихся трещин используются специальные растворы, которые могут оказывать негативное воздействие на экологию. Также наблюдались локальные очаги землетрясения при использовании гидравлического разрыва пластов, поэтому в ряде европейских стран использование гидравлического разрыва пластов для повышения нефтеотдачи скважин и добычи сланцевого газа и нефти законодательно запрещено.

Также возникает техническая проблема обеспечения циркуляции теплоносителя в трещинах, особенно при температурах грунта выше температуры насыщения теплоносителя при заданном давлении, т. к. образующиеся пузырьки пара могут препятствовать циркуляции теплоносителя. Это является задачей дальнейшего исследования.

Предлагаемый способ увеличения теплоотдачи петротермальной скважины за счет увеличения поверхности контакта теплоносителя с грунтом является более экологичным и экономически выгодным по сравнению с увеличением поверхности теплоотдачи петротермальных скважин ядерным взрывом и может быть рекомендован к внедрению.

Он дает возможность снижения капитальных затрат при бурении скважин, т. к. может быть уменьшена глубина скважины без снижения тепловой мощности петротермальной скважины.

Тепловая мощность петротермальной скважины при глубине до 3 000 м в связи с увеличением ее теплоотдачи предлагаемым способом сможет достигать 1,6–2,2 МВт, что достаточно для круглогодичного тепло-холодоснабжения небольшого поселка при отсутствии эксплуатационных затрат на топливо.

Литература

1. Шпильрайн Э. Э. Проблемы и перспективы возобновляемой энергии в России // Перспективы энергетики. 2003. Т. 7. С. 393–403.
2. Безруких П. П. Зачем России возобновляемые источники энергии // Энергия: экономика, техника, экология. 2002. № 10.

3. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников в России / под общей ред. П. П. Безруких. СПб.: Наука, 2002. 314 с.
4. Энергетическая стратегия России на период до 2020 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 августа 2003 г. № 1234-р.
5. Стоянов Н. И., Гейвандов И. А., Воронин А. И. и др. Технология извлечения и использования геотермальной энергии для систем тепло-холодоснабжения // Отчет о научно-исследовательской работе по государственному контракту от 22 июня 2007 г. № 02.516.11.6059 Депонир. во ВНИЦ N ГР 01910021861. Инв. № 02910028347. 2008.
6. Стоянов Н. И. Теоретические основы и технологии извлечения и использования глубинного петротермального тепла для комплексного энергоснабжения удаленных и обособленных потребителей: коллективная монография / Н. И. Стоянов, И. А. Гейвандов, Р. А. Гейбатов, С. С. Смирнов, А. В. Смирнова. Ставрополь: СКФУ, 2013. 149 с.
7. Пат. 2288413 Российская Федерация, С1, МПК F24J 3/08. Способ извлечения геотермального тепла / Н. И. Стоянов, А. И. Воронин, И. А. Гейвандов. 2005113114/06; Заявлено 29.04.05; Опубл. 27.11.06, Бюл. 33.
8. Патент № 2358209, Бюл. № 16, 2009. Способ использования геотермального тепла. Стоянов Н. И., Гейвандов И. А., Воронин А. И.
9. Стоянов Н. И., Воронин А. И., Гейбатов Р. А. Комплексное использование петротермальной энергии с помощью абсорбционных тепловых насосов // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2013. № 4 (37). С. 47–51.
10. Калинин М. И., Баранов А. В. Метод расчета глубинных теплообменников для геотермального теплоснабжения // Разведка и охрана недр. 2003. № 6. С. 53–60.
11. Алхазов А. Б., Рамазанов М. М., Абасов Г. М. Теплообмен между вертикальной скважиной и водоносным горизонтом с учетом естественной конвекции // II Международная конференция «Возобновляемая энергетика: Проблемы и перспективы». Махачкала, 2010.
12. Богуславский Э. И. и др. Ресурсы геотермальной энергетики территории России и сопредельных государств // Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы нетрадиционной энергетики» / отв. вып. В. В. Елистратов. СПб., 1994. С. 185.
13. Богуславский Э. И. Тепловые ресурсы недр России // Теплоэнергетика. 2004. № 6. С. 25–32.
14. Усачев П. М. Гидравлический разрыв пласта. М.: Недра, 1986. 165 с.