

УДК 662.997

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕТРОТЕРМАЛЬНЫХ ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ В КАЧЕСТВЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ CO_2 И ВОДЫ

Агафонов А.Р. (ИТМО)

Научный руководитель - к.т.н., доцент Рахманов Ю.А. (ИТМО)

Введение. Достижение целей устойчивого развития и снижения выбросов парниковых газов в атмосферу требует поиска новых технологических решений для производства энергии, потребление которой только растет. Альтернативные источники энергии, в частности, петротермальные циркуляционные системы (ПЦС) могут внести значительный вклад в увеличение выработки безопасной и экологически чистой энергии. Однако, необходимо их всестороннее исследование и решение проблем, сдерживающих их развитие.

В этой работе проведено всестороннее сравнение эффективности параметров работы ПЦС при использовании в качестве теплоносителя диоксида углерода и воды. В качестве основных сравниваемых параметров эффективности (геотермальной электростанции) ГеоТЭС были выбраны вырабатываемая мощность ГеоТЭС за вычетом собственных нужд N , срок эксплуатации диполя τ , определяющий срок службы ГеоТЭС, величина фильтрационного сопротивления пласта Ω и давление, развиваемое насосом P_n .

Основная часть. В качестве примера была рассмотрена ГеоТЭС со следующими параметрами [1]: глубина залегания коллектора H – 4500 м, температура пород коллектора $t_{нк}$ – 190 °С, пластовое давление $P_{пл}$ – 51 МПа, теплопроизводительность диполя Q – 120 ГДж/ч, расстояние между забоями скважин l – 600 м, температура теплоносителя на входе в коллектор t_x – 60 °С и диаметр скважины d_c – 0,238 м. При изменении типа теплоносителя, в общем случае, изменяются следующие параметры: динамическая вязкость пластового флюида (теплоносителя в коллекторе) – μ_p , динамическая вязкость сбросного геотермального теплоносителя – μ_n , плотность теплоносителя на входе в коллектор (при t_x) – ρ_x , плотность теплоносителя на выходе из коллектора – ρ_r , удельная теплоёмкость теплоносителя – C_m и теплопроводность теплоносителя – λ_r .

При проведении исследований использовалась методика расчета ГеоТЭС, приведенная в работе [2], в которой указан порядок проведения контрольного (отладочного) расчета по эмпирическим зависимостям для нахождения основных параметров и общей привлекательности проекта. Параметры двух рассматриваемых теплоносителей изменяются под действием температуры и давления, поэтому в каждом конкретном случае использовались эмпирические зависимости, полученные в работе [3].

Геотермальные системы с использованием диоксида углерода вместо воды называются CPG (англ. - CO_2 Plume Geothermal). Учитывая тот факт, что теплоемкость и теплопроводность диоксида углерода при прочих равных условиях выше, чем у воды, это может привести к значительному повышению общей эффективности системы. Более того, значения динамической вязкости сверхкритического диоксида углерода значительно ниже, чем у воды, что может привести к снижению гидравлических сопротивлений при прохождении теплоносителя по нагнетательной, добывающей скважинам и коллектору.

Кроме того, сжимаемость CO_2 , обеспеченная значительным изменением плотности в зависимости от давления и температуры, создает перепад давления на поверхности, позволяя напрямую вырабатывать электроэнергию из полученного теплоносителя, минуя необходимость в органическом цикле Ренкина (ОЦР). Это свойство создает эффект термосифона, облегчая циркуляцию CO_2 и уменьшая зависимость от перекачки. Дополнительно стоит отметить, что при одинаковом рабочем давлении насосов расход CO_2 в несколько раз превышает массовый расход воды, а также коэффициент рекуперации тепла, что может быть полезно при более низких температурах пласта, например, в системах, основанных на законсервированных нефтегазовых пластах. Также среди плюсов

использования CO₂ в качестве теплоносителя можно выделить его способность не растворять минералы в коллекторах, предотвращая их транспортировку на поверхность, что уменьшает или вовсе устраняет проблемы образования отложений в трубопроводах и теплообменном оборудовании.

В ходе исследования установлено, что применение диоксида углерода приводит к повышению вырабатываемой мощности ГеоТЭС за вычетом собственных нужд N , ввиду снижения давления, развиваемого насосом P_n для прокачки теплоносителя через систему, что, в свою очередь, снижается из-за снижения величины фильтрационного сопротивления пласта Ω , а также гидравлических сопротивлений внутри нагнетательной и добывающей скважин. Ввиду этого, расход теплоносителя может быть повышен из-за выполнения условий по недопущению превышения максимальной репрессии на пласт, а также недопущению превышения давления вскипания на устье. Процесс вскипания может привести к образованию двухфазного потока теплоносителя, коэффициент теплопередачи которого значительно выше однофазного, что увеличивает потери энергии при транспортировке теплоносителя, а также отложению минеральных веществ в скважинах, оборудовании, а также гидроудару.

Также установлено, что применение диоксида углерода приводит к снижению времени эксплуатации диполя ввиду того, что повышается количество получаемой энергии на поверхности, а, соответственно, повышается количество отводимой от диполя энергии, что не может быть полностью восполнено подводимой к диполю от нижележащих горных пород энергией. Снижение давления нагнетания насоса, а также возможность напрямую вырабатывать электроэнергию из диоксида углерода в качестве теплоносителя позволяет снизить затраты на закупку необходимого оборудования, а также, как установлено в ходе расчетов в этой работе, значительно снизить количество потребляемой насосом энергии, повысив общий КПД системы и количество отпускаемой на продажу энергии.

Выводы. Исходя из полученных результатов, можно сделать выводы, что применение диоксида углерода в качестве теплоносителя для ГЦС вместо стандартной практики по использованию воды может быть более эффективным ввиду наличия у вещества нескольких положительных теплофизических и гидродинамических характеристик. Так, например, большая сжимаемость CO₂ приводит к снижению гидравлических потерь и энергии, необходимой на работу насосов. Более лучшие теплофизические характеристики диоксида углерода приводят к получению большого количества энергии для потребителей, снижению затрат энергии на собственные нужды и повышению общего КПД системы.

Полученные результаты могут быть полезны при проектировании ПЦС, с целью выбора наилучшего теплоносителя. Дальнейшие исследования могут быть посвящены нахождению экономической целесообразности применения диоксида углерода в сравнении с водой, а также исследованию эмпирических данных по важнейшим характеристикам работы в течении всего срока службы ПЦС для диоксида углерода и воды.

Список литературы.

1. Tianyu Li, Sogo Shiozawa, Mark W. McClure. Thermal breakthrough calculations to optimize design of a multiple-stage Enhanced Geothermal System // *Geothermics*. – 2016. - № 64. – С. 455–465.
2. Богуславский Э.И. Освоение тепловой энергии недр. Монография // СПб.: Научно-технические технологии. – 2020. – 435 с.
3. Zhan-qing Qu, Wei Zhang, Tian-kui Guo. Influence of different fracture morphology on heat mining performance of enhanced geothermal systems based on COMSOL // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2017. – № 42 (29). – С. 18263–18278.

Автор: _____ Агафонов А.Р.

Научный руководитель: _____ Рахманов Ю.А.