

УДК 620.91:504.433+532.542.1

ОБ ЭФФЕКТЕ ОСТАТОЧНОГО ДЕБИТА ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ТЕПЛООТБОРА

© 2020 г. С. В. Черкасов^{1,*}, А. М. Фархутдинов², А. А. Шаипов³

Представлено академиком РАН А.О. Глико 30.01.2020 г.

Поступило 31.01.2020 г.

После доработки 31.01.2020 г.

Принято к публикации 25.02.2020 г.

Эффект остаточного дебита представляет собой переток флюида из резервуара теплоэнергетических вод через водозаборную скважину, теплообменник, и нагнетательную скважину циркуляционной геотермальной системы после выключения насосного оборудования. Ранее данный феномен упоминался в литературе как возможность обратной закачки охлажденного флюида без давления, однако подробно не исследовался. После наблюдения эффекта на Ханкальской опытно-промышленной геотермальной станции авторами были рассмотрены физические основы эффекта и возможность его использования в хозяйственной деятельности.

Ключевые слова: геотермальная энергетика, месторождения теплоэнергетических вод, геотермальная циркуляционная система

DOI: 10.31857/S2686740020020108

Геотермальная циркуляционная система (ГЦС) представляет собой наиболее применяемый в мире и экологически чистый способ теплоотбора из подземного резервуара теплоэнергетических вод. Традиционно такая система (рис. 1) состоит из вскрывающих резервуар водозаборной и нагнетательной скважин, оснащенных насосами и теплообменником, который обеспечивает теплоотбор во вторичный (потребительский) контур. Устья скважин на поверхности располагаются на минимально допустимом расстоянии друг от друга (обычно 10–20 м), а забои в резервуаре разносятся на 400–1500 м, что исключает влияние холодного закачиваемого флюида на водозабор. В общем случае количество водозаборных и нагнетательных скважин может быть разным, но в данной работе рассматривается традиционная “дублетная” система с одной водозаборной и одной нагнетательной скважинами.

В Российской Федерации единственная циркуляционная система, построенная по этому прин-

ципу, была создана в 2013–2015 гг. на Ханкальском месторождении теплоэнергетических вод [1] в ходе выполнения работ в рамках “Комплексного проекта по созданию опытно-промышленной геотермальной станции на основе реализации циркуляционной схемы использования глубинного тепла Земли”. Для реализации циркуляционной схемы было пробурено две скважины: водозаборная вер-

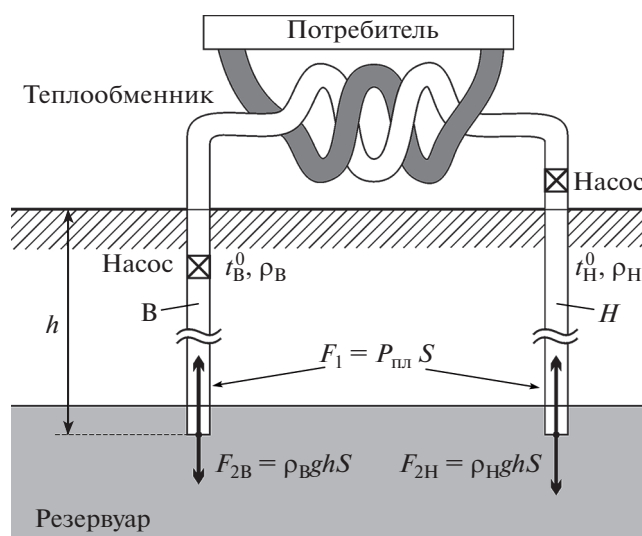


Рис. 1. Схема циркуляционной системы теплоотбора. В — водозаборная, Н — нагнетательная скважины. Остальные обозначения см. в тексте.

¹ Государственный геологический музей
им. В.И. Вернадского Российской академии наук,
Москва, Россия

² Башкирский государственный университет,
Уфа, Россия

³ Грозненский государственный нефтяной технический университет им. М.Д. Миллионщикова, Грозный, Россия

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

тикальная глубиной 904.5 м и наклонная нагнетательная глубиной 975 м. Расстояние между забоями скважин в резервуаре составляет 442 м.

Пробуренные скважины являются артезианскими с самоизливом в объеме 60–70 м³/ч. Насосное оборудование обеспечивает максимальный дебит ГЦС 200 м³/ч при 100%-й обратной закачке охлажденного флюида в резервуар. Водозабор обеспечивается скважинным насосом мощностью 34 кВт, а обратная закачка — насосом мощностью 250 кВт. Флюид представлен практически пресной до солоноватой (минерализация в резервуаре — от 0.7 до 1.9 г/л) водой с температурой 96°C. После теплообменника температура флюида снижается до 60°C, при этом его плотность возрастает с 961.9 до 983.2 кг/м³.

Эффект остаточного дебита геотермальной циркуляционной системы заключается в продолжении циркуляции флюида после выключения насосного оборудования. Этот феномен упоминается в литературе [2–4], но сам эффект не анализируется. В данной работе предлагается объяснение эффекта остаточного дебита геотермальной циркуляционной системы и рассматривается возможность его использования для повышения эффективности работы геотермальной станции.

В ходе испытаний циркуляционной системы после отключения насосов наблюдался дебит на уровне 25 м³/ч. Программа испытаний предусматривала перерыв в работе насосного оборудования продолжительностью 2 ч, в течение которых дебит не понижался.

При работе ГЦС в штатном режиме циркуляция флюида обеспечивается двумя насосами, один из которых расположен в водозаборной скважине, а второй, нагнетательный, — на поверхности. В единичной скважине при неработающих насосах на флюид на забое скважины действуют две основные силы: сила

$$F_1 = P_{пл}S, \quad (1)$$

где $P_{пл}$ — пластовое давление, а S — площадь горизонтального сечения (диаметр) скважины, и сила

$$F_2 = \rho ghS, \quad (2)$$

где ρ — плотность флюида, g — ускорение свободного падения и h — высота столба флюида в скважине, ρgh — давление на забое. При этом первая сила направлена вверх, а вторая — вниз по скважине. При $F_1 > F_2$ и при условии, что h в (2) равно расстоянию от устья до забоя скважины, происходит самоизлив флюида на поверхность, и скважина является артезианской.

В системе из двух скважин насосы “запускают” циркуляционную систему и поддерживают требуемый режим работы. При этом флюид в теплообменнике охлаждается и в нагнетательной скважине температура флюида становится ниже, чем в водо-

заборной. При выключении насосов, постоянном пластовом давлении в резервуаре, и при одинаковой глубине скважин система из двух скважин, герметично соединенных первичным контуром теплообменника, находилась бы в гидростатическом равновесии, если бы не разница в температуре, создающая разницу в плотности флюида. Температура флюида в водозаборной скважине соответствует температуре на забое $t_{в}^0$, а плотность флюида составляет $\rho_{в}$. После теплообменника, где флюид охлаждается до температуры $t_{н}^0$, в нагнетательной скважине плотность флюида составляет $\rho_{н}$. Разница гидростатических давлений на забоях водозаборной ($\rho_{в}gh$) и нагнетательной ($\rho_{н}gh$) скважин является причиной перетока флюида из резервуара через водозаборную скважину, теплообменник, и нагнетательную скважину обратно в резервуар, продолжающегося с некоторой скоростью потока v и при остановке насосов. Назовем этот феномен эффектом остаточного дебита циркуляционной системы. Следует подчеркнуть, что эффект остаточного дебита, строго говоря, не представляет собой циркуляцию в полном смысле этого слова, поскольку в самом резервуаре мы имеем точку водозабора и точку нагнетания флюида, которые не обязательно гидродинамически связаны. Фактически резервуар при рассмотрении эффекта остаточного дебита играет роль источника горячего флюида, перетекающего от забоя водозаборной к забою нагнетательной скважины за счет разницы гидростатических давлений на забоях скважин. При этом чем больше тепла снимается с теплоносителя в теплообменнике, т.е. чем больше разница температур в водозаборной и нагнетательной скважинах, тем больше разница давлений, и, соответственно, дебит системы при неработающих насосах.

Теоретически из формулы (2) видно, что разница давлений может зависеть не только от плотности (температуры) флюида, но и от высоты столба флюида (глубины скважины). То есть если форма резервуара разрешает конфигурацию циркуляционной системы, в которой забой нагнетательной скважины расположен глубже, чем забой водозаборной, в системе со скважинами разной глубины также возможен самопроизвольный переток флюида.

Наблюдаемый эффект может использоваться для повышения эффективности геотермальных тепловых и электростанций, на которых производится обратная закачка флюида. Режим работы циркуляционной системы может быть комбинированным, с включением и выключением насосного оборудования по графику, соответствующему потребительской нагрузке на геотермальную станцию.

Для использования эффекта в геотермальной энергетике необходимы детальные исследования

эффекта остаточного дебита, которые могут быть проведены на Ханкальской опытно-промышленной геотермальной станции [5]. В рамках детальных исследований необходимо, в первую очередь, обратить внимание на факторы, влияющие на эффект остаточного дебита циркуляционной системы, в том числе сопротивление элементов циркуляционной системы движению флюида, режимы работы насосного оборудования до выключения, степень понижения температуры флюида в теплообменнике, возможные изменения приемистости нагнетательной скважины в зависимости от режима работы системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zaurbekov S.S., Mintsaeve M.S., Labazanov M.M., et al. Results of Design Development for the Pilot Geothermal Plant at the Khankala Deposit in Chechen Republic // Ecology, Environment and Conservation. 2015. V. 21. P. 134–139.
2. Goldbrunner J., Bauer R., Kolb A., Achim Schubert A. Geothermal Cascade Use at Geinberg // Austria Bulletin d'Hydrogeologie. 1999. V. 17. P. 209–216.
3. Алхасов А.Б. Геотермальная энергетика: проблемы, ресурсы, технологии. М.: Физматлит, 2008. 376 с.
4. Tanase I.E. Geothermal Reinjection in Sedimentary Basins. Papers presented at Short Course IX on Exploration for Geothermal Resources, organized by UNU-GTP, KenGen and GDC at Lake Bogoria and Lake Naivasha. Kenya. November 2–24, 2014. UNU-GTP, CD-ROM / Web, ISBN 978-9979-68-349-0. 2015. P. 847–874.
5. Черкасов С.В., Минцаев М.Ш., Шаипов А.А. и др. Ханкальская опытно-промышленная геотермальная тепловая станция как уникальная научная установка. В сб.: Возобновляемая энергетика XXI век: Энергетическая и экономическая эффективность. Материалы IV Международного конгресса REENCON-XXI. Под ред. Д.О. Дуникова, О.С. Попеля, 2018. С. 234–235.

ON RESIDUAL FLOW EFFECT IN A GEOTHERMAL LOOP

S. V. Cherkasov^a, A. M. Farkhutdinov^b, and A. A. Shaipov^c

^a Vernadsky State Geological Museum of the Russian Academy of Science, Moscow, Russian Federation

^b Bashkir State University, Ufa, Russian Federation

^c Grozny State Technical Oil University named after M.D. Millionschikov, Grozny, Russian Federation

Presented by Academician of the RAS A.O. Gliko

Residual debit effect of geothermal loop is a flow of fluid from geothermal reservoir through production well, heat exchanger, and re-injection well after switching off the pumping equipment. Earlier, this phenomenon has been mentioned in the literature as possibility of re-injection of the cooled fluid without pressure, but with no detailed consideration. After observing the effect at the Khankala experimental geothermal plant, the authors have investigated the physics of the effect and possibility of its use in the energy production.

Keywords: geothermal energy, geothermal reservoir, geothermal loop