К ВОПРОСУ О ПЕРСПЕКТИВАХ УТИЛИЗАЦИИ ПОПУТНЫХ С ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ВОДОЙ ГОРЮЧИХ ГАЗОВ И РЕЖИМАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Г.Я. Ахмедов¹, А.С. Курбанисмаилова², К.А. Эфендиев³, Л.М. Ахмедова³

¹Институт проблем геотермии ДНЦ РАН
Республика Дагестан, 367030 Махачкала, пр. И.Шамиля, д. 39-а
Тел.: 8-928-219-38-77, e-mail: ganapi@mail.ru

²Институт геологии ДНЦ РАН
Республика Дагестан, 367010 Махачкала, ул. Ярагского, д. 75
Тел.: 8-928-219-38-77

³Дагестанский государственный технический университет
Республика Дагестан, 367015 Махачкала, Россия, пр. И.Шамиля, д. 70а

Заключение совета рецензентов: 01.11.15 Заключение совета экспертов: 05.11.15 Принято к публикации: 09.11.15

В статье рассматриваются вопросы целесообразности утилизации попутных с геотермальной водой горючих газов с невысоким газовым фактором, а также перспективные направления эксплуатации энергетических систем в режиме без солеотложения.

Ключевые слова: геотермальная вода, попутные горючие газы, солеотложение, энергетические системы, давление, температура.

TO THE QUESTION ABOUT THE PROSPECTS FOR UTILIZATION OF COMBUSTIBLE GASES ASSOCIATED WITH GEOTHERMAL WATER AND MODES OF POWER EQUIPMENT OPERATION

G.Ya. Akhmedov¹, A.S. Kurbanismailova², K.A. Efendiev³, L.M. Akhmedova³

¹Institute of Geothermal Problems, Dagestan Scientific Center, RAS
39a I.Shamilya ave., Makhachkala, 367030, Dagestan, Russia
Tel.: 8-928-219-38-77, e-mail: ganapi@mail.ru

²Institute of Geology, Dagestan Scientific Center, RAS
75 Yaragского str., Makhachkala, 367010, Dagestan, Russia
Tel.: 8-928-219-38-77

³Dagestan State Technical University
70a I.Shamilya ave., Makhachkala, 367015, Dagestan, Russia

Referred: 01.11.15 Expertise: 05.11.15 Accepted: 09.11.15

The article examines the expediency of utilization of combustible gases associated with geothermal water with a low gas factor, as well as perspective directions of energy systems development in regime without scaling.

Keywords: geothermal water, associated combustible gases, scaling, power systems, pressure, temperature.

Ганapi Янgieвич
Ахмедов
Ganapi Ya. Akhmedov

Сведения об авторе: д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник Института проблем геотермии ДНЦ РАН, зав. кафедрой физики ДГТУ.

Образование: Дагестанский гос. университет (1975).

Область научных интересов: фундаментальная физика, энергетика, в том числе нетрадиционная и возобновляемая.

Публикации: 120, в том числе 24 в журналах, рекомендованных ВАК России, 34 изобретения (а.с. СССР и патентов РФ), 1 монография.

Information about the author: PhD, Institute of Geothermal Problems, senior researcher.

Education: Dagestan State University (1975).

Research area: fundamental physics; power engineering, including non-conventional and renewable energy.

Publications: 120, including 24 in the magazines recommended by Russia's HCC (State Commission for Academic Degrees and Titles), 34 inventions (author's certificates of the USSR and patents of the Russian Federation), 1 monograph.

Ажай Сурхаевна
Курбанисмаилова
Ajay S.
Kurbanismailova

Сведения об авторе: аспирант ДГТУ.

Образование: Дагестанский гос. университет (2009).

Область научных интересов: физика, энергетика, в том числе возобновляемая.

Публикации: 7, в том числе 1 в издании из перечня ВАК.

Information about the author: post-graduate student of DSTU.

Education: Dagestan State University (2009).

Research area: physics, energetics, including renewable.

Publications: 7, including 1 in the journal recommended by HCC 9.

Камиль Абдулович
Эфендиев
Kamil A. Efendiev

Сведения об авторе: канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры физики ДГТУ.

Образование: Дагестанский гос. университет (1979).

Область научных интересов: физика, энергетика, газовая электроника.

Публикации: 40, в том числе 7 в изданиях из перечня ВАК.

Information about the author: candidate of physical and mathematical sciences, docent of the DSTU physics department.

Education: Dagestan State University (1979).

Research area: physics, energetics, gas electronics.

Publications: 40, including 7 in the journals recommended by HCC.

Людмила
Магомеднабиевна
Ахмедова
Lyudmila M. Akhmedova

Сведения об авторе: старший преподаватель кафедры физики ДГТУ.

Образование: Дагестанский гос. университет (1974).

Область научных интересов: физика, энергетика, в том числе возобновляемая.

Публикации: 20.

Information about the author: senior lecturer of DSTU physics department.

Education: Dagestan State University (1974).

Research area: physics, energetics, including renewable.

Publications: 20

За последние десятилетия в мире возрос интерес к альтернативным источникам возобновляемой в природе энергии: солнечной, геотермальной, ветровой и др. Надо отметить, что этот интерес вызван не только из-за ежегодного роста цен на традиционные виды топлива (нефть, уголь, газ) и прогнозных данных по истощению в обозримом будущем их запасов. Он вызван также необходимостью решения вопросов защиты окружающей среды от загрязнения и возможных техногенных катастроф. По этим причинам во многих странах мира ориентируются на рациональное сочетание традиционных источников энергии с возобновляемыми. При этом среди возобновляемых источников энергии глубинное тепло Земли занимает не последнее место. Достаточно назвать такие страны, как Исландия, Филиппины, Новая Зеландия, Индонезия, США, Италия и др., где имеются колоссальные тепловые ресурсы, залегающие в сравнительно неглубоких пластах земной коры.

Из известных в мире типов месторождений глубинного тепла Земли (гидротермы, парогидротермы, термоаномальные и петрогеотермальные зоны) на сегодняшний день только гидротермы и парогидротермы используются для получения электрической (150 °C и более) и тепловой (30-150 °C) энергии. В России разведано более 60 гидротермальных месторождений с температурой воды от 40 до 250 °C, залегающих на глубинах до 3000 м. Расчеты показывают, что прогнозные запасы этих месторождений составляют 21-22 млн м³/сут., что соответствует сжиганию около 40 млн т у.т. в год [1].

В зависимости от условий формирования, а также химического и газового состава геотермальные воды разделяют на углекислые, сероводородные, азотные, сероводородно-углекислые, азотно-углекислые, метановые и азотно-метановые. Геотермальные воды Кавказа относят к метановым. В России метановые

воды распространены также в нефтегазоносных артезианских бассейнах Русской и Сибирской платформ, Западно-Сибирской низменности, на Сахалине и в ряде других районов [2, 3]. Их минерализация варьируется в пределах от единиц до 400 г/л. По составу они подразделяются на гидрокарбонатно-хлоридные, хлоридно-натриевые и гидрокарбонатно-натриевые. Химический состав этих вод представлен в основном ионами Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻, HCO₃⁻, SO₄²⁻, с преимущественным содержанием ионов Na⁺ и Cl⁻. В газовом составе преобладает метан CH₄, CO₂, N₂ и H₂S. При использовании этих вод в оборудовании геотермальных систем наблюдаются отложения, в основном, малорастворимой соли CaCO₃.

По степени изученности растворенных газов в водах геотермальных месторождений в нашей стране Предкавказье занимает особое место. Здесь в течение нескольких десятков лет проводились отборы проб воды в скважинах, пробуренных на поиски нефти и газа. Исследования, проводимые на разных скважинах в течение ряда лет, показали, что в составе водкумского горизонта (глубина залегания 1300-1400 м с чередованием алевролитов, содержащих газ) преобладает метан (70-90%). Тяжелые углеводороды составляют в среднем 2,6-9,5%. Углекислого газа содержится 3-6%, азота 1-4%. В зависимости от глубин газовые факторы составляют от 1 до 5 м³/м³. На больших глубинах (4000 м и более) предполагается наличие газодыхательных смесей с высокими газовыми факторами [4]. Газовый фактор скважин Северного Кавказа в среднем составляет 1-3 м³/м³. В таблице, для примера, представлены данные по химическому и газовому составу вод некоторых скважин месторождений Махачкала-Тернаир и Кизляр (Республика Дагестан) с горизонта чокрак (глубина залегания от 1900 до 3000 м).

Исходные значения величин, входящих в компонентный состав вод некоторых скважин месторождений Кизляр и Махачкала-Тернаир

Original values including into the water composition of some wells of Kizlyar and Makhachkala-Ternair deposits

Параметр	№ скважины						
	3Т	4Т	5Т	17Т	19Т	27Т	28Т
Концентрация, мг/л							
Na ⁺	2260	5800	2540	2420	5240	8640	8820
Ca ²⁺	160	170	50	28	540	104	95
Mg ²⁺	40	47	11	17	127	82	40
Cl ⁻	3550	8870	3030	3010	9040	12800	12900
HCO ₃ ⁻	390	720	1070	1080	390	1450	1700
SO ₄ ²⁻	150	125	180	270	200	143	120
CO ₃ ²⁻	-	-	-	-	-	-	-
Минерализация, мг/л	6580	15800	6950	6830	15540	23220	23650
Температура воды в устье, °C	103	101	103	100	100	100	100
Газосодержание, м ³ /м ³	1,2	1,4	1,1	1	1	1	1,2
CO ₂ , %	18	21	14	12	14	13	17
N ₂ +CH ₄ , %	82	79	86	83	84	87	83

Попытки частичной утилизации попутных горючих газов из метановых вод при газовом факторе менее $2-3 \text{ м}^3/\text{м}^3$ на практике наталкиваются на проблемы неоправданных расходов их синтеза, сушки, сбора и т.д. По этой причине газ, освобожденный из воды скважин с газовым фактором менее $2-3 \text{ м}^3/\text{м}^3$, сжигается на факеле, который в случае большой концентрации углекислого газа, а также азота в общей смеси газов горит нестабильно. По скромным подсчетам (проведенным на основе газового анализа и дебита скважины), выход метана на приведенных выше скважинах составляет в среднем около $1000-2000 \text{ м}^3/\text{сут}$.

С другой стороны, попытки извлечения максимального количества попутных газов из геотермальных вод приводят к дополнительным затратам, связанным с предотвращением твердых отложений на поверхности эксплуатируемого оборудования. Причина – нарушение химического равновесия между растворенными в воде компонентами. В частности, уменьшение парциального давления CO_2 одновременно с уменьшением общего давления в системе приводит к нарушению карбонатно-кальциевого равновесия в растворе воды и осаждению твердой фазы CaCO_3 на поверхности оборудования [5]. Особенно остро ощущается эта проблема при использовании высокопотенциальных геотермальных вод (при температуре воды выше $120-150^\circ\text{C}$). Для предотвращения карбонатных отложений в оборудовании геотермальных систем в этом случае приходится поддерживать высокое давление, как, к примеру, на месторождениях Каясула в Ставропольском крае (2 МПа), Тарумовская площадь в Республике Дагестан (10 МПа), что в общем снижает эффективность использования геотермальных скважин.

В то же время практика показывает, что частичное решение этой задачи возможно путем подбора режимов эксплуатации теплоэнергетического оборудования [6, 7]. При этом эксплуатацию оборудования можно осуществить в следующих вариантах:

- при уменьшении концентрации углекислого газа в воде в ходе снижения общего давления в системе;
- при принудительной декарбонизации воды в процессе ее подготовки к использованию;
- за счет использования новых технических и технологических решений.

При этом необходимо придерживаться равновесных параметров воды используемых скважин [7], а также учитывать растворимость газов в воде.

На рис. 1 представлено примерное сочетание давления и температуры вод скважин месторождений Кизляр и Махачкала-Тернаир, при которых вода не растворяет и не выделяет твердый CaCO_3 .

Для оценки возможности утилизации газов при снижении давления до 0,1 МПа на рис. 2 дается также и растворимость некоторых газов в воде с температурой. Как видно из рис. 2, наименьшую растворимость имеют H_2 , CH_4 и N_2 , в то время как CO_2 и H_2S имеют растворимость на два порядка выше по сравнению с ними.

Рис. 1. Примерное сочетание равновесных значений давления и температуры для вод геотермальных месторождений Кизляр и Махачкала-Тернаир с горизонта чокрак (Республика Дагестан)

Fig. 1. Exemplary combination of the equilibrium values of pressure and temperature for geothermal water deposits Kizlyar and Makhachkala-Ternair

Рис. 2. Растворимость некоторых газов с температурой при давлении 0,1 МПа

Fig. 2. The solubility of some gases with temperature at pressure of 0.1 МПа

Данное свойство газов можно использовать для их разделения по мере уменьшения общего давления в оборудовании над раствором. Такой ход процесса позволяет разрабатывать геотермальные установки для частичной реализации варианта эксплуатации геотермальных систем с утилизацией попутных горючих газов. На рис. 3 представлена схема энергетической установки по утилизации тепловой энергии геотермальных вод и попутных с ними горючих газов.

Рис. 3. Геотермальная система по утилизации теплоты и попутных горючих газов среднепотенциальных геотермальных вод:

- 1 и 12 – добычная и нагнетательная скважины;
2 – дегазатор; 3 – сепаратор; 4 – резервуар для сбора горючих газов; 5 и 6 – компрессор и газовая турбина;
7, 8 – теплообменники отопления и горячей воды;
9 – емкость для отстоя отработанной воды и дополнительного сбора горючего газа; 10 – подача горючего газа в сборную емкость; 11 – подача CO₂ обратно в пласт;
13 – аварийный сброс на свечу

Fig. 3. Geothermal system for heat utilization and associated combustible gases average potential geothermal waters:
1 and 12 – production and injection wells; 2 – degasser; 3 – separator; 4 – tank for the collection of combustible gases; 5 and 6 – compressor and gas turbine;
7, 8 – heating and hot water heat exchangers; 9 – tank for waste water and sludge-collecting of combustible gas; 10 – supply of combustible gas into the tank; 11 – CO₂ back into the reservoir;
13 – alarm dump to the candle

Путем снижения общего давления (не ниже уровня равновесной линии насыщения воды CaCO₃ согласно рис. 1) в дегазаторе 2 и сепараторе 3 можно частично утилизировать H₂ и CH₄. Контроль солевых отложений в оборудовании можно производить, как показала практика, по методикам, представленным в работах [8, 9]. В результате снижения давления до примерно 0,1 МПа на выходе из теплообменников 7 и 8 в емкости 9 можно утилизировать и оставшийся горючий газ при температуре воды 30-45 °С. Однако, сравнивая растворимость газа при разных температурах (рис. 2) и учитывая закон Генри, можно сделать вывод, что полностью утилизировать попутные горючие газы в этих устройствах невозможно.

При вынужденной декарбонизации воды с использованием затравочных кристаллов [10-13] имеется возможность более эффективно утилизировать горючие газы (рис. 4). При температуре 100 °С и давлении 0,1 МПа газы имеют наименьшую раство-

римость, что создает условия для максимального выхода их из воды. Из дегазатора 2 газы проходят через конденсатор 5 к потребителю 6, освободившись от паров воды. А геотермальная вода, после обработки затравочными кристаллами в дегазаторе 2, подается через отстойник 3 в теплообменник 10, во второй контур которого поступает предварительно подогретая в конденсаторе 5 вода из магистрального водопровода. Недостатками этого варианта являются частичная потеря теплового потенциала геотермальной воды и полная потеря ее потенциальной энергии, созданной избыточным давлением.

Рис. 4. Схема энергетической установки с принудительной декарбонизацией воды: 1 и 9 – добычная и нагнетательная скважины; 2 – дегазатор; 3 – отстойник; 4, 7 – насосы; 5 – конденсатор; 6 и 10 – потребители газа и тепловой энергии геотермальной воды; 8 – линия подачи CO₂ в скважину

Fig. 4. The diagram of the power plant with forced water decarbonization: 1 and 9 – production and injection wells; 2 – degasser; 3 – sump; 4, 7 – pumps; 5 – condenser; 6 and 10 – gas consumers and geothermal water thermal energy; 8 – the CO₂ supply line into the well

Во всех этих схемах для предотвращения когматации пласта частицами взвеси твердого CaCO₃ используется закачка продуктов сгорания попутных горючих газов через нагнетательную скважину.

Примерный расчет выхода метана из геотермальной воды горизонта чокрак на скважинах Кизляра и Махачкалы показывает, что в варианте эксплуатации энергетического оборудования по схеме на рис. 4 можно утилизировать метана в 1,3 раза больше, чем при других вариантах. Исходя из данных, полученных Пятигорским НИИ курортологии и физиотерапии, по анализу газового состава в последнем варианте на одной скважине при дебите геотермальной воды около 3000 м³/сут можно получить ориентировочно около 1500 м³ метана в сутки [7].

Выводы

Наличие на территории России большого потенциала ресурсов гидротермальных месторождений с газовым фактором 1-3 м³/м³ требует разработки новых технических и технологических решений для их эффективного использования. При решении вопросов использования теплового потенциала геотермальных вод вместе с утилизацией попутных с ними

горючих газов целесообразно, как показали исследования, учитывать особенности эксплуатации энергетического оборудования геотермальных систем в режиме без солеотложения. Это использование метода затравочных кристаллов, учет равновесных параметров растворов геотермальных вод, неразру-

шающий контроль твердых отложений на поверхности оборудования, основанный на определении электрического сопротивления раствора воды и отложений, очистка и закачка отработанных вод обратно в водоносный горизонт вместе с продуктами сгорания попутных газов.

Список литературы

1. Бранчугов В.К., Гаврилов Е.И., Гарипов В.З., Козловский Е.А., Краев А.Г., Литвиненко В.С. и др. Минерально-сырьевая база топливно-энергетического комплекса России. Состояние и прогноз. М.: Институт геолого-экономических проблем, 2004.
2. Геотермальное теплоснабжение жилых и общественных зданий и сооружений. ВСН 56-87. Нормы проектирования. М.: Стройиздат, 1989.
3. Ахмедов Г.Я. Защита геотермальных систем от карбонатных отложений. М.: Научный мир, 2012.
4. Акулиничев Б.П., Панченко А.С., Пугачева М.Ф. Водорастворенные газы Предкавказья и проблемы их использования в народном хозяйстве // Ресурсы нетрадиционного газового сырья и проблемы его освоения. Ленинград, 1990. С. 138-144.
5. Ахмедов Г.Я. Твердые отложения карбоната кальция в геотермальных системах // Альтернативная энергетика и экология – ISJAEЕ. 2010. № 11. С. 81-86.
6. Ахмедов Г.Я. Работа геотермальных систем теплоснабжения в режиме без солеотложения // Промышленная энергетика. 2010. № 4. С. 54-59.
7. Ахмедов Г.Я. К вопросу об эксплуатации энергетических систем в условиях декарбонизации геотермальных вод // Вестник Дагестанского государственного технического университета // Технические науки. 2013. № 28. С. 63-69.
8. Ахмедов Г.Я. Измерение толщины солеотложения в геотермальных системах // Ползуновский вестник. 2011. № 3/1. С. 175-178.
9. Ахмедов Г.Я. О некоторых методах контроля солеотложения в геотермальной энергетике // Промышленная энергетика. 2010. № 6. С. 58-62.
10. Ахмедов Г.Я. Повышение эффективности использования геотермальной воды для горячего водоснабжения // Водоснабжение и санитарная техника. 2010. № 2. С. 18-23.
11. Ахмедов Г.Я. Защита геотермальных систем водоподготовки от карбонатных отложений // Энергосбережение и водоподготовка. 2010. № 6. С. 18-21.
12. Ахмедов Г.Я. Стабилизационная обработка геотермальных вод // Водоснабжение и санитарная техника. 2010. № 6. С. 33-38.
13. Ахмедов Р.Б., Новиков Б.Е., Ахмедов Г.Я. Исследование метода предотвращения отложений солей в геотермальных системах путем рециркуляции затравочных частиц // Промышленная энергетика. 1986. №11. С. 41-43.

References

1. Brančugov V.K., Gavrilov E.I., Garipov V.Z., Kozlovskij E.A., Kraev A.G., Litvinenko V.S. i dr. Mineral'no-syr'evaâ baza toplivno-ènergetičeskogo kompleksa Rossii. Sostoânie i prognoz. M.: Institut geologo-èkonomičeskikh problem, 2004.
2. Geotermal'noe teplohlosnabženie žilyh i obšestvennyh zdaniy i sooruzhenij. VSN 56-87. Normy proektirovaniâ. M.: Strojizdat, 1989.
3. Ahmedov G.Â. Zašita geotermal'nyh sistem ot karbonatnyh otloženij. M.: Naučnyj mir, 2012.
4. Akulinčev B.P., Pančenko A.S., Pugačeva M.F. Vodorastvorennnye gazy Predkavkaz'â i problemy ih ispol'zovaniâ v narodnom hozâjstve // Resursy netradicionnogo gazovogo syr'â i problemy ego osvoeniâ. Leningrad, 1990. S. 138-144.
5. Ahmedov G.Â. Tverdye otloženîa karbonata kal'ciâ v geotermal'nyh sistemah // Al'ternativnââ ènergetika i èkologiâ – ISJAEЕ. 2010. № 11. S. 81-86.
6. Ahmedov G.Â. Rabota geotermal'nyh sistem teplosnabženiâ v režime bez soleotloženîa // Promyšlennââ ènergetika. 2010. № 4. S. 54-59.
7. Ahmedov G.Â. K voprosu ob èkspluatácii ènergetičeskikh sistem v usloviâh dekarbonizacii geotermal'nyh vod // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta // Tehničeskije nauki. 2013. № 28. S. 63-69.
8. Ahmedov G.Â. Izmerenie tolšiny soleotloženîa v geotermal'nyh sistemah // Polzunovskij vestnik. 2011. № 3/1. S. 175-178.
9. Ahmedov G.Â. O nekotoryh metodah kontrolâ soleotloženîa v geotermal'noj ènergetike // Promyšlennââ ènergetika. 2010. № 6. S. 58-62.
10. Ahmedov G.Â. Povyšenie èffektivnosti ispol'zovaniâ geotermal'noj vody dlâ gorâčego vodosnab-ženiâ // Vodosnabženie i sanitarnââ tehnika. 2010. № 2. S. 18-23.
11. Ahmedov G.Â. Zašita geotermal'nyh sistem vodopodgotovki ot karbonatnyh otloženij // Ènergo-sbereženie i vodopodgotovka. 2010. № 6. S. 18-21.
12. Ahmedov G.Â. Stabilizacionnââ obrabotka geotermal'nyh vod // Vodosnabženie i sanitarnââ tehnika. 2010. № 6. S. 33-38.
13. Ahmedov R.B., Novikov B.E., Ahmedov G.Â. Issledovanie metoda predotvrašeniâ otloženij solej v geotermal'nyh sistemah putem recirkulâcii zatravočnyh častic // Promyšlennââ ènergetika. 1986. №11. S. 41-43.

Транслитерация по ISO 9:1995