

МЕЛИОРАЦИЯ И ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ

УДК 628.162: 621.482

Ахмедов Г.Я.

К ВОПРОСУ ОБ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ ДЕКАРБОНИЗАЦИИ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ВОД

Akhmedov G.Ya.

TO THE PROBLEM ABOUT OPERATION OF ENERGY SYSTEMS IN CONDITIONS OF EXTRACTION OF CARBON DIOXIDE FROM GEOTHERMAL WATERS

Использование средне – и высокопотенциальных геотермальных вод часто сопровождается нарушением карбонатно-кальциевого равновесия в них и образованием твердой фазы карбоната кальция на поверхности энергетического оборудования. В статье рассмотрены различные варианты геотермальных систем, позволяющие эксплуатировать энергетическое оборудование в режиме без солеотложения в условиях декарбонизации геотермальных вод и максимальной утилизации сопутствующих горючих газов.

Ключевые слова: геотермальная вода, карбонат кальция, декарбонизация, утилизация, сопутствующие горючие газы

Use moderate- and hot - potential geothermal waters is frequently accompanied by infringement of carbonate calcium balance in them and formation of a firm phase of the calcium carbonate on a surface of the energy equipment. The paper considers the various variants of geothermal systems allowing to maintain the energy equipment in a mode without salt depositing in conditions of extraction of carbon dioxide from geothermal waters and the maximal extraction of combustible gases.

Key words: geothermal water, calcium carbonate, of extraction of carbon dioxide, of extraction combustible gases

При эксплуатации геотермальных энергетических систем, содержащих теплообменники, дегазаторы, расширители ГеоТЭС, отстойники, а также оборудование для транспортировки теплоты в большинстве случаев необходимо учитывать условия, возникающие в процессе декарбонизации геотермальных вод. Процесс декарбонизации, то есть удаление из воды свободного диоксида углерода CO_2 , осуществляется одновременно с выходом геотермальной воды на поверхность Земли вследствие снижения общего давления над раствором воды. В то же время, снижение концентрации CO_2 в геотермальной воде действует как положительный фактор, приводящий к снижению коррозии наземного оборудования и увеличению дебита скважины, т.к. уменьшается общее давление в устье скважины. Одновременно происходит и выход горючих газов: водород H_2 , метан CH_4 , сероводород H_2S .

Однако снижение общего давления в оборудовании геотермальных систем может произойти и до уровня, при котором возможно нарушение карбонатно-кальциевого равновесия в растворе геотермальной воды, следствием которого является отложение твердой фазы карбоната кальция на поверхности энергетического оборудования. Особенно остро ощущается проблема нарушения карбонатно-кальциевого равновесия в растворе высокопотенциальных геотермальных вод (при температуре воды более 100 °C). В данном случае приходится поддерживать высокое давление в системе для

предотвращения нарушения карбонатно-кальциевого равновесия. К примеру, для месторождения Каясула 3 (Ставропольский край) при температуре 151 °С и давлении ниже 2 МПа идут отложения твердой фазы карбоната кальция, на Тарумовской площади (Республика Дагестан) отложения твердой фазы карбоната кальция при температуре воды 175 °С начинаются уже при давлении ниже 10 МПа. В связи с этим при расчете рабочих параметров оборудования энергетических систем необходимо учитывать эти особенности и согласовать возможность защиты оборудования энергетических систем от карбонатных отложений при декарбонизации геотермальной воды и одновременной утилизации горючих газов.

Эксплуатация оборудования геотермальных систем может происходить в двух вариантах:

- при неизбежном процессе декарбонизации геотермальных вод в ходе естественного снижения общего давления в системе;
- при принудительной декарбонизации геотермальной воды при ее подготовке к использованию.

В первом варианте, как наиболее часто имеющем место на практике, необходимо учитывать равновесные параметры давления P и температуры t используемой геотермальной воды, при которых она не растворяет и не выделяет твердую фазу карбоната кальция [1]. С точки зрения энергетической эффективности использования источников геотермальных вод немаловажную роль играет и утилизация содержащихся в них горючих газов. Газосодержание ГС определяется как сумма газового фактора ГФ (спонтанная часть) и газонасыщенности ГН (растворенная часть) геотермальной воды сопутствующими газами

$$ГС = ГФ / 22,4 + ГН \quad (\text{моль/л}) \quad (1)$$

Согласно закону Дальтона давление спонтанного газа состоит из суммы парциальных давлений P_i отдельных газов и давления насыщенных паров воды при данных условиях (давления P и температуры t воды)

$$P = \sum_{i=1}^n P_i + P_{H_2O} \quad (2)$$

Концентрация растворенного газа i – того компонента (газонасыщенность) определяем согласно закону Генри

$$ГН_i = K_i \cdot P_i \quad (3)$$

где K_i и P_i - соответственно, константа Генри (моль/(л·Па)) и парциальное давление i – того компонента газа (Па).

Если мольную долю i – того компонента газа обозначить через α_i , то газосодержание его в воде можно представить в виде

$$ГС_i = ГФ\alpha_i / 22,4 + K_i \cdot \alpha_i (P - P_{H_2O}) \quad (4)$$

Используя свойство неодинаковой растворимости различных газов в воде (см. рис.1), можно обеспечить разделение их по мере уменьшения общего давления над раствором. Снижение давления происходит при выходе раствора геотермальной воды на поверхность Земли по стволу скважины и перемещении его в наземном оборудовании геотермальных систем. Решение этой задачи требует нахождения зависимости парциального давления отдельного газа (соответственно, и растворимости его в воде по закону Генри) от общего давления в системе. При этом предполагается, что изменение парциальных давлений компонентов пропорционально изменению общего давления. Для геотермальных вод, в связи с их минерализованностью при решении данной задачи необходимо вносить

соответствующие поправки согласно закону Сеченова (растворимость газов в жидкостях в присутствии электролитов понижается).

Надо отметить, что если растворение газа в жидкости связано с процессами диссоциации молекул растворенного газа (CO_2 , H_2S), то закон Генри при расчетах можно использовать при невысоких давлениях. При высоких давлениях (более 0,3 – 0,5 МПа) закон Генри можно применять с учетом связи между отдельными компонентами в растворе воды и выражением их через общую концентрацию. Однако это уже сложным образом связано с давлением газа над раствором. То же самое относится и к неодинаковому изменению растворимости различных газов с ростом общего давления. Это различие определяется взаимным влиянием растворенных газов в воде. При низких давлениях взаимное влияние отдельных компонентов смеси газов невелико. В этом случае закон Генри можно применить для каждого газа в отдельности [2].

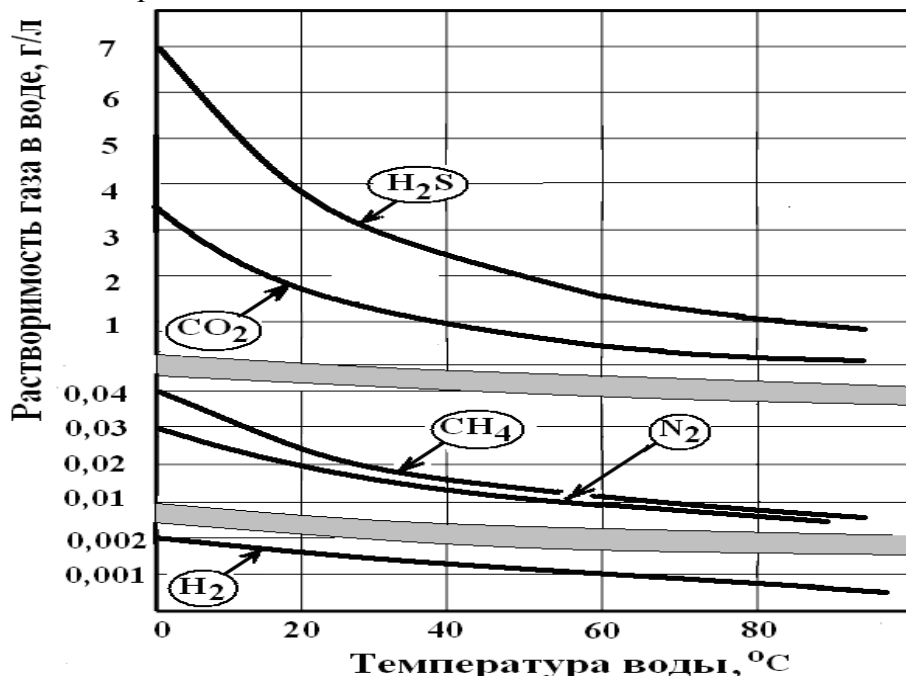


Рисунок 1 - Растворимость некоторых газов в воде при давлении в 0,1 МПа

С учетом приведенных выше допущений (при невысоких давлениях газов над раствором воды) расчет зависимости парциального давления отдельного газа от общего давления в системе можно выполнить по следующей схеме.

Пусть имеем смесь газов из n компонентов. Все они занимают один и тот же объем V . Для i -го компонента количество молей в единице объема будет v_i/V . Тогда общее количество молей смеси газов в 1 м^3 будет

$$\frac{v}{V} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n v_i\right)}{V} \quad (5)$$

При контакте этой смеси с пластовой водой часть ее растворится согласно закону Генри

$$\frac{\Delta v_i}{V} = K_i \cdot P_i \quad (6)$$

где K_i – константа Генри для i -го компонента газа, моль/($\text{м}^3 \cdot \text{Па}$).

Уравнение Клапейрона-Менделеева для i -го компонента газа в газовой среде будет

$$P_i \cdot V = (v_i - K_i \cdot P_i \cdot V)RT \quad (7)$$

Из уравнения (7) получим выражение для объема, занимаемого i - компонентом газа в газовой смеси

$$V = (v_i \cdot RT / (P_i + K_i \cdot P_i \cdot RT)) \quad (8)$$

Приравнявая друг другу выражения (8) для разных компонентов газа, получим систему уравнений соответственно количеству компонентов газа

$$(v_i \cdot RT / (P_i + K_i \cdot P_i \cdot RT)) = (v_{i+1} \cdot RT / (P_{i+1} + K_{i+1} \cdot P_{i+1} \cdot RT)) \quad (9)$$

Решая систему этих уравнений с учетом закона Дальтона (2), можно определить зависимость парциальных давлений компонентов газовой смеси от общего давления для воды конкретной скважины. Такая зависимость дает возможность оценки стабильности геотермальной воды (зависимость равновесного значения парциального давления углекислого газа CO_2 от общего давления в системе при различных температурах). В то же время эта зависимость дает оценку возможности утилизации горючих газов при тех или иных параметрах давления и температуры геотермальной воды. Зная мольную долю α_i газового компонента при определенной температуре воды, можно по уравнению (4) найти газосодержание его в данной воде при известном значении общего давления в системе.

На рис.2 представлена проектная схема энергетической системы по выработке электрической и тепловой энергии при использовании среднетенциальных геотермальных вод (до 100 - 110 °C).

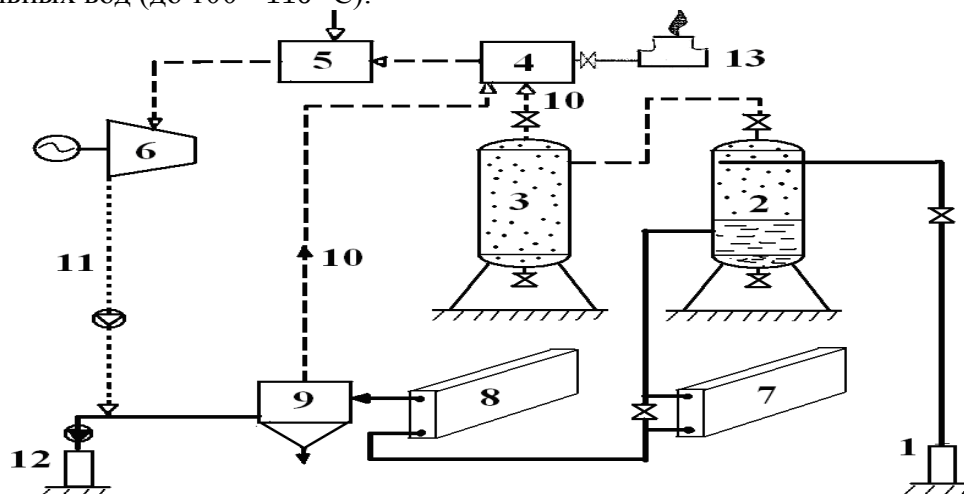


Рисунок 2 - Проектная схема энергетической системы по выработке электрической и тепловой энергии при использовании среднетенциальных геотермальных вод:

1, 12 - добычная и нагнетательная скважины; 2 - дегазатор; 3 - сепаратор; 4 - сборная емкость для горючих газов; 5, 6 - компрессор и газовая турбина; 7, 8 - теплообменники отопления и горячего водоснабжения; 9 - емкость для отстоя отработанной воды и дополнительного сбора горючего газа, 10 - линии подачи горючего газа в сборную емкость; 11 - линия подачи углекислого газа в отработанную геотермальную воду перед закачкой ее обратно в пласт

Путем ступенчатого снижения общего давления в дегазаторе 3 и сепараторе 4 можно утилизировать малорастворимые в воде водород H_2 и метан CH_4 , как наиболее часто встречающиеся компоненты газовой смеси в геотермальной воде. В то же время в этих устройствах давление и температуру воды необходимо поддерживать на уровне не ниже равновесной линии насыщения ее карбонатом кальция [1, 3, 4]. В связи с этим удаление из воды компонентов газовой смеси происходит частично. Во избежание выпадения из раствора геотермальной воды твердой фазы карбоната кальция аналогичное состояние

раствора данной воды необходимо поддерживать и в теплообменниках отопления 7 и горячего водоснабжения 8. После выхода геотермальной воды из теплообменников ее необходимо очистить от грубодисперсной твердой фазы отстоем в емкости 9 и растворить в ней твердые частицы карбоната кальция углекислым газом из газовой турбины 6 перед закачкой обратно в пласт. Как показано на рис. 2, после емкости 9 перед скважиной закачки углекислый газ подводится насосом принудительно.

В связи с необходимостью поддерживать высокое давление в дегазаторе 2 и сепараторе 3 во избежание нарушения карбонатно-кальциевого равновесия в растворе геотермальной воды полностью утилизировать попутные горючие газы в этих устройствах не удастся. По мере снижения давления до, примерно, 0,1 МПа на выходе из теплообменников 7 и 8 в емкости 9 можно утилизировать и оставшийся горючий газ. Сравнение растворимости газов при разных температурах (см. рис.1) и с учетом растворимости газов пропорционально давлению согласно закону Генри, можно сделать вывод о возможности дополнительного отбора горючих газов в емкости 9 при давлении 0,1 МПа и температуре воды примерно, 35 - 40 °С.

В последнее время в геотермальной энергетике возрос интерес к выработке электрической энергии в комбинированной геотермальной энергетической установке с бинарной ГеоЭС. Такие установки с использованием низкокипящих теплоносителей эффективно работают на источниках среднетемпературных геотермальных вод (до 100 – 110 °С) [5]. На рис.3 дается схема такой установки, работающей на изобутане, используемого в качестве теплоносителя бинарной ГЭС.

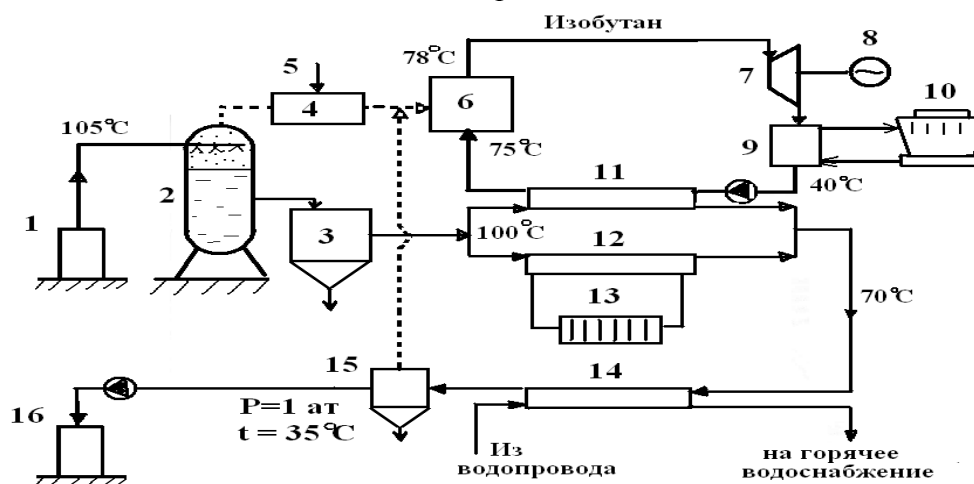


Рисунок 3 - Комбинированная геотермальная энергетическая установка с бинарной ГеоЭС: 1, 16 - добычная и нагнетательная скважины; 2 дегазатор; 3 – отстойник; 4 – компрессор; 5 – подвод газа из магистрального газопровода; 6 – теплообменник – расширитель изобутана; 7, 8 – турбина и электрогенератор; 9, 10 – конденсатор и градирня; 11 – теплообменник в системе циркуляции изобутана; 12 и 14 – теплообменники отопления и горячего водоснабжения; 13 - отопительная система; 15 – емкость для отстоя отработанной воды и съема оставшегося горючего газа

Опасность отложений имеет место в дегазаторе 2, в отстойнике 3 и в теплообменниках 11 и 12. Декарбонизацию геотермальной воды в этих устройствах можно осуществить путем снижения общего давления в них до значения, соответствующего равновесному значению при данной температуре. Утилизацию горючих газов можно осуществить в два этапа: при температуре 100 – 105 °С и давлении не ниже равновесного значения и перед закачкой отработанной воды при снижении давления до 0,1 МПа в емкости 15. Для геотермальных скважин месторождений Кизляр (г. Кизляр) и Тернаир (г. Махачкала) при давлении над раствором геотермальных вод в 0,1 МПа равновесие наступает при температуре, примерно, 70 - 75 °С.

На рис. 4 представлена схема эффективного использования среднетемпературных геотермальных вод для выработки электрической и тепловой энергии на примере геотермальной термораспределительной станции, планирующей внедрить на геотермальных скважинах г. Кизляра [6]. Для вод скважин г. Кизляра при температуре воды 104 °С равновесное давление около 0,4 МПа. Для исключения отложения карбоната кальция в оборудовании термораспределительной станции необходимо придерживаться этих параметров. С уменьшением температуры равновесное значение общего давления снижается. К примеру, при температуре воды 90 °С (перед теплообменником отопления, см. рис.4) равновесное давление снижается до 0,2 – 0,25 МПа. Опасность образования твердой фазы карбоната кальция возрастает при нагревании этой воды в котельной до температуры более 104 °С. В данном случае (115 °С воды, как показано на рис. 4) общее давление в системе необходимо поднять до 0,6 - 0,7 МПа. Дополнительную утилизацию попутных горючих газов целесообразно осуществить при снижении общего давления в системе над раствором геотермальной воды до 0,1 МПа. С этой целью в схему энергетических устройств необходимо включить емкость по сбору горючих газов непосредственно после теплообменника горячего водоснабжения.

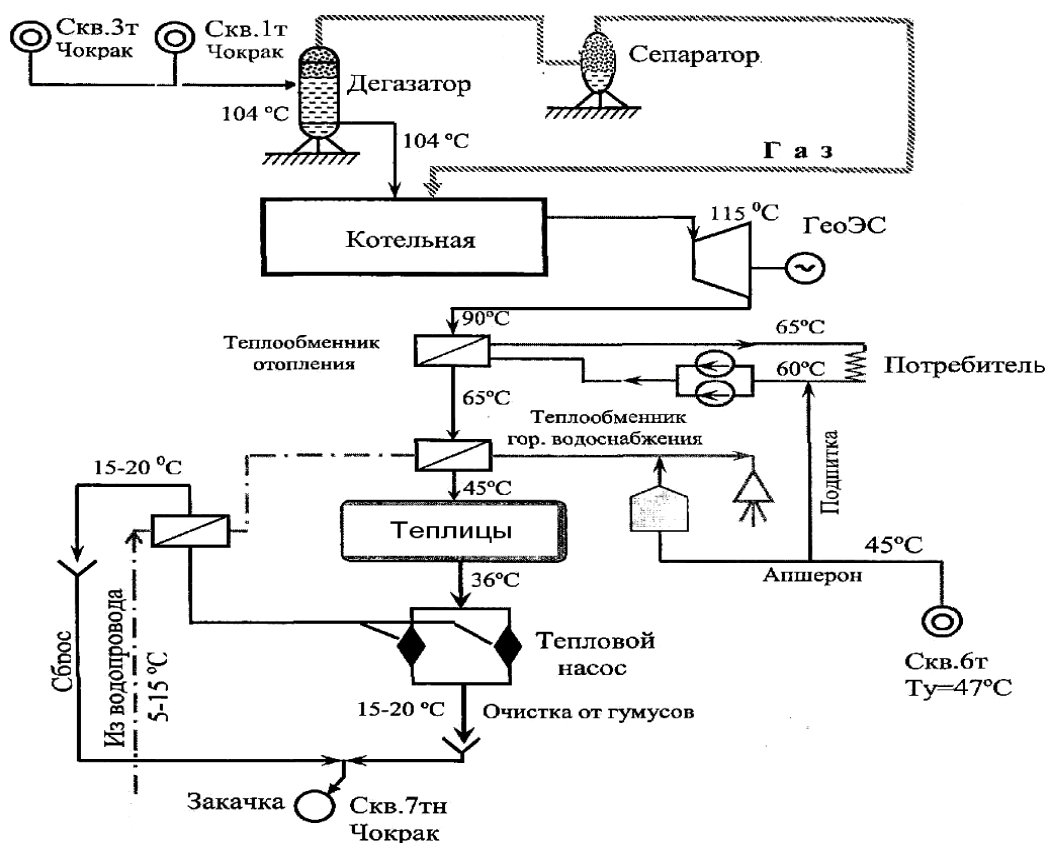


Рисунок 4 - Проект геотермальной термораспределительной станции в г. Кизляре

Второй вариант – это принудительная декарбонизация геотермальной воды с использованием затравочных кристаллов [7, 8, 9] для ее подготовки перед подачей к потребителю (рис.5). В данном случае имеется возможность произвести более глубокую декарбонизацию геотермальных вод и, одновременно, более эффективно утилизировать горючие газы (рис.1). После стабилизационной обработки воду можно подавать насосом к потребителю. В этом случае мы теряем небольшую часть теплового потенциала воды и полностью ее потенциальную энергию за счет снятия избыточного давления (см. рис.5).

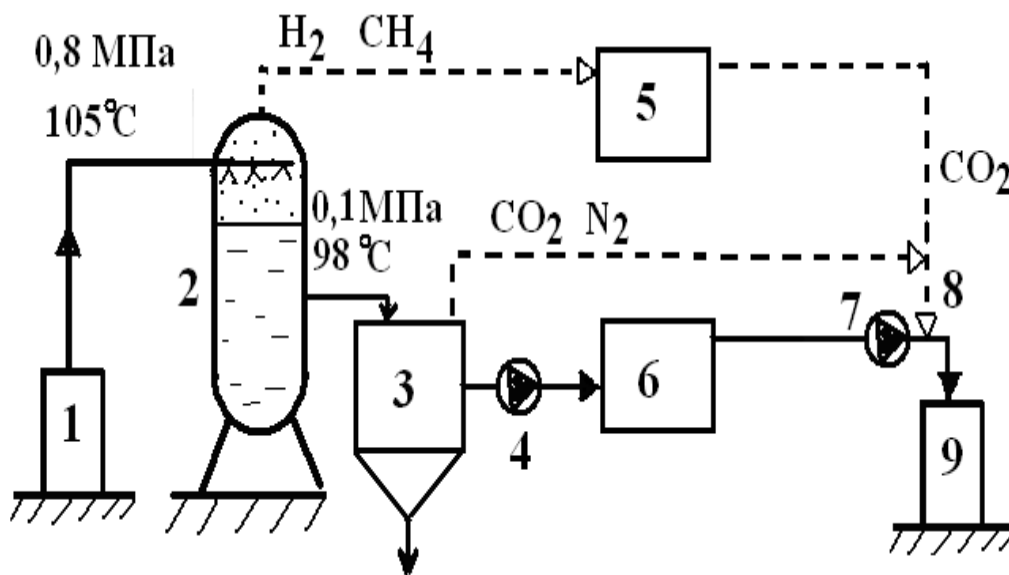


Рисунок 5 - Схема энергетической системы с глубокой декарбонизацией геотермальной воды: 1 и 9 –добычная и нагнетательная скважины; 2 и 3- дегазатор и отстойник; 4 и 7 – насосы; 5 и 6 – потребители газа и тепла геотермальной воды; 8 – линия подачи CO₂ в скважину

Расчет выхода метана из геотермальной воды горизонта чокрак на скважинах г. Кизляра показывает, что во втором варианте эксплуатации энергетического оборудования с сохранением равновесных параметров воды (по рис. 2, 3 и 4) можно утилизировать метан в 1,3 раза больше, чем при первом. Исходя из данных, полученных Пятигорским НИИ курортологии и физиотерапии [6], по анализу газового состава во втором варианте на одной скважине при дебите геотермальной воды 2000 м³/сут можно получить, ориентировочно, около 1000 м³ метана в сутки.

Библиографический список:

1. Ахмедов Г.Я. Проблемы солеотложения при использовании геотермальных вод для горячего теплоснабжения//Промышленная энергетика.- 2009.- № 9.- С. 50-54.
2. Намиот А.Ю. Растворимость газов в воде: Справочное пособие.- М.: Недра, 1991.- 167 с.
3. Пат. 91384 РФ, МПК F03G 7/00. Геотермальная установка /Ахмедов Г.Я. Оpubл. 10.02.2010. Бюл. № 4.- 2 с.
4. Пат. 2406944 РФ, МПК F24J 3/08. Геотермальное устройство /Ахмедов Г.Я. Оpubл. 20.12.2010. Бюл. № 35.- 4 с.
5. Алхасов А.Б. Геотермальная энергетика: Проблемы, ресурсы, технологии. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008.- 276 с.
6. Инвестиционные проекты (Использование тепла Земли). Предложения для сотрудничества.- Махачкала: ОАО ТЭК «Геотермнефтегаз», Институт проблем геотермии ДНЦ РАН, 2005. –Вып. 1.- 135 с.
7. Ахмедов Р.Б., Новиков Б.Е., Ахмедов Г.Я. Стабилизационная обработка геотермальной воды путем ввода затравочных частиц //Промышленная энергетика.- 1985.- №10.- С. 61-64.
8. 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.
9. А.с. 1327918, МКИ В 01 Д 21/24, 3/02. Устройство для очистки жидкости /Ахмедов Р.Б., Новиков Б.Е., Ахмедов Г.Я., Ромм Ф.А. Оpubл. 1987. Бюл.№ 29.