

УДК 620.91

А. Ф. РЕДЬКО, д-р техн. наук, профессор

А. А. ОНИЩЕНКО, аспирант

Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, г. Харьков

МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ СОЛЕОТЛОЖЕНИЙ В ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

В зависимости от температуры, пересыщения раствора и гидродинамики потока воды на стенках оборудования формируются различного вида и плотности отложения, состоящие из микрокристаллов карбоната кальция модификации кальцит или арагонит. Кальцит формируется преимущественно при низких пересыщениях и высоких температурах, а арагонит – при высоких пересыщениях и низких температурах. Представлены способы исследования и контроля солеотложения в геотермальных системах теплоснабжения.

В залежності від температури, перенасичення розчину та гідродинаміки потоку води на стінах обладнання формуються різного виду та щільності відкладення, які складаються з мікрокристалів карбонату кальція модифікації кальцит або арагоніт. Кальцит формується при низькому перенасиченні та високих температурах, а арагоніт – при високому перенасиченні та низьких температурах. Представлені методики визначення та контролю солевідкладень в геотермальних системах теплопостачання.

Введение

Широкое использование высокопотенциальных геотермальных вод, наряду с коррозией является проблема с образованием твердых отложений труднорастворимых солей на стенках теплоэнергетического оборудования.

Толщину солевых отложений в теплоэнергетическом оборудовании на практике определяют, как правило, либо по изменению гидравлического сопротивления его, либо по увеличению термического сопротивления этих отложений, то есть по уменьшению коэффициента теплопередачи.

Основная часть

При малых значениях толщины отложений изменение гидравлического сопротивления незначительно, а коэффициент теплопередачи может уменьшиться и по причине снижения скорости потока в одном из обоих контурах теплообменника.

Солесодержание вод составляет от 10 до 25 г/л. Химический состав представлен в основном ионами Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , с преимущественным содержанием ионов Na^+ и Cl^- . В газовом составе преобладает метан CH_4 , углекислый газ CO_2 и азот N_2 .

Для среднетемпературных геотермальных вод с температурой 70–105 °С, как правило, характерны отложения карбоната кальция CaCO_3 (рис. 1).

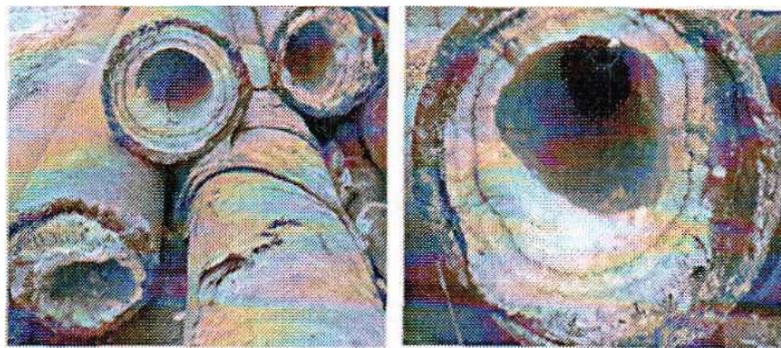
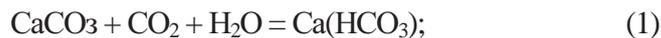


Рис.1. Отложения карбоната кальция CaCO_3

В присутствии углекислого газа CO_2 в геотермальной воде CaCO_3 растворяется в виде бикарбоната кальция



В табл. 1 представлены данные по скорости образования отложений CaCO_3 при температуре воды 99°C и концентрации взвеси дисперсностью до 5 мкм в количестве до 9 мг/л .

Таблица 1

Данные по скорости образования отложений CaCO_3

	Re	P, МПа	$\Delta P=P_S-P$, МПа	C, мг/л	C_S , мг/л	$\Delta C=C_S-C$, мг/л	ρ , кг/м ³	v , мм/сут
1	200000	0,1	0,25	100	60	40	2700	0,6
2	50000	0,1	0,25	100	60	40	2200	0,9
3	1500	0,1	0,25	100	60	40	1700	2,5
4	200000	0,2	0,15	100	77	23	2700	0,3
5	50000	0,2	0,15	100	77	23	2200	0,5
6	200000	0,3	0,05	100	90	10	2700	0,07

Как видно из таблицы 1, при таких параметрах воды (P и t) с уменьшением числа Рейнольдса (Re) скорость отложений резко увеличивается при одновременном уменьшении плотности отложений. Это свидетельствует о значительной роли частиц взвеси при формировании отложений при низких значениях числа Рейнольдса (Re). Например, судя по плотности отложений в трубопроводах (рис. 1) и гидродинамике потока в них, можно сделать вывод о концентрации частиц взвеси в воде, проходившей в данном трубопроводе [1].

Из растворов геотермальных вод CaCO_3 кристаллизуется в виде двух модификаций: кальцита тригональной системы в форме ромбоэдров и арагонита ромбической системы, который приобретает различные формы (как правило, игольчатые кристаллы). Кристаллы арагонита обладают более низкими значениями свободной поверхностной энергии в сравнении с кальцитом.

Снижение парциального давления CO_2 с выходом геотермальной воды на поверхность земли смещает реакцию влево с образованием твердой фазы CaCO_3 как в объеме воды, так и на поверхности оборудования. В зависимости от состава воды, температуры и давления, при которых эксплуатируется оборудование, защиту геотермальных систем от карбонатных отложений осуществляют различными способами. При использовании среднепотенциальных вод с температурой менее 100°C , как правило, используют двухконтурную схему, в первом контуре которой проходит геотермальная вода при параметрах давления и температуры воды, не нарушающих карбонатно-кальциевое равновесие. Однако поддержание высоких давлений в системе снижает дебит скважин и в то же время увеличивает коррозионную активность воды из-за увеличения ее кислотности. При температуре геотермальной воды более 100°C равновесное значение давления становится значительным.

При температуре 151°C и дебите скважины $3000\text{ м}^3/\text{сут}$ давление на устье скважины составляет $2,8\text{ МПа}$, что совершенно недостаточно для поддержания углекислотного равновесия. Чтобы избежать выпадения солей, дебит скважины при этих же условиях должен поддерживаться на уровне $2200\text{--}2300\text{ м}^3/\text{сут}$. [1].

Для удовлетворительного описания кинетики роста твердой фазы CaCO_3 на поверхности геотермального оборудования вполне достаточно учитывать такие параметры,

как пересыщение раствора по CaCO₃, концентрация и дисперсность взвеси, а также гидродинамика потока.

При нарушении карбонатно-кальциевого равновесия в геотермальной воде образуется взвесь из кристаллов CaCO₃ размером до 10 мкм и более. Количество взвеси составляет от 4 до 25 мг/л. Основная доля приходится на частицы размером менее 1 мкм. Часть из них, попадая в ламинарный подслои, оседает на поверхности оборудования, формируя отложения. В зависимости от скорости потока воды относительно поверхности осаждения на ней образуются отложения различной плотности [2].

Наличие в воде мелкодисперсной взвеси CaCO₃ играет существенную роль при формировании твердых отложений на стенках оборудования. Рост отложений осуществляется как за счет осаждения молекул CaCO₃, так и за счет адгезии частиц взвеси [2]. При этом скорость отложения твердой фазы CaCO₃ определяется зависимостью

$$(1/S)(dm/dt) = k_p(C-C_s)^n + (4\pi r^3 \rho \Delta N k) / 3, \quad (2)$$

где C и C_s – текущее и равновесное значения концентрации CaCO₃ в растворе, кг/мг;

S – площадь поверхности, на которой формируется отложение, м²;

r – радиус частиц взвеси, м;

ρ – плотность частиц, кг/м³;

ΔN – разность концентрации частиц в ядре потока и около поверхности осаждения, м⁻³;

k и k_p – коэффициенты массопереноса, которые характеризуются, в основном, гидродинамикой потока, т. е. числом Рейнольдса Re;

n – порядок процесса кристаллизации (n = 1–2) табл. 2.

Таблица 2

Скорость и плотность отложений карбоната кальция в зависимости от числа Re
(m/V = 7–9 мг/л; t = 98 °С, P = 0,1 МПа)

№	Re = vd/v	(1/S)(Δm /Δt), кг/м ² ч	Δh, м	P, кг/м ³
1	1500	0,180	0,008	1700
2	2000	0,175	0,0075	1750
3	3000	0,158	0,0065	1850
4	4000	0,125	0,005	1900
5	10000	0,102	0,0038	2000
6	20000	0,090	0,0034	2000
7	50000	0,081	0,0028	2200
8	70000	0,065	0,002	2500
9	100000	0,060	0,0017	2650
10	200000	0,060	0,0017	2650

При концентрациях взвеси 7–9 мг/л и малых значениях числа Re (< 2000) отложения имеют рыхлую структуру, легко осыпаются при надавливании, плотность отложений составляет 1,6–1,8 г/см³. С увеличением числа Re плотность отложений увеличивается. Отложения CaCO₃ при Re ≈ 4000 плотность их составляет около 2,2 г/см³. При высоких значениях числа Re (> 10⁵) плотность отложений достигает 2,5–2,7 г/см³. Отложения стекловидной формы имеют прочную структуру. В данном случае естественно предположить, что отложения формируются в основном за счет осаждения более мелких частиц и молекул CaCO₃, т.к. при высоких скоростях потока раствора относительно поверхности осаждения крупные частицы взвеси уносятся в поток.

Модификация CaCO₃ зависит от различных факторов, прежде всего от температуры воды, давления, величины пересыщения, а также ионной силы раствора данной воды. Другими словами, образуется кристалл такой модификации, которому соответствует минимум свободной энергии Гиббса при данных условиях [3].

Пересыщение раствора геотермальной воды по CaCO_3 наступает в процессе дегазации. Чем больше перепад давления, тем выше концентрация образующейся взвеси.

Известны способы определения толщины материала с помощью ультразвукового толщиномера, основаны на поглощении ультразвука исследуемым объектом или отражении его на границе раздела сред [4]. При небольшой толщине или рыхлой структуре отложений по сравнению с материалом стенки проходящей через исследуемый объект сигнал может не претерпеть больших изменений, что отрицательно сказывается на достоверности показаний приборов.

Один из способов основан на измерении электропроводности раствора геотермальной воды и отложений, образованных на стенке оборудования [5].

При высокой плотности отложений сопротивление датчика резко идет вверх уже при толщине отложений до 0,5–1 мм. Что касается рыхлых отложений, то в этом случае плавный подъем линии сопротивления датчика при толщине отложений до 2–3 мм сменяется на ее стремление к некоторому предельному значению.

Другой способ определения толщины отложений заключается в измерении градиента температуры на поверхности трубопровода [6]. Для этого на трубе устанавливают источник тепла в виде кольца. После установления стационарного поля температур на исследуемом объекте снимают градиент температуры в направлении от источника тепла вдоль трубопровода на его поверхности, тем самым, судят о размерах отложений внутри трубопровода.

Данный способ, в отличие от способа с датчиком солеотложения, дает примерную оценку плотности отложений. Третий способ основан на измерении температуры исследуемой стенки, отложений и жидкости [5]. Надлежащее решение задачи очистки геотермального оборудования от твердых отложений CaCO_3 либо предотвращения образования возможно лишь при выяснении причин и особенностей формирования их вида, плотности, а также образования модификаций кристаллов, из которых эти отложения состоят. Зная пересыщение раствора геотермальной воды (определяют практически по давлению и температуре), концентрацию и дисперсность частиц взвеси в нем, а так же коэффициенты k_p и k (рассчитываются по гидродинамическим характеристикам потока), можно прогнозировать скорость и характер отложений карбоната кальция в геотермальном оборудовании.

Выводы

Таким образом, исследованные способы позволяют определить толщину и оценить плотность отложений на теплообменной поверхности геотермальных систем, не подвергая их остановке и вскрытию.

Поэтому проводить очистку стенок геотермального оборудования от твердых отложений CaCO_3 представляется перспективным путем их растворения в среде самой же геотермальной воды, не прерывая работу оборудования, растворение ранее образовавшихся отложений можно осуществить при параметрах давления и температуры воды, находящихся выше равновесной линии насыщения воды карбонатом кальция. При этом с увеличением общего давления в системе растет и парциальное давление CO_2 , что приводит к растворению твердой фазы карбоната кальция согласно реакции (1).

Список литературы

1. Магомедов К. М., Данюшевский В. С., Алиев Р. М. Геотермальная скважина. М.: – Недра, 1982. – 114 с.
2. Ахмедов Г. Я. Кинетика роста отложений карбоната кальция в геотермальных системах//Теплоэнергетика. – 2009. – № 11. – С. 13–17.
3. Верма А., Кришна П. Полиморфизм и политипизм в кристаллах. М.: – Мир, 1969.

4. Ахмедов Г. Я. О некоторых методах контроля солеотложения в геотермальной энергетике//Промышленная энергетика. – № 6. – 2010.

5. Г. Я. Ахмедов. Измерение толщины солеотложения в геотермальных системах // Ползуновский вестник. – № 3/1. – 2011.

6. Ахмедов Г. Я. Способ определения толщины отложений на внутренней поверхности трубопроводов// Пат. 2344338, Рос.Федерация: МПК F17 D 1/16,G01B 17/02; опубл. 20.01.2009. – Бюл. № 2.

METHODS FOR INVESTIGATION OF SCALING IN GEOTHERMAL HEATING SYSTEMS

A. F. REDKO, Dr. Scie. Tech., Pf.
A. A. ONISHCHENKO, graduate student

Depending on the temperature, supersaturation of the solution and hydrodynamic flow of water on the walls of the equipment are formed various types and density of deposits, consisting of micro-crystals of calcium carbonate, calcite and aragonite modification. Calcite formed mainly at low supersaturation and high temperatures, and aragonite - at high supersaturation and low temperatures. Provided methods for investigation and control of scaling in geothermal heating systems.

Поступила в редакцию 03.01 2013 г.