

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 кальцію 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  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , с преимущественным содержанием ионов  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$ . В газовом составе преобладает метан  $\text{CH}_4$ , углекислый газ  $\text{CO}_2$  и азот  $\text{N}_2$ .

Для среднетемпературных геотермальных вод с температурой 70–105 °С, как правило, характерны отложения карбоната кальция  $\text{CaCO}_3$  (рис. 1).

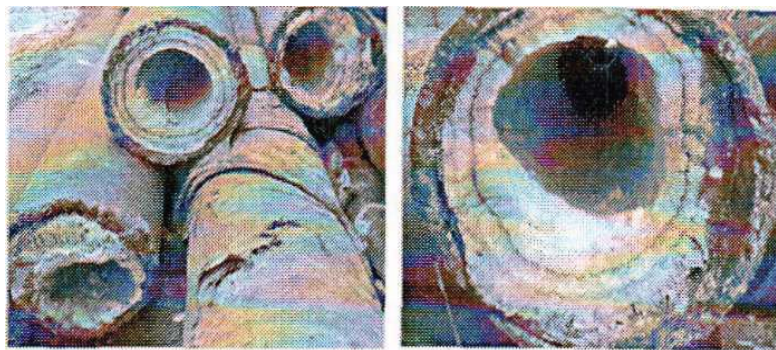
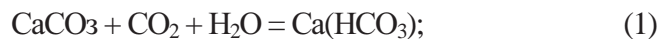


Рис.1. Отложения карбоната кальция  $\text{CaCO}_3$

В присутствии углекислого газа  $\text{CO}_2$  в геотермальной воде  $\text{CaCO}_3$  растворяется в виде бикарбоната кальция



В табл. 1 представлены данные по скорости образования отложений  $\text{CaCO}_3$  при температуре воды  $99^\circ\text{C}$  и концентрации взвеси дисперсностью до  $5\ \mu\text{m}$  в количестве до  $9\ \text{mg/l}$ .

Таблица 1

Данные по скорости образования отложений  $\text{CaCO}_3$ 

	Re	P, МПа	$\Delta P=P_S-P$ , МПа	C, мг/л	$C_S$ , мг/л	$\Delta C=C_S-C$ , мг/л	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	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  $\text{CaCO}_3$  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  $\text{CO}_2$  с выходом геотермальной воды на поверхность земли смещает реакцию влево с образованием твердой фазы  $\text{CaCO}_3$  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  $100^\circ\text{C}$ , 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  $100^\circ\text{C}$  равновесное значение давления становится значительным.

При температуре  $151^\circ\text{C}$  и дебите скважины  $3000\ \text{m}^3/\text{сут}$  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  $2200\text{--}2300\ \text{m}^3/\text{сут}$ . [1].

Для удовлетворительного описания кинетики роста твердой фазы  $\text{CaCO}_3$  на поверхности геотермального оборудования вполне достаточно учитывать такие параметры,

как пересыщение раствора по  $\text{CaCO}_3$ , концентрация и дисперсность взвеси, а также гидродинамика потока.

При нарушении карбонатно-кальциевого равновесия в геотермальной воде образуется взвесь из кристаллов  $\text{CaCO}_3$  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  $\text{CaCO}_3$  играет существенную роль при формировании твердых отложений на стенках оборудования. Рост отложений осуществляется как за счет осаждения молекул  $\text{CaCO}_3$ , так и за счет адгезии частиц взвеси [2]. При этом скорость отложения твердой фазы  $\text{CaCO}_3$  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  $\text{CaCO}_3$  в растворе, кг/мг;

$S$  – площадь поверхности, на которой формируется отложение, м<sup>2</sup>;

$r$  – радиус частиц взвеси, м;

$\rho$  – плотность частиц, кг/м<sup>3</sup>;

$\Delta N$  – разность концентрации частиц в ядре потока и около поверхности осаждения, м<sup>-3</sup>;

$k$  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)

№	$Re = vd/\nu$	$(1/S)(\Delta m / \Delta t)$ , кг/м <sup>2</sup> ч	$\Delta h$ , м	$P$ , кг/м <sup>3</sup>
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/см<sup>3</sup>. С увеличением числа  $Re$  плотность отложений увеличивается. Отложения  $\text{CaCO}_3$  при  $Re \approx 4000$  плотность их составляет около 2,2 г/см<sup>3</sup>. При высоких значениях числа  $Re$  ( $> 10^5$ ) плотность отложений достигает 2,5–2,7 г/см<sup>3</sup>. Отложения стекловидной формы имеют прочную структуру. В данном случае естественно предположить, что отложения формируются в основном за счет осаждения более мелких частиц и молекул  $\text{CaCO}_3$ , т.к. при высоких скоростях потока раствора относительно поверхности осаждения крупные частицы взвеси уносятся в поток.

Модификация  $\text{CaCO}_3$  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  $\text{CaCO}_3$  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  $\text{CaCO}_3$  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  $\text{CaCO}_3$  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  $\text{CO}_2$ , 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.

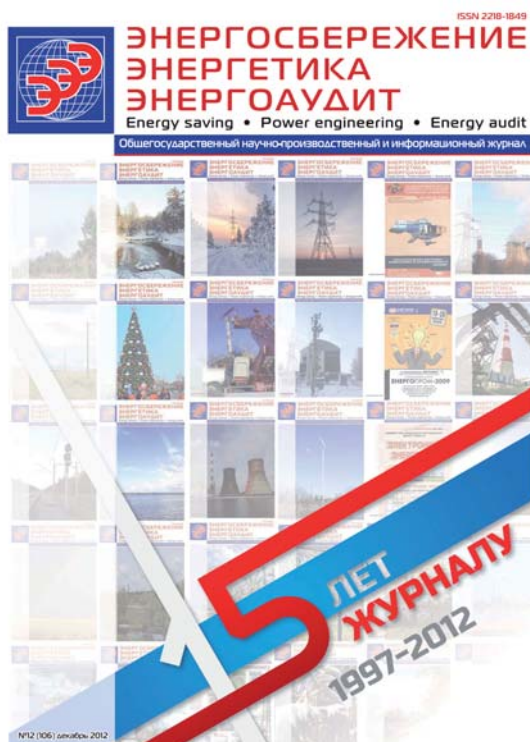
6. Ахмедов Г. Я. Способ определения толщины отложений на внутренней поверхности трубопроводов// Пат. 2344338, Рос.Федерация: МПК F17 D 1/16,G01B 17/02; опубл. 20.01.2009. – Бюл. № 2.

## 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.



**Уважаемые предприниматели!  
Подписчиками журнала  
«Энергосбережение • Энергетика •  
Энергоаудит»  
являются руководители предприятий  
промышленности и энергетики,  
жилищно-коммунального хозяйства,  
агропромышленного комплекса, ВУЗов.  
Разместив свою рекламу на страницах  
журнала, Вы построите еще одну ступеньку  
к вершине своего бизнеса!  
Постоянным подписчикам журнала  
– скидка на размещение рекламной  
информации.  
На сайте [eee-journal.com.ua](http://eee-journal.com.ua) помещена  
информация об условиях размещения  
рекламы**