

ИЗМЕРЕНИЕ ТОЛЩИНЫ СОЛЕОТЛОЖЕНИЯ В ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Г.Я. Ахмедов

Представлены результаты исследования способа контроля солеотложения в геотермальной энергетике, основанного на определении электрического сопротивления раствора геотермальной воды и отложений карбоната кальция на поверхностях оборудования, а также способов, основанных на измерении градиента температуры. Исследованные способы позволяют определять не только толщину отложений, но также оценить их плотность.

Ключевые слова: геотермальная энергетика, геотермальная вода, солеотложение, карбонат кальция, неразрушающий контроль солеотложения, датчик солеотложения, градиент температуры.

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 [1-3]. При малых значениях толщины отложений изменение гидравлического сопротивления незначительно, а коэффициент теплопередачи может уменьшиться и по причине снижения скорости потока в одном или обоих контурах теплообменника.

Известные способы определения толщины материала с помощью ультразвукового толщиномера основаны на поглощении ультразвука исследуемым объектом или отражении его на границе раздела сред. В первом случае необходим двусторонний подход к объекту исследования. При небольшой толщине или рыхлой структуре отложений по сравнению с материалом стенки проходящий через исследуемый объект сигнал может не претерпеть больших изменений, что отрицательно сказывается на достоверности показаний приборов. Что касается отраженных сигналов, используемых в других толщиномерах, то и в данном случае при малых толщинах отложений или не резкой границе между отложениями и водой, сигналы могут быть слабыми или вообще отсутствовать. В случае отсутствия хотя бы одностороннего подхода к исследуемому объекту ультразвуковой способ вообще невозможно применить.

Поиск и исследование альтернативных способов контроля и определения толщины отложений в геотермальных системах привели автора к следующим результатам.

Опытные установки и методика исследований приведены в работе [4]. Один из исследованных способов основан на измерении электропроводности раствора гео-

термальной воды и отложений, образованных на стенке оборудования [5]. Датчик солеотложения (см. рисунок 1а) представляет собой закрепленный в исследуемой стенке металлический корпус, в котором заключен металлический стержень с помощью втулки из фторопласта. С помощью измерительного блока измеряют сопротивление R_p цепи: электрод - раствор воды - корпус датчика в начале процесса солеотложения. После появления слоя отложения измерительный блок показывает общее сопротивление цепи R , состоящее из сопротивления слоя отложения $R_{отл}$ и сопротивления раствора жидкости R_p . На рисунке 1б представлена фотография датчика с отложениями на его стержне, а на рисунке 1в – увеличенный фрагмент отложений кристаллов арагонита на стержне датчика.

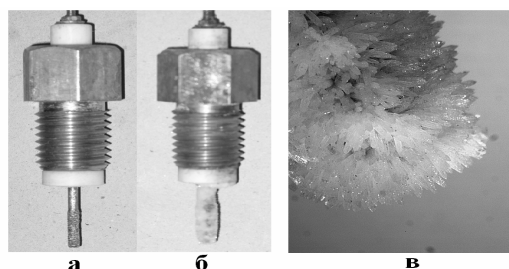


Рисунок 1 - Датчик солеотложения

Результаты исследования зависимости электрического сопротивления датчика солеотложения от толщины отложений на его стержне при различных плотностях представлены на рисунке 2. Линии 1-4 получены на скважине 27Т (г. Махачкала) при плотностях: 1 – 2400 кг/м³; 2 – 2100 кг/м³; 3 – 1800 кг/м³; 4 – 1600 кг/м³. Минерализация 23,3 г/л. Температура воды в устье скважины 100 оС.

Как видно из рисунка при высокой плотности отложений сопротивление датчика резко идет вверх уже при толщине отложений до 0,5 ÷ 1 мм. Что касается рыхлых

РАЗДЕЛ IV. ИЗМЕРЕНИЕ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В ЭКОЛОГИИ, НАУКАХ О ЧЕЛОВЕКЕ И ОБЩЕСТВЕ

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.

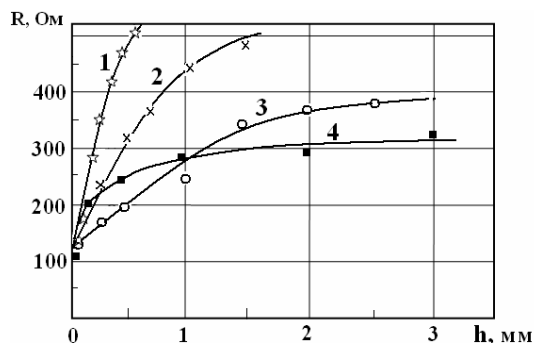


Рисунок 2 - Зависимость электрического сопротивления датчика от толщины отложений

Расчет толщины отложений до 2 - 2,5 мм можно вести согласно выражению [4]

$$h = r_1 \left(e^{\frac{2\pi l}{\rho} (R - R_0)} - 1 \right) \quad (1)$$

где l и r_1 – длина и радиус выступающей от стенки части стержня.

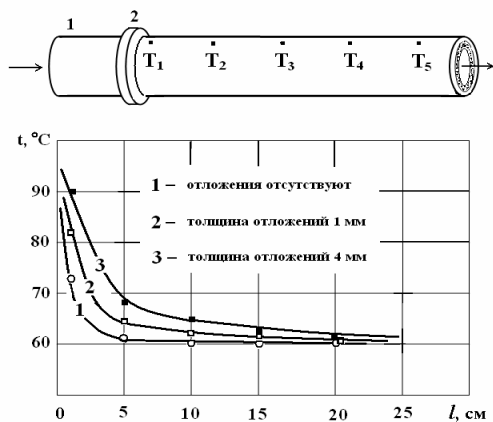


Рисунок 3 - Распределение температуры на поверхности трубопровода

Величина удельного сопротивления ρ создается раствором геотермальной воды, находящимся между кристаллами отложений. Исследование отложений разной плотности при температуре 97 °С показало, что их удельное сопротивление резко увеличивается с ростом плотности отложений: 1600 кг/м³ – 30 Ом·м; 1800 кг/м³ – 50 Ом·м; 2100 кг/м³ – 110 Ом·м; 2400 кг/м³ – 550 Ом·м; 2600 кг/м³ – 5000 Ом·м.

Расчет толщины h отложений по формуле (1) с использованием значений R и R_0 дает удовлетворительные результаты. Сравнение расчетных и измеренных при

вскрытии датчика значений толщин отложений дает погрешность от 20 до 40% в пределах до 2-2,5 мм. Расчет толщины отложений более 3 мм по формуле (1) дает большие погрешности. Здесь, видимо, расчет необходимо вести уже с учетом сопротивления прослойки жидкости между отложениями.

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 и, тем самым, судят о размерах отложений внутри трубопровода.

На рисунке 3 представлено распределение температуры на поверхности трубопровода диаметром 21 мм и толщиной стенки 2,5 мм с разной толщиной отложений в них. Плотность отложений около 2200 кг/м³. Вода перемещается в трубе при температуре 60 °С в турбулентном режиме с числом Рейнольдса $Re \approx 10^4$. Из рисунка видно, что уже при толщине отложений в 1 мм (линия 2) градиент температуры на трубопроводе заметно отличается от градиента температуры на трубопроводе без отложений.

Как показали исследования [4], 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 (рисунок 4). На наружной и внутренней поверхности стенки 1 оборудования установлены термопары 2 и 3. Далее ступенчато с шагом $L = 1 \div 2$ мм от внутренней стенки оборудования к жидкости через корпус 10 установлены несколько (3÷5) термопар 4, 5, 6, 7, фиксирующие температуру отложений 8 и жидкости внутри оборудования. Толщину отложений можно определить по показаниям приборов в измерительном блоке 9 согласно сигналам от датчиков температуры. Последний датчик в отложениях 8, перед выходом к жидкости имеет температуру, отличную от температуры жидкости. Зная шаг L ступени датчиков, можно рассчитать толщину отложений с точностью до шага L по формуле

$$\delta_{отл} = L \times N, \quad (2)$$

ИЗМЕРЕНИЕ ТОЛЩИНЫ СОЛЕОТЛОЖЕНИЯ В ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

где N - количество датчиков от стенки, находящихся в отложениях.

Для нахождения плотности отложений используем показания приборов от датчиков температуры 2 и 3. По ним определяем тепловой поток через стенку оборудования

$$J = \lambda \frac{t_3 - t_2}{\delta}, \quad (3)$$

где λ - коэффициент теплопроводности стенки, $\frac{Вт}{м \cdot К}$; δ - толщина стенки, м. Тепловой поток через стенку оборудования J

равен тепловому потоку $J_{отл}$ через слой отложений $\delta_{отл}$

$$J_{отл} = \lambda_{отл} \frac{t_7 - t_3}{\delta_{отл}} \quad (4)$$

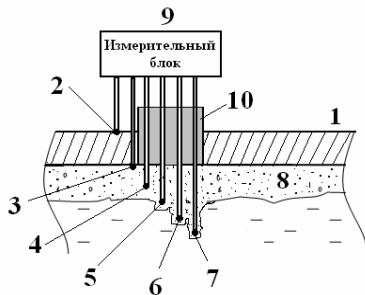


Рисунок 4 - Определение толщины солеотложения с помощью термопар

Сравнивая (3) и (4), найдем выражение для вычисления коэффициента теплопроводности слоя отложений $\lambda_{отл}$

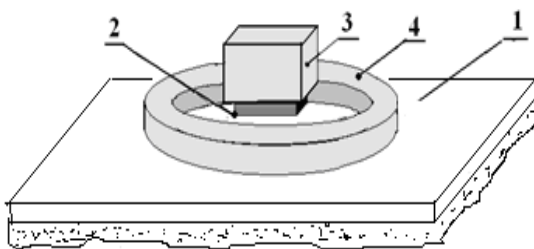


Рисунок 5 - Определение толщины отложений с помощью нагретого тела

В случае отсутствия источника тепла 4 вокруг бруска 2 тепло бруска передается как жидкости через стенку (Q_1), так и вдоль стенки (Q_2). При этом большая часть тепла бруска расходуется на нагревание стенки, в связи с чем уменьшается информативность о толщине отложений внутри стенки. Установка источника тепла вокруг нагретого тела устраняет градиент температуры, соот-

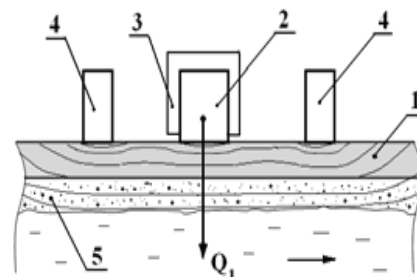
$$\lambda_{отл} = \lambda \frac{(t_3 - t_2) \delta_{отл}}{(t_7 - t_3) \delta}, \quad (5)$$

где t_7 - температура жидкости. Исходя

из полученного значения $\lambda_{отл}$ по имеющимся в справочниках данным можно оценить плотность отложений.

Исследования, проведенные с датчиком на скв. 27Т показали, что одновременно, как показано на рисунке 4, и сами датчики покрываются отложениями карбоната кальция. Однако температура выступающих из основного слоя отложений термопар сохраняют температуру жидкости, что не дает больших погрешностей при расчете толщины отложений.

Рассмотрен еще один способ, основанный на изменении температуры тела, прикладываемого к исследуемой поверхности (рисунок 5). На исследуемую стенку 1 на ее наружную поверхность прикладывают предварительно подогретый до температуры выше температуры жидкости, омывающей стенку 1, источник тепла в виде нагретого тела - бруска 2. Брусек покрыт теплоизоляционным материалом 3. Одновременно вокруг нагретого тела на стенке 1 размещают источник тепла 4 в виде кольца. С момента соприкосновения брусек начинает терять тепло. С этого момента ведут отсчет времени и измерение температуры бруска. При этом, источник тепла 4 обеспечивает изотермическую поверхность вблизи нагретого тела в течение всего времени съема диаграммы изменения температуры нагретого тела.



ветственно, и поток тепла (Q_2) вдоль стенки 1. Тогда поток тепла от нагретого тела к жидкости направлен только перпендикулярно поверхности стенки и отложений, что во много раз увеличивает информативность о толщине отложений.

Тепло бруска передается жидкости через стенку, внутренняя поверхность которой омывается жидкостью. Этот случай подобен

передаче тепла от пластины обтекаемой ее жидкостью [7]. Зависимость температурного перепада между источником тепла и жидкостью можно представить в следующем виде:

$$T - T_{жс} = (T_o - T_{жс}) e^{-\frac{kF}{cV}\tau}, \quad (6)$$

где T_o – температура бруска с момента соприкосновения с поверхностью трубопровода, $T_{жс}$ – температура жидкости, T – температура бруска в момент времени τ , k – коэффициент теплопередачи между поверхностью бруска и жидкостью в трубопроводе, V – объем бруска, F – площадь соприкосновения бруска с поверхностью трубопровода, c – объемная теплоемкость бруска, Дж/м³град.

Коэффициент k определяется по известной зависимости [8]:

$$k = \frac{I}{\frac{1}{\alpha} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{\delta_{отл}}{\lambda_{отл}}} \quad (7)$$

где α – коэффициент теплоотдачи между жидкостью и стенкой трубопровода; δ , λ – толщина и теплопроводность стенки соответственно; $\delta_{отл}$, $\lambda_{отл}$ – толщина и теплопроводность отложений соответственно.

С другой стороны, коэффициент k определяется из полученной временной диаграммы по формуле, полученной из (6) путем логарифмирования правой и левой части:

$$k = -\frac{cV}{F\tau} \ln \frac{T - T_{жс}}{T_o - T_{жс}} \quad (8)$$

Далее из выражения (7), при известных значениях k , α , λ и $\lambda_{отл}$, определяем искоемое значение $\delta_{отл}$:

$$\delta_{отл} = \lambda_{отл} \left(\frac{1}{k} - \frac{1}{\alpha} - \frac{\delta}{\lambda} \right) \quad (9)$$

Коэффициент теплоотдачи α определяется из соотношения безразмерных чисел Нуссельта (Nu), Рейнольдса (Re) и Прандтля (Pr) для соответствующих условий гидродинамики потока жидкости в обтекании [7].

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Плиссин Г.И. Метод технической диагностики образования отложений на теплопередающей поверхности котлов и конденсаторов турбин // Теплоэнергетика, 1990 г., №2, с. 34-36.
2. Царик Д.Ф. Методика определения средней толщины слоя накипи // Водоснабжение и санитарная техника.-1990.- № 7.- С.9 -10.
3. Бубликов И.А., Миропольский З.Л., Новиков Б.Е. Исследование термического сопротивления отложений в теплообменниках, охлаждаемых технической водой//Теплоэнергетика.- 1992.- № 5
4. Ахмедов Г.Я. О некоторых методах контроля солеотложения в геотермальной энергетике //Промышленная энергетика.- №6.- 2010.
5. Ахмедов Г.Я. Способ и устройство для определения толщины солеотложения// Пат. 2387950, Рос. Федерация: МПК G01B 17/06; опубл. 27.04.2010.- Бюл. № 12.
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.
7. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена.- Ленинград: Машгиз.-, 1962, с. 130-131, 229.
8. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача.-Москва: Энергоиздат.- 1981 г.

Доцент Г.Я. Ахмедов, к.т.н., звание - доцент по кафедре, моб.тел.:8-928-219-38-77, e-mail: gapari@mail.ru - Дагестанский государственный технический университет.