

ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

УДК 621.671

Н. Н. ВЕРИЧЕВ, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, **В. В. МИШАКИН**, д-р техн. наук, гл. науч. сотрудник

КОНТРОЛЬ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СОЛЕОТЛОЖЕНИЙ ПОГРУЖНЫХ СКВАЖИННЫХ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ

Институт проблем машиностроения РАН – филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»

Россия, 603024, г. Н. Новгород, ул. Белинского, д. 85. Тел.: (831) 432-03-00; эл. почта: ndt@ipmran.ru

Ключевые слова: солеотложения, электропогружной скважинный насос, упругие модули, адгезионная прочность, разрушающие напряжения.

Проведены экспериментальные исследования механических свойств солеотложений погружных скважинных электроцентробежных насосов. В частности, были получены количественные оценки для разрушающих напряжений сдвига и отрыва, адгезионной прочности, модуля Юнга, а также коэффициента теплового расширения. В силу нестандартности геометрии образцов была разработана специальная методика для каждого из типов измерений. Полученные результаты могут быть использованы для расчета параметров виброакустических систем, используемых для предотвращения солеотложений данного типа, а также и борьбы с уже имеющимися отложениями.

Введение

Твердые солеотложения являются существенной проблемой для нефтегазовой индустрии [1, 2]. Солеотложения возникают на обсадных колоннах, насосно-компрессорных трубах, клапанах, насосах и любом другом внутрискважинном оборудовании, тем самым приводя к закупориванию ствола скважины, снижению, а в некоторых случаях и предотвращению потока флюида из скважины.

Солеотложения могут образовываться в порах пласта вблизи ствола скважины, что приводит к снижению пористости и проницаемости самого пласта. Они также могут блокировать поток флюида, забивая перфорационные отверстия.

Методы удаления солеотложений должны быть быстрыми, не повреждающими ствол скважины, насосно-компрессорные трубы или окружающую среду пласта [1,3–11]. В обработках по стимуляции породы часто используются растворители солей, чтобы остановить падение добычи. Лучший метод удаления солеотложений зависит от их типа и количества, а также ее физического состава или текстуры. Неправильный выбор метода удаления может фактически способствовать быстрому рецидиву образования солеотложений.

В трубах и другом погружном оборудовании прочность и текстура солеотложений играют важную роль в выборе метода удаления. Прочность и текстура варьируются от мягких, ломких нитевидных кристаллов или кристаллов с высокой микропористостью до каменных слоев с низкой проницаемостью и низкой пористостью. Чистота солеотложений влияет на их устойчивость к



методам удаления. Солеотложения могут встречаться в виде отдельных минеральных фаз, но чаще представляют собой смесь сходных совместимых соединений. Чистый сульфат бария обычно имеет низкую пористость и чрезвычайно стоек к химическому удалению и только может медленно удаляться с помощью большинства известных механических методов. Смеси сульфата бария, часто с сульфатом стронция, сульфатом кальция или даже карбонатом кальция поддаются различным методам удаления как химическим, так и механическим.

В данной работе рассматриваются солеотложения, возникающие на элементах скважинного электроцентробежного насоса (ЭЦН). Применение химических методов для погружного скважинного оборудования имеет ряд противопоказаний. Например, они приводят к преждевременному выходу из строя прокладок и уплотнений. По этой причине предпочтение отдается механическим методам очистки.

Одной из возможностей для борьбы с отложениями на ЭЦН является создание упругих колебаний и волн с такими свойствами, чтобы соответствующие деформации элементов ЭЦН создавали в отложениях такие напряжения, которые приводили бы к их разрушению. Для расчета параметров указанных колебаний необходимо знать порядки соответствующих критических напряжений материала солеотложений: разрушающие напряжения сдвига и отрыва, адгезионной прочности, модуля Юнга, коэффициента теплового расширения и т. д.). Также важно знать химический состав материала, пористость, проницаемость и особенности его микроструктуры. Данная работа посвящена методам экспериментального исследования указанных параметров.

Методика проведения эксперимента

Образцы

В качестве образцов, полученных для исследования, использовались детали вышедших из строя и полученных из ремонтной мастерской погружных электроцентробежных насосов, работавших на нефтяных месторождениях западной Сибири. На рис. 1 цв. вклейки показаны крыльчатки, диффузоры и впускная сетка, покрытые солеотложениями, а также отдельные образцы непосредственно самих отложений. Стоит отметить, что полученные образцы солеотложений были довольно хрупкие, из-за чего не имелось практической возможности использовать стандартные измерительные приборы. Практически для каждого испытания пришлось проектировать и изготавливать новые уникальные устройства. Заметим, что для исследования разрушающих напряжений сдвига и отрыва, а также для измерения модуля Юнга использовались только прямые плоские образцы, рис. 2 цв. вклейки. Толщина образцов на срез составляла от 0,6 до 0,8 мм, ширина 4–6 мм, длина 6–8 мм. Для испытания на максимальное нормальное напряжение толщина образцов составляла от 0,6 до 0,8 мм, ширина 4–6 мм, длина 10–12 мм.

Структурный состав образцов

Определение структурного состава образцов выполнено методом рентгенофазового анализа на автоматическом дифрактометре ДРОН-УМ 1, излучение $Cu\ K\alpha$, рабочее напряжение 40 кВ, ток трубки 30 мА, монохроматизация проведена с использованием Ni -фильтра. Рентгенограмма была получена в интегральном режиме для скорости вращения счетчика 1 градус в минуту.

Рентгеноструктурный анализ проводили для двух типов образцов: 1 – монолитный кусок, 2 – порошок, полученный из монолитного образца и помещенный в кварцевую трубку без когезии. Наиболее репрезентативные данные о структурном составе получены при использовании второго образца. Дифракционный спектр монолитного куска показывает, что при образовании накипи его поверхность и приповерхностный слой состоят из аморфных или углеводородсодержащих фаз. Это подтверждается наличием аморфного гало и слабыми по интенсивности дифракционных пиков, соответствующих большим межплоскостным расстояниям. Идентификацию проводили с использованием базы данных *MINICRYST 2003*. Сравнение экспериментальных и данных базы данных показало, что образец представляет собой кальцит (CaCO_3) со средней величиной плотности $\rho \approx 2000 \text{ kg/m}^3$. Просмотр образца солеотложений под оптическим микроскопом показал, что частицы имеют диаметр от нескольких микрон до 15 микрон.

Измерения разрушающих напряжений сдвига и отрыва

Установка для измерения разрушающих напряжений сдвига и отрыва показана на рис. 3 цв. вклейки; состоит из основания, рычажного устройства, держателя образцов при испытании на сдвиг, нагревателей, встроенных в держатель, адгезиметра для измерения максимального усилия, соответствующего разрушению образца. Адгезиметр соединен с нагружающим устройством передающего на него силу P . Нагружающее устройство (не приведено) состояло из цилиндра массой 2 кг, соединенного с адгезиметром. Цилиндр медленно перемещался под собственным весом в стакане, заполненном машинным маслом. Скорость перемещения цилиндра регулировалась дросселем.

При испытании на сдвиг (рис. 4а цв. вклейки) предварительно обработанный образец солеотложений (см. рис. 3 цв. вклейки) помещался между двумя держателями. Температура держателей и испытуемого образца регулировалась с помощью нагревателей. Пуансон помещался внутрь вертикального отверстия. Размер рабочей части пуансона, контактирующего с испытуемым образцом, был 1×6 мм. Скорость роста усилия P приблизительно составляла 20 Н/мин. Максимальное усилие P_{max} , соответствующее напряжению на срез, регистрировалось электронным адгезиметром АМЦ2-20 (максимальная нагрузка 20 кг, точность 0,01 кг, диапазон рабочих температур $-20 - +45$ °С).

Разрушающее напряжение сдвига определялось как:

$$\sigma\tau = \frac{2S}{P_{max}} k_p,$$

где S – площадь рабочего сечения образца, k_p – коэффициент, учитывающий передачу усилия через рычаг.

Для измерения разрушающего напряжения отрыва использовалась та же установка, что и на рис. 2 цв. вклейки. Образец фиксировался с помощью двух термоусадочных зажимов (см. рис. 4б цв. вклейки) на переходниках и располагался вертикально под постоянно возрастающей до момента разрушения нагрузкой P .

Измерение адгезионной прочности при сдвиге

Установка для измерения адгезионной прочности при сдвиге и ее схематическое изображение показаны на рис. 6 цв. вклейки. В качестве образца использовался диффузор со шкалой, обработанный таким образом, что исходный слой отложения был разрезан на ряд прямоугольных частей (прикрепленных естественным образом к стенкам), которые также не имели механического

**К СТАТЬЕ Н. Н. ВЕРИЧЕВА, В. В. МИШАКИНА
«КОНТРОЛЬ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СОЛЕОТЛОЖЕНИЙ
ПОГРУЖНЫХ СКВАЖИННЫХ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ»**



Рис. 1. Крыльчатки, диффузоры и впускная сетка, покрытые солеотложениями: последние два рисунка: сетка забора ЭЦН и отдельные образцы

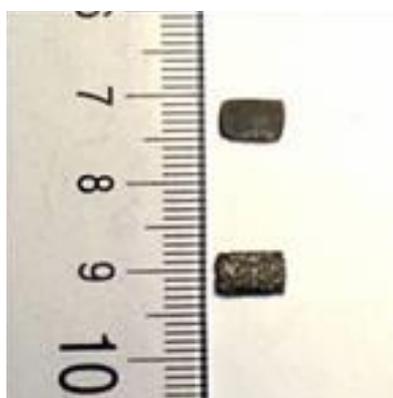


Рис. 2. Обработанные образцы для испытания на срез

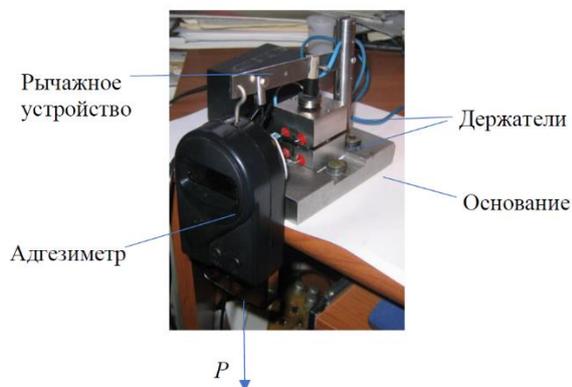
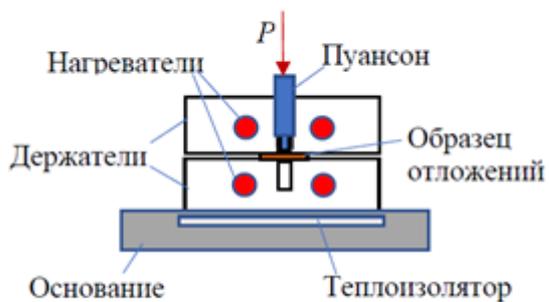
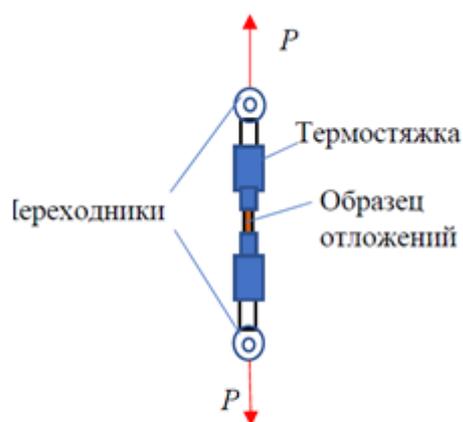


Рис. 3. Установка для измерения разрушающих напряжений сдвига



а



б

Рис. 4. Схематическое изображение установки для измерения напряжения на срез и отрыв



Рис. 5. Термоусадочные зажимы и разрушенный образец после эксперимента

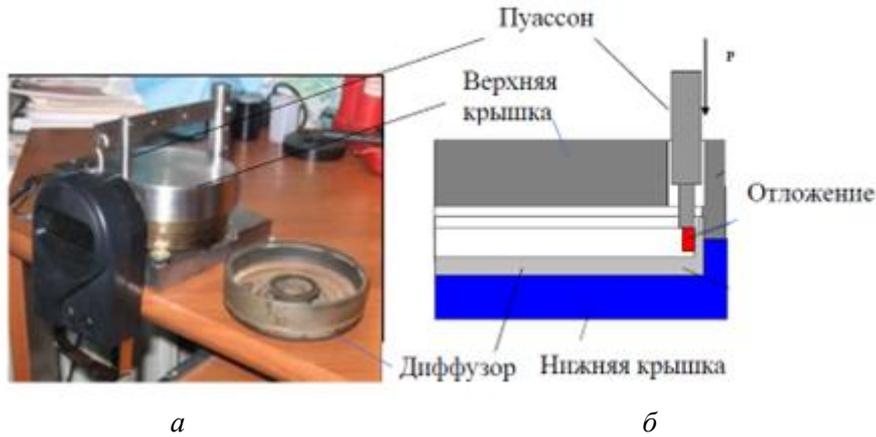


Рис. 6. Установка для измерения адгезионной прочности при сдвиге (а) и ее схематическое изображение (б)

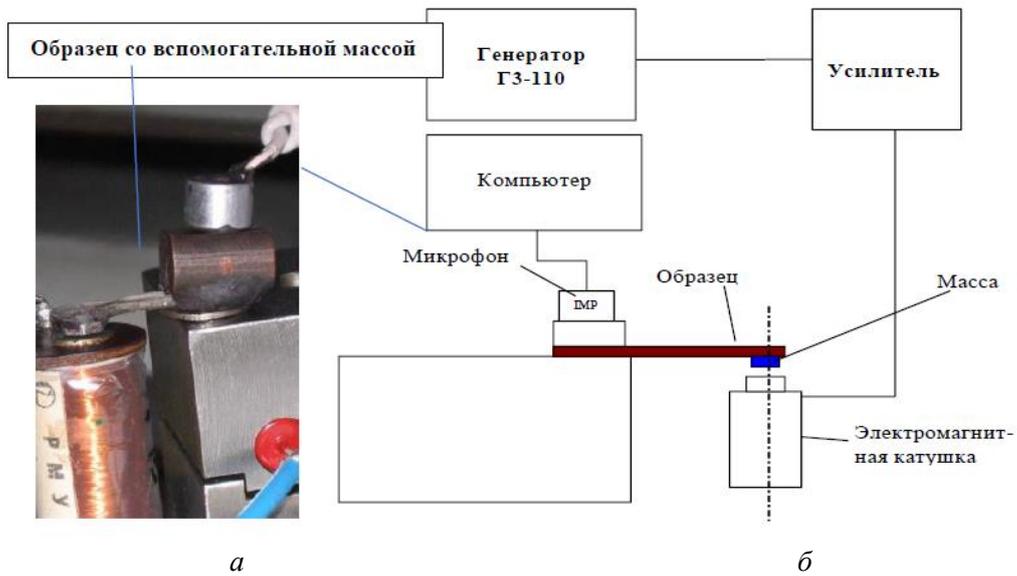


Рис. 7. Установка для измерения модуля Юнга (а) и ее схематическое изображение (б)

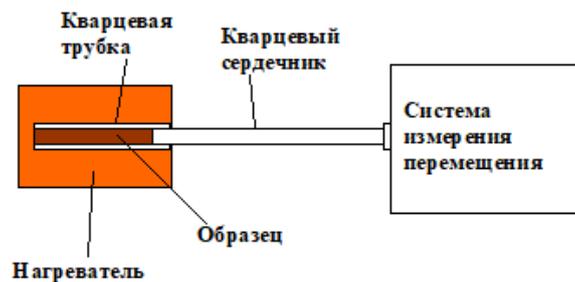


Рис. 8. Установка для измерения коэффициента теплового расширения

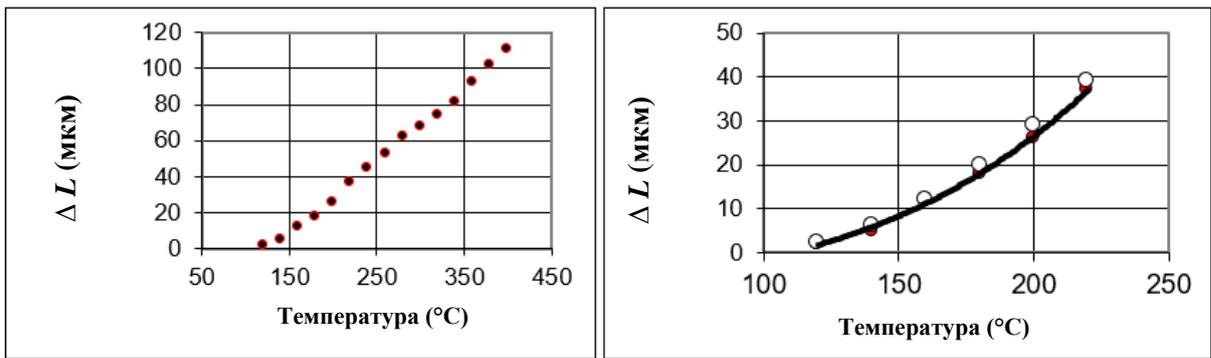


Рис. 12. Перемещение образца в зависимости от температуры (а) и его аппроксимация полиномом (б: сплошные точки – тест, полые точки – аппроксимация полиномом) в диапазоне температур 120-220 °С.

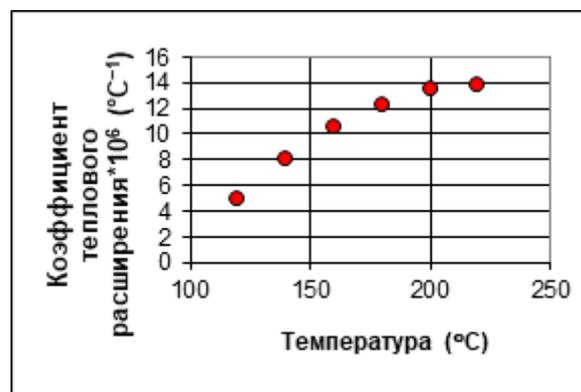


Рис. 13. Коэффициент теплового расширения в зависимости от температуры

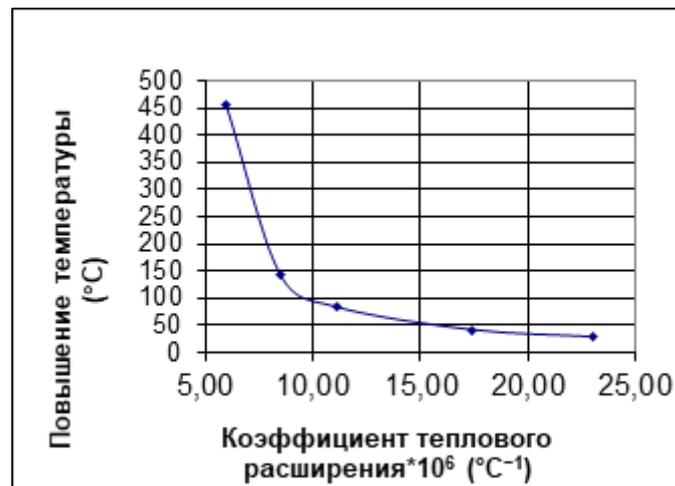


Рис. 14. Увеличение температуры, достаточное для достижения разрушающего напряжения сдвига осадка в зависимости от коэффициента теплового расширения материала



контакта с днищем (см. рис. 6 цв. вклейки, левый рисунок). Диффузор был размещен под металлической крышкой с отверстием для пуансона. Давление на пуансон оказывалось таким же образом, как и в предыдущих случаях.

Измерение модуля Юнга

Измерение модуля Юнга проводилось следующим образом. Исходный простой образец был обработан, как показано на рис. 7 цв. вклейки. Затем к одному концу образца прикрепляли маленькую массу из ферромагнетика и помещали над электромагнитной катушкой (см. рис. 7 цв. вклейки, левый рисунок), а другой конец образца закрепляли. Микрофон располагался над образцом и подключался к звуковому порту компьютера.

С помощью микрофона и регистрирующего устройства – компьютера определялась первая резонансная частота образцов с присоединенной массой. Средняя Резонансная частота составляла $\omega \approx 1200 \pm 100$ Гц. Она связана с модулем Юнга E следующим соотношением:

$$\omega = \sqrt{\frac{3EJ}{mL^3}}, J = \frac{bh^3}{12},$$

где m – величина вспомогательной массы; L, b, h – длина, ширина и высота образца, соответственно; J – осевой момент инерции.

В нашем случае $\rho \approx 2000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; $b = 0,0057$; $h = 0,0014$; $L = 0,0016$;

$m = 1,2$ г; $J = 1,13 \cdot 10^{-12} \text{ м}^4$, что в результате дает $E \approx 7,6 \pm 0,6$ ГПа.

Измерение коэффициента теплового расширения

Этот тест проводился с помощью универсального dilatометра ДКМ (возможность диапазона измерений 0–1000 °С). Образец помещали внутрь кварцевой трубки и нагревали до 400 °С с шагом 20 °С (см. рис. 6 цв. вклейки). Смещения ΔL измерялись с помощью кварцевого ядра и зеркальной измерительной системы с коэффициентом масштабирования 400.

Результаты экспериментальных исследований

Распределение полученного значения разрушающего напряжения сдвига показано на рис. 9, 10 цв. вклейки. Из этих рисунков видно, что при измерениях для образцов толщиной менее 1 мм напряжение сдвига выше, что можно объяснить масштабным эффектом. Для других образцов видно, что независимо от того, является ли образец сухим, нефтенасыщенным, распределение разрушающих напряжений сдвига в основном одинаково. Среднее значение – 2–2,5 МПа, максимальное значение около 4 МПа, погрешность измерения $\pm 0,1$ МПа.

На рис. 11 цв. вклейки показано полученное распределение адгезионной прочности. Исследование образцов на отрыв показало, что среднее/максимальное разрушающее напряжение отрыва составляет 1,2/2 МПа. Результаты измерений адгезионной прочности представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерений адгезионной прочности при сдвиге

Наименование показателей	Адгезионная прочность (МПа)
Усредненная прочность	1,63
Стандартное отклонение	0,6
Средняя прочность для сухих образцов	1,70
Усредненная для нефтенасыщенных образцов, последний тест	1,49
Усредненная для сухих образцов	1,96



На рис. 12 цв. вклейки показана зависимость смещения образца от температуры. Как видим, в диапазоне температур 120–220 °С наблюдается значительная нелинейность смещения образца от температуры T . Аппроксимация этой зависимости в этом диапазоне температур хорошо аппроксимируется зависимостью: $\Delta L = 0,0016T^2 - 0,2093T + 3,6571$ (рис. 12б). Коэффициент теплового расширения определялся как: $k_t^\circ = \frac{\Delta L}{L_0 \Delta T}$, где L_0 – начальная длина образца (в нашем случае $L_0 = 35$ мм).

На рис. 13 цв. вклейки показан коэффициент теплового расширения в $^\circ\text{C}^{-1}10^{-6}$ в зависимости от температуры.

В табл. 2 приведены для сравнения коэффициенты теплового расширения некоторых материалов.

Таблица 2

Коэффициенты теплового расширения

Материал	Температура, °С	Коэффициент теплового расширения, $^\circ\text{C}^{-1}10^{-6}$
Солеотложения	120	4,85
Кварц	40	0,4
Кирпич	20	3–9
Бетон	20	10–14
Дюралюминий	20	23

Коэффициенты теплового расширения образцов солеотложений по сравнению с другими материалами приведены в табл. 2.

В табл. 3 и на рис. 14 цв. вклейки даны значения увеличения температуры, достаточные для достижения разрушающего напряжения сдвига 4 МПа для исследуемого осадка на различных материалах.

Таблица 3

Повышение температуры для различных материалов

Материал	Коэффициент температурного расширения $10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	Увеличение температуры $^\circ\text{C}$
Дюралюминий	23	29
Медь	17,4	42
Сталь	11,1	84
Титан	8,5	144
Асбоцемент	6	458

Выводы и рекомендации

Разрушающие напряжения сдвига и отрыва имеют один порядок. Среднее/максимальное разрушающее напряжение сдвига 2,5/4 МПа; среднее/максимальное разрушающее напряжение отрыва составляет 1,2/2 МПа. Изменение температуры в диапазоне 20–100 °С как для сухих, так и для нефтенасыщенных образцов практически не влияет на разрушающие напряжения сдвига.



Средняя/максимальная адгезионная прочность составляет 1,4/2 МПа; при этом она выше для сухих образцов и примерно на 25 % меньше для нефтенасыщенных.

Коэффициент теплового расширения имеет нелинейную зависимость от температуры и изменяется от ~ 5 до ~ 15 $^{\circ}\text{C}^{-1} \cdot 10^{-6}$.

Установленная величина модуля Юнга $\sim 7,6$ ГПа, что близко к минимальному значению такового для цементов.

Рентгеноструктурный анализ показал, что рассматриваемые образцы представляют собой кальцит (CaCO_3) со средней величиной плотности $\rho \approx 2000$ кг/м³. Просмотр образца солеотложений под оптическим микроскопом показал, что частицы имеют диаметр от нескольких микрон до 15 микрон.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИПФ РАН на 2021–2023 гг. по теме № 0030-2021-0025, регистрационный номер в ЕГИСУ НИОКТР 121071600007-3.

VERICHEV Nikolay Nikolaevich, candidate of physical and mathematical sciences, senior researcher, MISHAKIN Vasilii Vasilevich, doctor of technical sciences, chief researcher

CONTROL OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF SCALE OF SUBMERSIBLE DOWNHOLE ELECTRIC CENTRIFUGAL PUMPS

Mechanical Engineering Research Institute of the RAS – Branch of Federal Research Center A. V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences
85, Belinsky St., Nizhny Novgorod, Russia. Tel.: +7 (831) 432-03-00;
e-mail: ndt@ipmran.ru

Key words: scales deposits, electric submersible pump, elastic modules, adhesion, destructive stresses.

This work is devoted to an experimental study of the mechanical properties of scales deposits of electric submersible pumps. In particular, quantitative estimates were obtained for shear and rupture stresses, adhesion stress, Young's modulus, and thermal expansion coefficient. Due to the non-standard geometry of the samples, a special technique was developed for each type of measurement. The results obtained can be used to estimate parameters of vibroacoustic systems used to prevent scales deposits of this type, as well as to fight existing deposits.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Mike Crabtree, David Eslinger, Phil Fletcher, Matt Miller, Ashley Johnson, George King. Fighting Scale – Removal and Prevention // Oilfield Review, Autumn, 1999. P. 30-45.
2. M. Nergaard, C. Grimholt. An Introduction to Scaling causes, problems and solutions // Term paper for the course TPG, Environmental Science, 2010.
3. A. Olajire. A review of oilfield scale management technology for oil and gas production // Journal of Petroleum Science and Engineering. Vol. 135. November, 2015. P. 723-737.
4. G. Nasr, M. Burby. DESCALING FROM DOWNHOLE TUBING OF OIL AND GAS WELLS USING HIGH PRESSURE WATER // ICLASS-2006, Aug. 27-Sept.1, 2006, Kyoto, Japan, Paper ID ICLASS06-013. P. 1–7.



5. Muhammad Shahzad Kamal, Ibelwaleed Hussein, Mohamed Mahmoud, Abdullah S. Sultan, Mohammed A.S. Saad. Oilfield scale formation and chemical removal: A review // *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 171, December 2018. P. 127-139.
6. Kalpana Chauhan, Poonam Sharma, Ghanshyam S. Chauhan. Removal/Dissolution of Mineral Scale Deposits / Mineral Scales and Deposits, *Scientific and Technological Approaches*, 2015. P. 701–720.
7. Ping Zhang, Amy T. Kan, Mason B. Tomson. Oil Field Mineral Scale Control / Mineral Scales and Deposits, *Scientific and Technological Approaches*, 2015. P. 603–617.
8. Zhiqian Cao, Yandi Hu, Huazhang Zhao, Bo Cao, Ping Zhang. Sulfate mineral scaling: From fundamental mechanisms to control strategies // *Water Research*, Vol. 222, 15 August 2022, 118945.
9. Ali Ansari, Janire Peña-Bahamonde, Sofia K. Fanourakis, Yandi Hu, Debora F. Rodrigues. Microbially-induced mineral scaling in desalination conditions: Mechanisms and effects of commercial antiscalants // *Water Research*, Vol. 179, 15 July 2020, 115863.
10. Ali A. Al-Hamzah a, Christopher M. Fellows. A comparative study of novel scale inhibitors with commercial scale inhibitors used in seawater desalination // *Desalination*, Volume 359, 2 March 2015. P. 22–25.
11. Hao Zhang, Zhiming Xu, Yu Zhao, Jingtao Wang, Bingbing Wang. Combined quantum mechanics and molecular dynamics study on the calcite scale inhibition mechanism of carboxymethyl dextran // *Desalination*, Vol. 553, 1 May 2023, 116503.

© Н. Н. Веричев, В. В. Мишакин, 2023

Получено: 07.07.2023 г.