

**С.В. Ладанов**<sup>1</sup>, e-mail: ladanov@inbox.ru; **Ю.В. Кирпичев**<sup>2</sup>, e-mail: kirpichev@ream-rti.ru;  
**А.В. Радлевич**<sup>3</sup>, e-mail: radlevich@gmail.com; **Б.А. Серафимов**<sup>3</sup>, e-mail: tlkinter2016@yandex.ru;  
**В.Г. Тимошенко**<sup>2</sup>, e-mail: tvg@ream-rti.ru

<sup>1</sup> ООО «СЭТ» (Москва, Россия).

<sup>2</sup> ООО «РЕАМ-РТИ» (Москва, Россия).

<sup>3</sup> ООО «ТЛК «ИНТЕР» (Фрязино, Россия).

## Гибридные гидрофобные поверхности в борьбе с солеотложением на деталях нефтепогружного оборудования

Высокая минерализация пластовой жидкости приводит к повышению риска солеотложений и, как следствие, отказов нефтепогружного оборудования. В статье рассматриваются различные причины, а также методы предотвращения солеотложений на рабочих органах погружного оборудования, одним из которых является модификация поверхностей, контактирующих с пластовой жидкостью. Придание гидрофобных свойств поверхностям нефтепогружного оборудования является одним из эффективных методов снижения адгезии солей. Для этого на поверхность деталей фильтрующих элементов скважинных фильтров и рабочих органов погружных насосов наносятся гидрофобные покрытия. К числу наиболее перспективных, в том числе с экономической точки зрения, относятся гидрофобные фторорганические и кремнийорганические покрытия, применение которых обеспечивает невозможность закрепления солей на поверхности оборудования и таким образом способствует снижению риска солеотложений.

**Ключевые слова:** солеотложение, гидрофобность, покрытие, рабочие органы, нефтепогружное оборудование.

При добыче скважинных жидкостей, например нефти, одной из наиболее распространенных причин отказа нефтепогружного оборудования (НПО) является солеотложение на погружном электродвигателе (ПЭД), рабочих органах электроприводных центробежных насосов (ЭЦН), в фильтрующих системах (рис. 1). Доля отказов установок электроцентробежных насосов (УЭЦН) по причине солеобразования в некоторых компаниях достигает 30 % общего числа отказов глубинно-насосного оборудования [1].

### ОСНОВНЫЕ ПРИЧИНЫ ОТЛОЖЕНИЯ СОЛЕЙ

Можно выделить несколько основных причин образования солеотложений на рабочих органах УЭЦН [2] и в скважинных фильтрующих системах. В их числе:

- состав пластовой жидкости (высокая обводненность, наличие растворенных и нерастворенных природных минералов);
- изменение термобарических условий в скважине в процессе интенсивного отбора жидкости для поддержания проектных темпов разработки место-



Рис. 1. Солеотложение на входном модуле нефтепогружного оборудования

рождения, приводящее к выпадению осадка. Так, смещение рабочей зоны в левую часть гидродинамической характеристики приводит к повышению температуры перекачиваемой жидкости и интенсификации кавитационных процессов и, как следствие, к выпадению осадка;

- смешивание пластовых вод с закачиваемыми водами другого состава, которое может привести к образованию

солеобразующих соединений и агрессивной среды;

- конструктивное исполнение ЭЦН (образование застойных зон, коррозия поверхности).

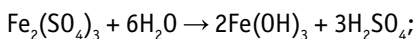
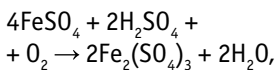
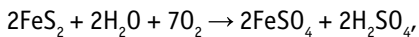
Солеотложения на поверхностях проточной части НПО при освоении скважин с высоким уровнем обводненности уменьшают просвет проточных каналов в рабочих органах ЭЦН и фильтрующих системах, что обуславливает сниже-

ние производительности насоса вплоть до отказа оборудования.

Для повышения нефтеотдачи фонда скважин используют системы поддержания пластового давления, нагнетающие воду в нагнетательные скважины из доступных водных ресурсов, минерализация которых может достигать до 400 г/л. Растворенные в воде соли главным образом состоят из карбонатов, сульфатов, галитов (хлорид натрия) и сульфидов. К примеру, главной причиной выпадения сульфатов кальция, стронция, бария является смешение подземных пластовых вод хлоркальциевого типа с нагнетаемой водой, содержащей сульфат-ионы [3].

Наиболее надежным средством предупреждения и борьбы с осадками гипса, барита и целестина служит применение для заводнения бессульфатных высокоминерализованных вод [4]. Использование пресной воды не всегда приводит к успеху. Эти воды, особенно насыщенные кислородом, могут обогащаться сульфат-ионами при движении по пласту за счет химических реакций:

- окисления сульфидов:



- выщелачивания (растворения) гипса, содержащегося в породе пласта;
- десорбции сульфат-ионов с поверхности порового пространства пород. Даже простое разбавление насыщенной сульфатами пластовой воды способствует их выпадению в осадок, поскольку растворимость сульфатов заметно снижается с уменьшением минерализации растворов. В том же направлении воздействует охлаждение пластов, происходящее при их заводнении пресными поверхностными водами [5].

Подъем по скважине добываемой продукции сопровождается снижением температуры и давления. Пузырьки газа, выделяющиеся из жидкости при снижении давления ниже давления насыщения, в основном оседают на стенках оборудования. Это ведет

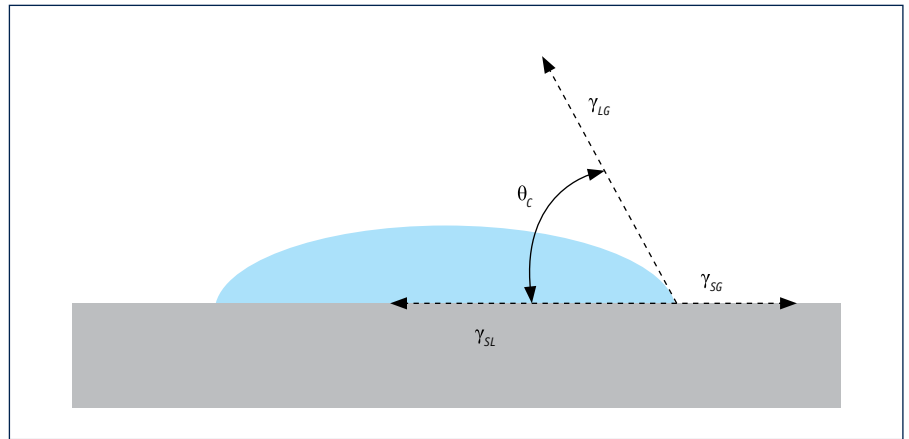


Рис. 2. Краевой угол смачивания:

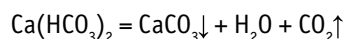
$\theta_c$  – угол контакта, т. е. угол, который образуется между каплей жидкости и поверхностью

твёрдой или иной фазы;  $\gamma_{LG}$  – равновесное состояние между жидкостью и газовой фазой;

$\gamma_{SG}$  – равновесное состояние между твёрдой и газовой фазами;  $\gamma_{SL}$  – равновесное состояние между твёрдой и жидкой фазами

к образованию многочисленных границ раздела фаз «твёрдое тело – жидкость – газ», на которых имеются благоприятные условия для зарождения и роста кристаллов. Появление в потоке газовой фазы нарушает ламинарный подслои и повышает степень турбулизации газожидкостной смеси. Далее при определенных условиях может возникнуть четочная структура потока, характеризующаяся чередованием движущихся четок нефти и газа. При этом увеличивается интенсивность перемешивания пересыщенных водно-солевых систем, приводящая к ускорению процессов зарождения кристаллов

В продукции скважин при изменении термобарических условий происходит перераспределение компонентов скважинных флюидов между водной, нефтяной и газовой фазами, что приводит к снижению содержания углекислоты в воде и, как следствие, к смещению равновесия химической реакции в правую сторону и выпадению карбоната кальция:



В результате происходит отложение карбонатов на поверхности рабочих колес ЭЦН и внутри насосно-компрессорных труб.

Существенным фактором, оказывающим влияние на солеотложение, в особенности в низкообводненных скважинах,

является частичное испарение воды в газовую фазу в процессе разгазирования скважинной продукции. В процессе испарения воды происходит общее понижение растворимости солей, и в осадок могут перейти и растворимые в обычных условиях соли – хлориды щелочных и щелочноземельных металлов. Кроме того, к числу причин интенсивного отложения карбоната кальция и гипса на рабочих колесах ЭЦН относится повышение температуры добываемой жидкости из-за теплоотдачи от работающего ПЭД. Как показывает расчет, в зависимости от дебита скважины температура добываемой жидкости повышается из-за теплоотдачи от ПЭД на 4–15 °С. А поскольку с ростом температуры снижается растворимость сульфата и карбоната кальция, это приводит к отложению выпавшей соли на рабочих колесах ЭЦН [4].

#### МЕТОДЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ОТЛОЖЕНИЯ СОЛЕЙ

Методы предупреждения отложения солей делятся на физические, химические и технологические. Физические заключаются в воздействии на продукцию магнитным либо акустическим полем. При химических методах применяют различные ингибиторы солеотложения. Технологические методы предусматривают использование защитных покрытий, подбор и подготовку рабочего агента для системы поддержания



Рис. 3. Рабочее колесо производства ООО «Ижнефтепласт» из полимерной композиции на основе PPS (краевой угол смачивания – 72,4°)

пластового давления, изменение технологических режимов работы скважин и насосного оборудования, а также ограничение водопритоков в скважине [2].

В целях предотвращения солеотложений в системах поддержания пластового давления используются химические методы (ингибиторы солеотложения разного типа, промывка кислотами и т. д.), электрохимическое воздействие и т. д. Эффективными технологическими методами предотвращения солеотложений в ЭЦН являются применение низкоадгезионных рабочих органов ЭЦН из полимерных материалов с повышенной стойкостью к солеотложению и (или) модификация поверхностей рабочих органов ЭЦН (придание поверхности гидрофобных свойств, препятствующих солеотложению). Например, рабочие колеса ЭЦН из полимерной композиции на основе полифениленсульфида (PPS) достаточно успешно справляются с поставленной задачей

(работа в условиях солеотложения) (рис. 3) [6].

Поскольку соли являются водорастворимыми, для оценки уровня адгезии поверхности к солям можно использовать характеристику гидрофобности: чем выше гидрофобность, тем хуже соли закрепляются на поверхности изделия. Экспресс-методом оценки низкой адгезии поверхности к солям является краевой угол смачивания (КУС), то есть угол, который образуется между касательной, проведенной к поверхности фазы «жидкость – газ», и твердой поверхностью с вершиной, располагающейся в точке контакта трех фаз (рис. 2). Гидрофобные покрытия должны обеспечивать КУС не менее 90° [7]. К примеру, разработанные специалистами ООО «РЕАМ-РТИ» композиции марки ППС-СИ демонстрируют КУС более 110°.

Порошковыми покрытиями из полимерных композиций, например на основе PPS, можно модифицировать поверхности оборудования: рабочих органов и корпусных деталей НПО. Нанесение покрытия требует наличия специального оборудования, первичной подготовки поверхности изделия и последующей высокотемпературной термической обработки – закрепления оплавлением. Однако толщина таких покрытий составляет не менее 80 мкм, что препятствует их применению на фильтрующих решетках, предназначенных для фильтрации механических частиц менее 200 мкм (рис. 4).

Работая над решением задачи придания гидрофобных качеств фильтрующим решеткам из прессованных проволочных

проницаемых матриц из проволочно-проницаемого материала (ППМ), специалисты ООО «РЕАМ-РТИ» обратили внимание на то, что ряд полимерных соединений существует в форме суспензий [8], способных придать поверхностям гидрофобные свойства. Причем при использовании суспензий на обрабатываемой поверхности образуется тончайшая гидрофобная полимерная пленка (рис. 5).

С экономической точки зрения наиболее интересными вариантами оказались гидрофобные среды на основе различных фторорганических и кремнийорганических соединений. Первоначально в рамках исследования изучались покрытия в жидкой форме. Было установлено, что КУС покрытия на основе этих соединений превышает 95° [9]. Технология их нанесения относительно проста и включает следующие этапы:

- предварительная подготовка поверхности детали, например пескоструйная обработка;
- нанесение покрытия методом окунания;
- сушка;
- закрепление в печи.

Однако фторсоединения, в отличие от силанов, обладают не очень хорошей адгезией к металлам. Поэтому усилия разработчиков были направлены на получение и применение гибридных фторорганических и кремнийорганических соединений. И такой продукт получен, причем его КУС достигает 118°. Пример измерения КУС на обработанной металлической поверхности ППМ представлен на рис. 6.

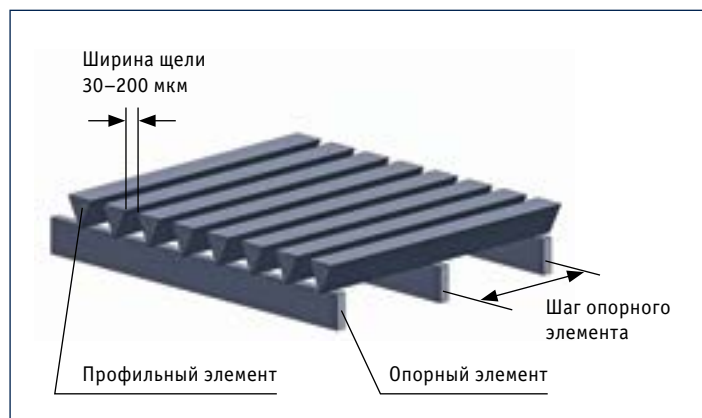


Рис. 4. Фильтрующая щелевая решетка Джонсона

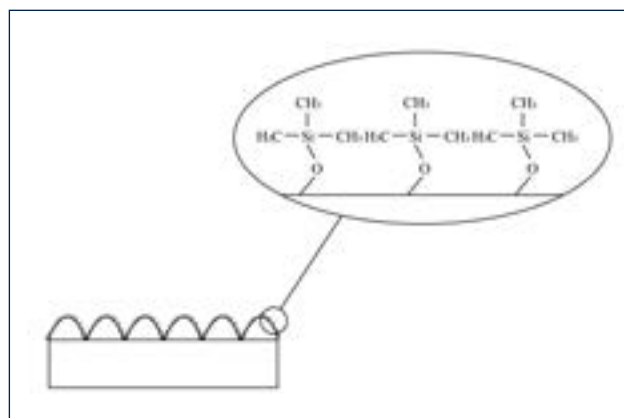


Рис. 5. Формирование гидрофобной полимерной пленки на обрабатываемой поверхности изделия

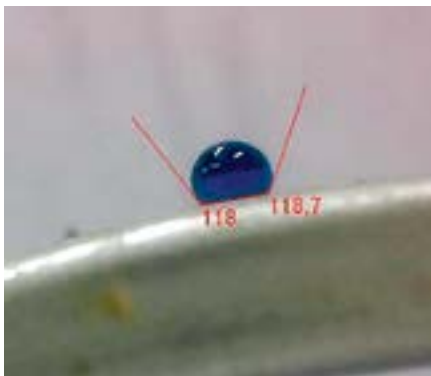


Рис. 6. Краевой угол смачивания на проволочной поверхности фильтроэлемента



Рис. 7. Блок фильтрующий с гидрофобным покрытием, капля окрашенной воды на поверхности проволочно-проницаемого материала

Обработанная поверхность была также проверена на олеофобность. В этом случае КУС составил  $84^\circ$ , однако смачивания поверхности маслом не происходило. Таким образом, можно говорить о том, что покрытие может быть применимо для предотвращения асфальто-смолопарафиновых отложений (АСПО). Солеотложение формируется на рабочих органах в застойных зонах (в зонах малых скоростей), так как в зонах проточных каналов абразив, присутствующий в пластовой жидкости, не позволяет солям откладываться. Формируемое гидрофобное покрытие не является абразивостойким, но может сохраняться в застойных зонах и предотвращать солеотложение. Выбор гидрофобизатора определяется характером обрабатываемого материала [10].

### ВЫВОДЫ

ООО «РЕАМ-РТИ» является поставщиком фильтров входных модулей ЭЦН на основе ППМ с тонкостью фильтрации от 30 мкм. Модули имеют ряд преимуществ перед другими фильтрующими системами, в числе которых низкое гидравлическое сопротивление, высокие скважность и пропускная способность, регенерируемость, а также упругие свойства материала, обеспечивающие длительную и эффективную работу оборудования в составе УЭЦН. Изготовлена опытная партия фильтрующих блоков с фильтроэлементами из ППМ в составе фильтров – входных модулей для проведения опытных промысловых испытаний. Обработка данных фильтроэлементов гибридным гидрофобным покрытием (рис. 7) позволяет защитить филь-

трующие решетки от солеотложений, увеличивая наработку. Кроме того, фильтроэлементы с гибридным гидрофобным покрытием теоретически могут быть использованы для сепарации нефтепродуктов из обводненной пластовой жидкости.



ООО «РЕАМ-РТИ»  
143902, РФ, Московская обл.,  
г. Балашиха, ул. Советская, д. 36  
Тел.: +7 (495) 149-00-90  
e-mail: info@ream-rti.ru  
www.ream-rti.ru

### Литература:

1. Оборудование для защиты установок электроцентробежных насосов от солеотложений и коррозии [Электронный источник]. Режим доступа: <https://neftegaz.ru/science/Oborudovanie-uslugi-materialy/331447-oborudovanie-dlya-zashchity-ustanovok-elektrotsentrobezhnykh-nasosov-ot-soleotlozheniy-i-korroziy/> (дата обращения: 14.06.2020).
2. Разумов А.И. Опыт работы НГДУ «Сургутнефть» с фондом скважин, подверженных солеотложению на рабочих органах электроцентробежных насосов // Нефтяное хозяйство. 2014. № 3. С. 80–82.
3. Кащавцев В.Е., Мищенко И.Т. Солеобразование при добыче нефти. М.: Орбита-М, 2004. 432 с.
4. Соли: Междисциплинарный проект [Электронный источник]. Режим доступа: <https://present5.com/mezhdisciplinarnyj-proekt-soli-ne-uchite-mnogo-pe-uchite/> (дата обращения: 14.06.2020).
5. Цепляев И.И., Ильзит Е.И. Причины, методы и профилактика развития солеотложений на примере месторождений ПАО «Сургутнефтегаз» в Восточной Сибири // Инженерная практика. 2019. № 11–12. С. 22–29.
6. Несолоно добывши: борьба с солеотложением на скважинном оборудовании [Электронный источник]. Режим доступа: <https://glavteh.ru/несолоно-добывши-борьба-с-солеотложе/> (дата обращения: 14.06.2020).
7. Алентьев А.А., Клетченков И.И., Пашенко А.А. Кремнийорганические гидрофобизаторы. Киев: Государственное издательство технической литературы УССР, 1962. 114 с.
8. Способ получения фторсодержащих сополимеров: пат. 1155161 СССР, МПК С08F 220/24 / А. Дессэн; заявитель и патентообладатель «Продюж Шимик Южин Кюльман» (Франция); № 3372849/23-05; заявл. 22.12.1981; опубл. 07.05.1985, Бюл. № 17. 15 с.
9. Миков Д.А., Кутырев А.Е., Петрова В.А. Гидрофобизирующие составы для дополнительной защиты алюминиевых сплавов в топливных системах изделий авиатехники // Труды ВИАМ. 2015. № 9. С. 66–72.
10. Полушерстяная ткань с комплексом резистентных защитных свойств: пат. 2506358 РФ, МПК D03D 15/00, D03D 15/08, D06M 13/00, D06M 13/322 / С.А. Кочаров, А.А. Ильин, В.А. Грищенко, В.Д. Привалова; заявитель и патентообладатель Минпромторг России; № 201243338/12; заявл. 10.10.2012; опубл. 10.02.2014, Бюл. № 4. 6 с.