

УДК 537.8:622.276.8

Практика применения аппаратов магнитной обработки для интенсификации процессов первичной подготовки нефти

И.А.ГОЛУБЕВ¹, А.В.ГОЛУБЕВ², А.Б.ЛАПТЕВ³

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

²ООО «Уфимское технико-технологическое предприятие», Уфа, Республика Башкортостан, Россия

³Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, Москва, Россия

Как цитировать эту статью: Голубев И.А. Практика применения аппаратов магнитной обработки для интенсификации процессов первичной подготовки нефти / И.А.Голубев, А.В.Голубев, А.Б.Лаптев // Записки Горного института. 2020. Т. 245. С. 554-560. DOI: 10.31897/ PMI.2020.5.7

Аннотация. При первичной подготовке нефти, газа и воды возникают осложнения, связанные с наличием стойких водонефтяных эмульсий, вызывающих рост давления жидкости в системах сбора, порывы коллекторов, а также затруднения сепарации газа и предварительный сброс воды на установке предварительного сброса (УПС). Дополнительные проблемы возникают при транспортировке высокопарафинистых нефей, связанные с кристаллизацией парафина в проточной части нефтепромыслового оборудования и на внутренней поверхности труб, приводящие к падению производительности магистралей.

В статье рассмотрена технология магнито-реагентной обработки водонефтяных сред, позволяющая интенсифицировать процессы первичной подготовки нефти на объектах ее добычи. Проведенные стендовые и опытно-промышленные испытания показали способность магнитного поля ускорять процессы деэмульсации нефти, увеличивая процент отделившейся воды при последующем отстаивании, и уменьшать асфальтосмолопарафиновые отложения (АСПО) на внутренней поверхности нефтегазопромыслового оборудования.

Описан механизм действия магнитного поля на водонефтяные среды. Изучено влияние обработки на целостность бронирующих оболочек водонефтяных эмульсий. Исследованы различные режимы магнитной обработки с точки зрения оценки ее эффективности. Показано, что наилучший эффект достигается при совместном использовании реагентов и магнитного поля. Наблюдается синергетический эффект, заключающийся в повышении их эффективности. Это позволило сделать вывод о возможности использования данного метода для сокращения расхода используемых в нефтедобыче реагентов при сохранении эффективности обработки.

Ключевые слова: магнитная обработка; магнитогидродинамическая обработка; разрушение эмульсий; деэмульсация нефти; интенсификация подготовки нефти; борьба с асфальтосмолопарафиновыми отложениями; импульсная магнитная обработка; снижение расхода реагентов

Введение. С 60-х годов XX в. в нефтепромысловом деле ведутся попытки внедрения аппаратов магнитной обработки (МО) в технологические процессы сбора и промысловой подготовки нефти, газа и воды. Известно достаточно большое количество положительных результатов опытно-промышленных испытаний и внедрений различных конструкций аппаратов МО для обработки добываемых, закачиваемых в пласт и транспортируемых по трубопроводам водонефтяных сред с целью изменения их физико-химической активности и реологических свойств.

Несмотря на убедительные достижения в области магнитной обработки нефтепромысловых сред (работы В.И.Лесина [4, 5], А.Х.Мирзаджанзаде [6, 7] и других [2, 10, 14, 17]), существуют проблемы, связанные с невысокой повторяемостью удовлетворительных результатов на практике.

В силу специфики нефтепромыслового оборудования наибольшее распространение получили аппараты с постоянными магнитами, легкомонтируемые и не требующие специальной подготовки обслуживающего персонала [16]. Но имеющиеся недостатки, заключающиеся в низкой напряженности магнитного поля (МП), отсутствии возможности регулирования параметров обработки под изменяющиеся физико-химические свойства перекачиваемой среды, а так же способности накапливать в процессе эксплуатации ферромагнитные примеси [13] на поверхности постоянных магнитов, не позволили применять их для широкого круга задач. Другой тип используемых аппаратов – электромагнитные установки – имеет принципиально другое исполнение, однако схожую с аппаратами на постоянных магнитах проблему – низкую напряженность магнитного поля [8].

В результате анализа теоретических объяснений физических принципов работы и показаний математического аппарата для расчета устройств магнитогидродинамической обработки потоков водонефтяных сред нами было установлено, что данные устройства рассчитывались и использовались в условиях ламинарного течения потока жидкости. В этих условиях оправдана схема, при которой линии магнитной индукции направлены перпендикулярно вектору скорости движения

единичных объемов жидкости. Однако при турбулизации потока в нем образуются хаотически направленные вихри, вектор скорости которых, в противоположность ламинарному течению, направлен не вдоль образующей трубопровода, а перпендикулярно или под углом к образующей. В этом случае направление вектора магнитной индукции может быть не перпендикулярным к вектору потока, а совпадать с ним или находиться под углом. Вихри в турбулентном потоке движутся хаотично и зачастую в противоположных направлениях. С одной стороны это увеличивает гидравлическое сопротивление, а с другой – позволяет увеличить эффективность магнитного воздействия, при котором, например, вероятность контакта взвешенных глобул нефти с измененным в магнитном поле поверхностным зарядом возрастает.

Таким образом, схема и расчетные зависимости магнитной обработки могут быть применены для схемы МО с использованием соленоида – направление линий магнитной индукции совпадает с направлением потока. Для получения максимальных значений магнитной индукции создаваемых в соленоиде магнитных полей с высоким значением напряженности, способных оказывать максимальное воздействие на обрабатываемую среду, в разработанной установке используется импульсный режим обработки [12]. Импульсная магнитная установка (ИМУ) состоит из генератора токов низкой частоты и соединенного с ним посредством кабеля соленоида, монтируемого фланцевым соединением на участок трубопровода (рис.1).

Поток жидкости, протекая по немагнитному трубопроводу, являющемуся частью соленоида, подвергается воздействию сильных магнитных полей (400 кА/м). Низкая шероховатость поверхности, а также монолитность конструкции (отсутствие переходов, вызванных необходимостью монтажа постоянных магнитов) препятствуют возможному отложению примесей в устройстве. Генератор импульсов токов обеспечивает изменение частоты следования импульсов тока в пределах 0-50 Гц. Потребность в регулировке обусловлена необходимостью подбора оптимальных параметров обработки для водонефтяных сред с различными физико-химическими и структурно-механическими свойствами.

Использованные в практике нефтедобычи электромагнитные установки [9] работали в сравнительно широком диапазоне частот. После проведения большого количества экспериментов верхний предел частоты в нашей установке был ограничен значением в 50 Гц в связи со снижением эффективности при дальнейшем увеличении частоты импульсов. Для генерации сильных импульсных магнитных полей (1,2 Тл) в накопительно-технологическом узле установки ИМУ используется конденсаторная батарея как наиболее эффективный источник энергии. В конструкции данного типа частота магнитного поля обратно пропорционально зависит от энергии, отданной конденсатором. Поскольку между энергией, запасенной в конденсаторе, и энергией магнитного поля в соленоиде существует прямая зависимость, увеличение частоты уменьшит напряженность, а значит и ток, проходящий через соленоид, и, как следствие, – снизит эффективность магнитной обработки.

Разрушение водонефтяных эмульсий. Значительные осложнения в технологию добычи, сбора и подготовки нефти вносит обводнение продуктивных пластов нефтяных месторождений. Эти осложнения связаны с образованием водонефтяных эмульсий, обладающих высокими значениями вязкости и стойкости к разрушению [1]. Основным способом разрушения стойких эмульсий на промысле (подготовки сложных по составу нефтезагрязненных сточных вод) остается метод внутритрубной деэмульсации, основанный на добавлении к продукции при ее транспорте реагента-деэмульгатора. При введении реагентов в нефтяную эмульсию на границе раздела нефть-вода протекают следующие процессы: деэмульгатор, обладая большей поверхностной активностью, адсорбируясь на межфазной поверхности глобулы нефти, вытес-



Рис.1. Установка «ИМУ-2» на объекте испытаний



няет природные стабилизаторы – эмульгаторы. Молекулы деэмульгаторов изменяют смачиваемость, что способствует переходу этих частиц с границы раздела в объем водной или нефтяной фазы, что приводит к коалесценции.

Проведенные авторами данной статьи исследования [18] показали, что в результате магнитной обработки водонефтяных сред поверхностное натяжение на границе раздела фаз нефть-вода снижается на 20 %. Наблюдается падение устойчивости дисперсной системы, вызванное изменением полярности молекул на границе раздела фаз. Поскольку механизмы действия магнитного поля и деэмульгатора на снижение стабильности водонефтяных эмульсий принципиально схожи между собой, было выдвинуто предположение о возможности магнитной обработки интенсифицировать процессы внутритрубной деэмульсации.

Методика постановки эксперимента 1. Для оценки влияния магнитной обработки на скорость расслоения водонефтяных эмульсий и изучения возможного синергетического эффекта от совместной работы магнитного поля и деэмульгатора использовался бутылочный тест. Метод заключается в определении объема воды, выделившейся из нефтяной эмульсии в градуированных колбах через определенные промежутки времени.

В ходе испытаний пробы нефти обрабатывались магнитным полем как в присутствии деэмульгатора, так и без него. Снятие показаний проводилось через равные промежутки времени (5, 15, 30, 45 мин; 1, 2, 3, 4, 12 и 24 ч). В качестве объекта исследования использовалась водонефтяная эмульсия, не содержащая химических реагентов и ПАВ, остаточная обводненность 57-58 %, в качестве химреагента использовался деэмульгатор «Реапон».

Испытывались следующие варианты обработки:

- БЛАНК – проба эмульсии без обработки магнитным полем (МП) или деэмульгатором (ДЕЭМ);
- 15 (7,5 и 3,5) мг/л ДЕЭМ – проба эмульсии обработанная деэмульгатором с различной дозировкой (соответственно 15; 7,5; 3,5 мг/л);
- 15 (7,5 и 3,5) мг/л ДЕЭМ + МП – проба эмульсии, обработанная деэмульгатором с различной дозировкой и магнитным полем (соответственно 15; 7,5; 3,5 мг/л);
- МП – проба эмульсии с обработкой только магнитным полем.

Для всех комбинированных вариантов (ДЕЭМ + МП) сначала проводилось дозирование реагента, а затем обработка магнитным полем.

Поток через стендовую установку прокачивался со скоростью 3 м/с по трубке диаметром 10 мм. Число Рейнольдса составило 6830.

На рис.2 приведены результаты испытаний по оценке влияния различных вариантов обработки водонефтяной эмульсии на скорость ее расслоения.

Результаты исследования. 1. Обработка водонефтяных эмульсий магнитным полем ускоряет процесс расслоения. Процент отделившейся воды увеличивается в четыре раза (с 4 до 18 %) в сравнении с эмульсией, не подвергавшейся обработке. Рост динамики седиментации объясняется тем, что МП воздействует на бронирующие оболочки глобул нефти, включающей ферромагнетики (оксиды железа) и парамагнетики (АСПО). На находящиеся в эмульгированном состоянии глобулы действуют силы электростатического отталкивания и межмолекулярного притяжения (вандерваальсовы), действие этих сил скомпенсировано и препятствует слиянию. В результате магнитного воздействия на молекулы этих веществ дополнительно оказываются воздействие магнитные силы, совпадающие по направлению с электростатическими [11]. Если в статическом состоянии частицы пребывают в хаотическом, броуновском, движении, то при введении в магнитное поле они выстраиваются вдоль вектора

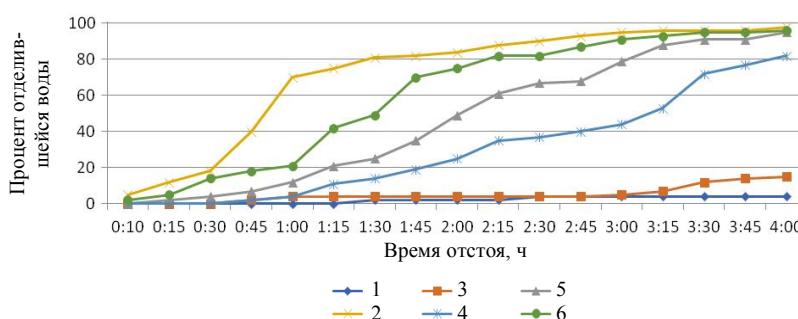


Рис.2. Кривые обезвоживания эмульсии

1 – БЛАНК; 2 – 15 мг/л ДЕЭМ + МП; 3 – МП; 4 – 7,5 мг/л ДЕЭМ; 5 – 15 мг/л ДЕЭМ;
6 – 7,5 мг/л ДЕЭМ + МП

магнитной индукции по направлению действия силы электростатического отталкивания. Такое поведение объясняется схожестью природы сил.

Поскольку молекулы ферромагнетиков и парамагнетиков легко ориентируются в магнитном поле, происходит их коагуляция в результате магнитного взаимодействия. Ориентация этих частиц (втягивание, притяжение) определяется градиентом напряженности магнитного поля (изменением магнитного поля во времени). Именно по этому параметру импульсная магнитная установка превосходит всех конкурентов и показывает наилучший эффект от воздействия.

2. Комплексная обработка реагентом (деэмульгатором) и электромагнитным полем приводит к увеличению эффективности, проявляется синергетический эффект – совместное действие пре-восходит эффект отдельно реагента и МП. При совместном участии магнитного поля и деэмульгатора работа магнитных сил уменьшает свободную поверхностную энергию системы. Снижение межфазной энергии способствует коагуляции глобул воды. В результате можно добиться ускорения процессов диссоциации при той же концентрации деэмульгатора либо снизить его расход, сохранив длительность деэмульсации.

3. Эффект от последовательной обработки эмульсии реагентом с дозировкой 7,5 мг/л, а затем магнитным полем сравним с эффектом от обработки нефти реагентом с дозировкой 15 мг/л. Сепарация воды не менее 90 % за период отстоя 3-3,5 ч.

4. Комплексная обработка эмульсии реагентом с дозировкой 15 мг/л и магнитным полем сокращает период отстоя для сепарации не менее 90 % воды до двух часов. Проявление синергетического эффекта от физико-химического воздействия позволяет рекомендовать использование данного метода обработки для сокращения расхода используемых реагентов при сохранении эффективности обработки.

Оценка эффективности снижения/предотвращения отложения АСПО. Другой крупной проблемой добычи нефти, вызывающей осложнения в работе скважин, нефтепромыслового оборудования и трубопроводов является асфальтосмолопарафиновые отложения (АСПО). Накопление их в проточной части нефтепромыслового оборудования и на внутренней поверхности труб приводит к падению производительности системы, уменьшению межремонтного периода скважин, снижению эффективности работы насосных установок и ряду других проблем.

Наиболее широко используемым в настоящее время способом борьбы с АСПО является химический метод, заключающийся в дозировании к добываемой (транспортируемой) продукции скважин реагентов, уменьшающих, а в ряде случаев полностью предотвращающих, образование отложений. В основе действия реагентов-ингибиторов парафиноотложений, лежат адсорбционные процессы, происходящие на границе раздела между жидкой фазой и твердой поверхностью [15].

К недостаткам данного метода можно отнести сложность подбора эффективного реагента, связанную с периодическим изменением условий эксплуатации в процессе разработки месторождения, а также существенные экономические затраты, обусловленные высокими дозировками реагентов (в ряде случаев значения достигают 400-450 г/т).

В настоящее время полностью исключить химические методы борьбы с АСПО не представляется возможным, поскольку на рынке не существует альтернативных способов, обладающих в равной степени всеми их преимуществами. В связи с этим нефтедобывающие компании активно занимаются поиском возможных способов сокращения расхода реагентов.

Одним из наиболее перспективных способов является рассматриваемая технология обработки нефти магнитным полем. Установлено [3], что под действием магнитных полей на движущуюся жидкость происходит разрушение агрегатов, состоящих из субмикронных ферромагнитных микрочастиц соединений железа, находящихся в типичных концентрациях 10-100 г/т в нефти и попутной воде. В каждом агрегате содержится от нескольких сотен до нескольких тысяч микрочастиц, поэтому разрушение агрегатов приводит к резкому (в 100-1000 раз) увеличению концентрации центров кристаллизации парафинов и солей и формированию на поверхности ферромагнитных частиц пузырьков газа микронных размеров. В результате разрушения агрегатов кристаллы парафина выпадают в виде тонкодисперсной объемной устойчивой взвеси, а скорость роста отложений уменьшается пропорционально уменьшению средних размеров выпавших совместно со смолами и асфальтенами в твердую фазу кристаллов парафина (рис.3).

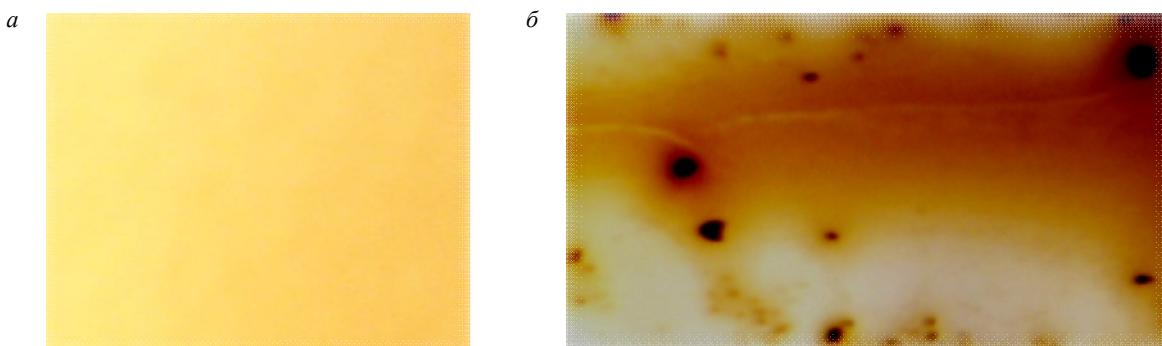


Рис.3. Увеличение центров кристаллизации АСПО после МП: *а* – до магнитной обработки; *б* – вынос коагулированных комплексов АСПО потоком

Методика постановки эксперимента 2. Для определения эффективности снижения АСПО при различных вариантах магнитной обработки нефти использован метод «Cold finger test» («Холодный стержень», РД 39-3-1273-85). Данный метод позволяет определить эффективность снижения/предотвращения отложения АСПО и оптимизировать концентрацию ингибитора, поскольку учитывает все этапы процесса: образование центров кристаллизации, рост и осаждение кристаллов парафина и тяжелых компонентов нефти (смол и асфальтенов), их разрушение (диспергирование) под действием движущегося нефтяного потока. Метод основан на измерении разницы между количеством АСПО, отложившихся на поверхности стержня без обработки нефти, и количеством АСПО, отложившихся на поверхности стержня после обработки нефти магнитным полем.

В качестве среды для испытаний использовалась подтоварная нефть, не обработанная депрессором или другими присадками, способствующими снижению АСПО, со следующими характеристиками: плотность при 20 °C – 0,817 г/см³; вязкость при 20 °C – 5,09 мм²/с; температура насыщения нефти парафином 22,5 °C; температура застывания нефти 9 °C.

Испытывались следующие варианты обработки нефти:

- БЛАНК (холостая проба – проба нефти без обработки магнитным полем или депрессором);
- 400 (300, 200) мг/л ДП (проба нефти с 400 мг/л депрессорной присадки);
- 300 (200) мг/л ДП + МП (проба нефти с 300 мг/л депрессорной присадки и последующей обработкой магнитным полем);
- МП (проба нефти с обработкой магнитным полем).

Все испытанные варианты обработки были оценены с предварительным нагревом нефти. Для комбинированных вариантов (ДП + МП) сначала проводилось дозирование реагента, а затем обработка магнитным полем.

В таблице приведены результаты испытаний по оценке эффективности влияния различных способов обработки на снижение АСПО.

Результаты испытаний

Вид обработки	1-е сутки			2-е сутки			3-е сутки		
	Э1	Э2	Эср	Э1	Э2	Эср	Э1	Э2	Эср
400 мг/л ДП	64,1	63,4	63,8	53,4	61,5	59,9	58,2	56,6	57,4
300 мг/л ДП + МП	70,6	73,2	71,9	57,5	60,3	58,9	46,3	47,4	46,9
300 мг/л ДП	56,5	56,9	56,7	49,6	47,8	48,7	44,0	43,5	43,8
200 мг/л ДП + МП	43,6	42,1	42,8	33,7	35,1	34,4	30,4	28,7	29,5
200 мг/л ДП	36,5	35,9	36,2	23,9	29,3	29,3	24,4	30,0	27,2
МП	25,3	24,3	24,8	12,6	15,0	13,8	12,8	10,7	11,7

Примечание. Э1, Э2 – результат замера эффективности обработки.

Результаты исследования. 1. Показано, что для турбулентных потоков промысловых жидкостей может быть применена схема магнитной обработки с совпадающими по направлению векторами скорости потока жидкости и магнитной индукции.

2. Комплексная обработка электромагнитным полем низкой частоты и реагентом приводит к повышению эффективности, проявляется синергетический эффект – совместное действие пре-восходит эффект отдельно реагента и электромагнитного поля;

3. Для всех способов обработки наибольший эффект обнаружен в первые сутки. Далее по истечении вторых и третьих суток эффективность снижается.

4. Эффект от последовательной обработки нефти реагентом с дозировкой 300 г/т, а затем магнитным полем в сравнении с эффектом от обработки нефти реагентом с дозировкой 400 г/т и находится на уровне 60-72 %;

5. Обработка нефти импульсным магнитным полем позволяет сократить расход применяемых реагентов-депарафинизаторов почти в два раза, параллельно повышая эффективность проводимых операций. Комбинирование методов позволяет усовершенствовать технологию борьбы с парафиноотложением в нефтегазовой промышленности путем повышения эффективности действия реагентов и сокращения их расхода.

Заключение. Полученные результаты исследований показали практическую целесообразность применения технологии магнитно-реагентной обработки для интенсификации процессов первичной подготовки нефти. При обработке водонефтяных сред магнитным полем наблюдается интенсификация процессов деэмульсации (увеличивается процент отделившейся воды при последующем отстаивании) и депарафинизации (снижается интенсивность АСПО на внутренней поверхности нефтегазопромыслового оборудования). При совместном применении магнитной и реагентной обработки наблюдается синергетический эффект, заключающийся в повышении эффективности деэмульгаторов, депарафинизаторов и сокращении их расхода. Приведенные зависимости в достаточной степени согласуются с аналогичными исследованиями по применению магнитной обработки в нефтегазовой отрасли.

Результаты проведенных исследований и технология магнитно-реагентной обработки могут быть использованы на объектах нефтедобычи для повышения эффективности существующих технологических процессов подготовки сырья. Сам метод можно считать экономически эффективным, поскольку при внедрении предлагаемой технологии не требуется проведения масштабной реконструкции (аппарат МО монтируется в существующую технологическую цепочку на начальном этапе подготовки) и больших материальных затрат.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антипин Ю.В. Предотвращение осложнений при добывче обводненной нефти / Ю.В.Антипин, М.Д.Валеев, А.Ш.Сыртланов. Уфа: Башкирское книжное изд-во. 1987. 168 с.
2. Купавых К.С. Опробование импульсного способа дегазации угольных пластов / К.С.Купавых, А.В.Шипулин // Горный журнал. 2018. № 5. С. 42-47. DOI: 10.17580/gzh.2018.05.12
3. Лесин В.И. Магнитные депарафинизаторы нового поколения // Изобретения и рацпредложения в нефтегазовой промышленности. 2001. № 1. С. 18-20.
4. Лесин В.И. Физико-химическая модель изменения нефте вытесняющих свойств воды после ее магнитной обработки // Нефтепромысловое дело. 2001. № 3. С. 15-17.
5. Лесин В.И. Физико-химические основы применения магнитных полей в процессах добычи, транспортировки, разработки и подготовки нефти // Фундаментальный базис нефтегазовых технологий. М.: Геос, 2003. С. 334-341.
6. Мосин О.В. Магнитная обработка воды в теплоэнергетике // Вода і водоочисні технології. Науково-технічні вісті. 2012. № 4(10)-2013. № 1(11). С. 12-25.
7. Патент РФ № 2021497. Способ увеличения приемистости нагнетательных скважин / А.Х. Мирзаджанзаде, И.М. Ахметов, Т.Ш. Салаватов и др. Опубл. 15.10.1994. Бюл. № 19.
8. Расчет параметров электромагнитной установки для обработки жидкости Ватьеганского месторождения ТПП «Когалымнефтегаз» / В.И.Максимочкин, Н.А.Хасанов, В.В.Шайдаков, Н.В.Инюшин, А.Б.Лаптев, В.С.Кузнецов // Нефтегазовое дело. 2002. № 1. С. 1-12.
9. Шаммазов А.М. Физико-химическое воздействие на перекачиваемые жидкости / А.М.Шаммазов, Ф.Р.Хайдаров, В.В.Шайдаков. Уфа: Монография. 2003. 187 с.
10. Busch K.W. Design of a test loop for the evaluation of magnetic water treatment devices / K.W.Busch, M.A.Busch, R.E.Darling, S.Maggard, S.W.Kubala // Process Safety and Environmental Protection. Transactions of the Institution of Chemical Engineers. 1977. Vol. 75. № 2. P. 105-114. DOI: 10.1205/095758297528878
11. Effect of Electric Fields on the Structure of an Aluminum Alloy during Magnetohydrodynamic Treatment / O.G.Ospennikova, A.B.Laptev, M.V.Pervukhin, V.N.Timofeev, D.A.Movenko // Russian Metallurgy (Metally). 2019. Vol. 2019. № 12. P. 1264-1267. DOI: 10.1134/S0036029519120152

12. Golubev I. Quality improvement of oil-contaminated wastewater, meant for injection into formation, using two-stage treatment technology / I.Golubev, Y.Karpova // I International Conference «Corrosion in the Oil and Gas Industry», May 22-24, 2019, Saint Petersburg, Russia. 2019. Vol. 121. 5 p. DOI: 10.1051/e3sconf/201912102006
13. Holysz L. Influence of impurity ions and magnetic field on the properties of freshly precipitated calcium carbonate / L.Holysz, E.Chibowski, A.Szczes // Water research. 2003. Vol. 37. № 14. P. 3351-3360. DOI: 10.1016/S0043-1354(03)00159-3
14. Kai-Tai Chang. An investigation into the structure of aqueous NaCl electrolyte solutions under magnetic fields / Kai-Tai Chang, Cheng-I Weng // Computational Materials Science. Vol. 43. Iss. 4. P. 1048-1055. DOI:10.1016/j.commatsci.2008.02.02016.
15. Latypov O.R. Method of Controlling Electrochemical Parameters of Oil Industry Processing Liquids / O.R.Latypov, D.E.Bugai, E.V.Boev // Chemical and Petroleum Engineering. 2015. Vol. 51. Is. 3. P. 283-285. DOI:10.1007/s10556-015-0038-8
16. Magnetic field inspired contact angle hysteresis drives floating polyolefin rafts / M.Frenkel, V.Danchuk, V.Multanen, E.Bormashenko // Colloid and Interface Science Communications. 2018. Vol. 22. P. 38-41. DOI: 10.1016/j.colcom.2017.12.002
17. McNeely M. Magnetic fuel treatment system designed to attack fuel-borne microbes // Diesel Progress Engines &Drives. 1994. Vol. 60. № 11. P. 16.
18. The effect of magnetic treatment on the effectiveness of inhibition in oilfields / I.A.Golubev, A.B.Laptev, E.L.Alekseeva, N.O.Shaposhnikov, A.M.Povyshev, M.K.Kurakin // I International Conference «Corrosion in the Oil and Gas Industry», May 22-24, 2019, Saint Petersburg, Russia. 2019. Vol. 121. 5 p. DOI: 10.1051/e3sconf/201912102006

Авторы: И.А.Голубев, канд. техн. наук, руководитель направления нефте-водоподготовки, golubev_ia@spbstu.ru (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия), А.В.Голубев, директор, uthp@mail.ru (ООО «Уфимское технико-технологическое предприятие», Уфа, Республика Башкортостан, Россия), А.Б.Лаптев, д-р техн. наук, главный научный сотрудник, laptev@bk.ru (Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, Москва, Россия).

Статья поступила в редакцию 19.02.2020.

Статья принята к публикации 17.04.2020.