

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ISSN 1998-9903

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

*Научно-технический
и производственный журнал*

(20) 3-4 / 2018

PROCEEDINGS OF THE HIGHER
EDUCATIONAL INSTITUTIONS

**ENERGY SECTOR
PROBLEMS**

Scientific & Technical Journal

**НОВАЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНИКА
ЭЛЕКТРОДЕЭМУЛЬСАЦИИ НЕФТИ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ
КОМПОЗИТНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ**

В.Н. Швецов, А.А. Юнусов

ЗАО «Нефтех», г.Казань, Россия
mail@neftech.ru

Резюме: Выявлены принципиальные технические и технологические недостатки существующих электродегидраторов и электрокоалесцеров. Установлено, что их причинами являются чрезвычайно низкое удельное электрическое сопротивление и эквипотенциальность поверхности металлических электродов. Предложены концептуально новые технические решения, основанные на использовании в качестве материала электродов электропроводящих полимерных композитов с заданными электрофизическими и физико-химическими свойствами. Эффективность предложенных решений подтверждена экспериментально.

Ключевые слова: электродегидратор, электрокоалесцирующий аппарат, удельное электрическое сопротивление, электропроводящие полимерные композиты (ЭПК), резистивность, напряженность электрического поля.

DOI: 10.30724/1998-9903-2018-20-3-4-54-61

**INNOVATIVE ENERGI-EFFICIENT TECHNOLOGY AND TECHNIQUE FOR
OIL ELECTRICAL DEEMULSIFICATION ON BASIS OF COMPOSITE
ELECTRODES USAGE**

V.N. Shvetsov, A.A. Yunusov

CJSC “Neftech”, Kazan, Russia
mail@neftech.ru

Abstract: Essential technological and technical weaknesses were found among existing electrostatic dehydrators and electro-coalescing units. It was determined that the cause is critically low electrical resistivity and surface equipotentiality of metallic electrodes. Conceptually new technical solutions are suggested, that are based on the usage of electrically-conductive polymer composites as electrode material with imposed electro-physical and physico-chemical properties. The effectiveness of suggested solutions were confirmed by testing.

Keywords: electrodehydrator, electrocoalecing apparatus, electrical resistivity, electrically conductive polymeric composites, resistivity, electric-field strength.

Электрические поля высокой напряженности являются наиболее мощным и эффективным средством обеспечения глубокого обезвоживания и обессоливания нефти перед поступлением ее на переработку. Основным преимуществом электрического метода является инициированная полем принудительная коалесценция и укрупнение капель эмульгированной в нефти воды, в результате которой кратно возрастает скорость ее

отделения, существенно увеличивается глубина обезвоживания и обессоливания нефти, а также улучшается управляемость процесса деэмульсации.

Однако несмотря на то, что первый аппарат для электродеэмульсации нефти был запатентован еще в 1911 году [1] и за прошедшее столетие было предложено множество вариантов конструктивного решения электродегидраторов, принципиальных изменений эти аппараты не претерпели, а технологические преимущества и потенциальные возможности электрического поля и в современных электродегидраторах в полной мере до сих пор не реализованы. Причина заключается в том, что этим аппаратам присущ ряд недостатков, по крайней мере два из которых носят принципиальный, концептуальный характер.

Первый из них – межэлектродные пробои обрабатываемой водонефтяной эмульсии, возникающие спонтанно, протекающие неуправляемо и лавинообразно вплоть до короткого замыкания электродов с аварийным отключением высоковольтного источника питания (ВИП) и нарушением технологического режима электродеэмульсации. Механизм этого явления известен давно и обусловлен действием диэлектрофоретических сил, втягивающих поляризованные капли воды в области локальных неоднородностей электрического поля с повышенной напряженностью и выстраивающих короткозамыкающие цепочки – мостики из проводящих капель. Межэлектродные пробои эмульсии влечут за собой еще одно крайне негативное последствие, а именно: они сопровождаются интенсивным передиспергированием капель эмульгированной воды до мельчайших размеров, препятствующих их дальнейшему отделению от нефтяной фазы [2]. Вероятность коротких замыканий резко возрастает с ростом содержания воды в нефти, поэтому эти аппараты крайне критичны к обводненности сырья, поступающего в их электродную зону.

Все попытки устранить этот недостаток, например, использованием высокочастотных, импульсных, вращающихся электрических полей, изоляцией одного из электродов слоем как обычного диэлектрика, так и сегнетоэлектрического покрытия, созданием резко неоднородных электрических полей и др. оказались неэффективными и не нашли практического применения. В итоге в этом плане все свелось к использованию в ВИП реактивных катушек в их первичной цепи. Эти катушки не устраняют указанный недостаток, а выполняют лишь сугубо утилитарную функцию защиты ВИП от выхода из строя, то есть фактически играют роль предохранителя.

Вторым принципиальным технологическим недостатком является неоптимальная конфигурация электрического поля и обусловленный этим неэффективный режим электрообработки водонефтяной эмульсии с неизменной по высоте электродной зоны напряженностью, не согласованный с динамикой одновременно и взаимосвязанно протекающих процессов коалесценции капель воды и их гравитационной седиментации. В случае использования вертикальных металлических электродов это является прямым следствием эквипотенциальности их поверхности.

Описанные выше недостатки в равной мере относятся и к компактным устройствам другого типа для электродеэмульсации нефти – электрокоалесцирующим аппаратам (электрокоалесцерам), в отличие от объемных электродегидраторов выполняющим более частную функцию укрупнения капель дисперсной фазы водонефтяной эмульсии для последующего гравитационного разделения фаз в отстойной аппаратуре.

В результате детального анализа авторы пришли к выводу, что причина этих недостатков заключается в свойствах материала используемых электродов. Одним из них является весьма низкое удельное электрическое сопротивление (УЭС) металла (в данном случае – стали), обуславливающее, в частности, и эквипотенциальность поверхности электродов. Так, если УЭС нефтей находится в диапазоне от $\sim 10^6$ до $\sim 10^8$ Ом·м, то УЭС стали составляет всего около 10^{-7} Ом·м, что ниже на $13 \div 15$ порядков!

Другим свойством является склонность металлических электродов к искро- и дугообразованию, способствующая возникновению и поддержанию в объеме

обрабатываемой эмульсии межэлектродных пробоев, перерастающих в короткие замыкания электродов.

Сформулированный вывод привел авторов к нетривиальному, концептуальному решению, суть которого заключается в отказе от высокопроводящих металлических электродов и замене их электродами из нового альтернативного материала с заданными электрофизическими и физико-химическими свойствами. В качестве такового был выбран материал из разряда низконаполненных электропроводящих полимерных композитов (ЭПК). Эти композиты, в зависимости от природы полимерной матрицы, электрофизических и физико-химических свойств наполнителя, его гранулометрического состава, формы частиц, степени наполнения и технологических параметров процесса изготовления конкретных структур и изделий, обладают широчайшим диапазоном задаваемых и реализуемых характеристик и уникальными свойствами в электрических, магнитных и других полях. В частности, уровень электропроводности может задаваться в диапазоне до 20 порядков. Поэтому композиты и создаваемые из них структуры называют «умными» (*smart*) или «очень умными» (*very smart*) [3; 4]. По характеру распределения частиц наполнителя в полимерной матрице эти композиты разделяются на матричные, структурированные и статистические [5; 6]. Учитывая то, что наиболее подробно изучены ЭПК со статистическим распределением наполнителя [7], а также их технологичность, в производстве окончательный выбор был сделан в пользу последних.

Из задаваемых электрофизических свойств ключевым являлась резистивность: удельное электрическое сопротивление композита должно существенно, более чем на 10 порядков превышать УЭС стали и быть сопоставимым с нижним пределом УЭС нефти. Из физико-химических свойств новых электродов, которые практически полностью определяются выбором полимерной матрицы композита, важнейшими являются: гидрофобность поверхности, хорошие антиадгезионные свойства, высокая стойкость к воздействию агрессивных сред и широкий диапазон рабочих температур.

В результате экспериментов с различными полимерными материалами, природой проводящего наполнителя, его гранулометрическим составом, содержанием его в объеме матрицы и технологией изготовления были получены резистивные композитные электроды с комплексом заданных электрофизических и физико-химических свойств.

Эквивалентная схема зоны электрообработки одной из многочисленных пар электродов электродегидратора или электродов электрокоалесцера (их всего два) показана на рис. 1. Здесь 1 – высокопотенциальный композитный электрод; 2 – заземленный металлический электрод; $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$ – активные сопротивления элементарных объемов водонефтяной эмульсии; $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ – их емкости, представляющие собой реактивные сопротивления; $R'_1, R'_2, R'_3, \dots, R'_n$ – сопротивления соответствующих малых участков композитного электрода ($n \rightarrow \infty$). Величина УЭС композитных электродов рассчитывается исходя из электропроводности конкретной нефти, ее обводненности и минерализации водной фазы. Эти три параметра определяют полное сопротивление (импеданс) обрабатываемой эмульсии $Z_i = \frac{R_i \cdot R_{ci}}{R_i + R_{ci}}$, где R_i – активное сопротивление i -го элементарного объема эмульсии, R_{ci} – его реактивное (емкостное) сопротивление.

На первом этапе были проведены экспериментальные исследования, целью которых было установление наличия и характера распределения потенциала по высоте композитного электрода в реальных условиях электродеэмульсации нефти в стендовом электродегидраторе. С использованием зондового метода [8; 9] было установлено, что такое распределение существует и носит явно выраженный нелинейный характер. При этом скорость роста потенциала (а следовательно, и напряженности электрического поля в межэлектродном пространстве) постепенно увеличивается в направлении от нижней кромки композитного электрода к верхней. Таким образом экспериментально подтверждено, что поверхность композитного электрода, в отличие от металлического, действительно не является

эквипотенциальной, что является совокупным следствием резистивности композита и гидрофобности его поверхности, препятствующей образованию на ней проводящей водной пленки. Нелинейный же характер распределения указывает на соблюдение специфического, несвойственного металлам соотношения $R'_1 < R'_2 < R'_3 < \dots < R'_n$.

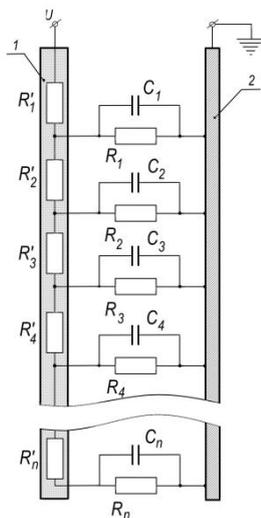


Рис. 1. Эквивалентная схема электродной зоны

На следующем этапе была проведена обширная серия экспериментов по исследованию процесса электродеэмульсации нефти с использованием стандовых электродегидратора и электрокоалесцера с композитными электродами. Исследования проводились в широком диапазоне физико-химических свойств нефтей и электрических и технологических параметров процесса:

- удельная электропроводность нефтей – от 10 до 1000 нСм/м;
- обводненность деэмульгируемых нефтей – от 3 до 40%;
- минерализация водной фазы – от 500 мг/дм³ до 364 г/дм³;
- рабочая температура – от 10 до 95°C;
- напряженность электрического поля в верхней части электродной зоны – от 0,5 до 4 кВ/см.

Результаты экспериментов убедительно подтвердили спрогнозированное ранее отсутствие коротких замыканий электродов стандовых электродегидратора и электрокоалесцера даже при обводненности нефти 40% и выше и напряженностях электрического поля до 4 кВ/см, что в принципе недостижимо для подобных аппаратов с традиционными металлическими электродами. Более того, не было отмечено и локальных кратковременных пробоев эмульсии. Электрический режим деэмульсации во всем исследованном диапазоне параметров процесса характеризовался высокой стабильностью, сила потребляемого аппаратами тока, в зависимости от обводненности нефти, составляла от единиц до десятков микроампер, а ее флуктуации не превышали 2%.

Что касается конфигурации электрического поля и режима электрообработки деэмульгируемой нефти, то преимущества композитных электродов перед металлическими в электродегидраторе, в котором одновременно осуществляются процессы электрокоалесценции и гравитационного осаждения дисперсной водной фазы нефтяной эмульсии, реализуются двояким образом. Конфигурация поля и режим электрообработки в этом случае таковы, что они оптимальны как для эмульсии, движущейся вверх, так и для укрупнившихся капель воды, осаждающихся в гравитационном поле.

Эмульсия, в которой по мере движения вверх численная концентрация капель воды постепенно снижается, средние расстояния между ними возрастают, а размеры остающихся в потоке капель становятся все меньше, последовательно проходит области все большей напряженности электрического поля, что обеспечивает высокую вероятность коалесценции капель полидисперсной эмульсии по всей высоте электродной зоны.

В то же время уже укрупнившиеся и осаждающиеся капли воды последовательно проходят области электрообработки с постепенно снижающейся напряженностью поля, что предотвращает возможность их повторного диспергирования и способствует их доукрупнению.

В электрокоалесцирующих аппаратах, в которых, в отличие от объемных электродегидраторов, осуществляется только процесс коалесценции капель, а содержание дисперсной водной фазы остается неизменным, применение композитных электродов также позволяет реализовать эффективный режим электрообработки деэмульгируемой нефти: в этом случае напряженность поля постепенно снижается в направлении вертикального нисходящего движения обрабатываемой эмульсии, обеспечивая наиболее благоприятные условия для непрерывного процесса укрупнения капель воды и предупреждения их повторного диспергирования.

Обобщенные результаты экспериментов по обезвоживанию нефтей в стендовом электродегидраторе с композитными электродами, по размерам и характеристикам идентичными электродам, используемым в промышленных аппаратах, приведены в таблице.

Таблица

Результаты обезвоживания нефти в стендовом электродегидраторе с композитными электродами

Плотность нефти при 20°С, кг/м ³	Кинематическая вязкость нефти при 20°С, мм ² /с	Исходное содержание воды в нефти, %	Рабочая температура, °С	Удельный расход деэмульгатора, г/т	Напряженность электрического поля E, кВ/см *	Остаточное содержание воды в контрольной пробе (E=0), %	Остаточное содержание воды в рабочей пробе, %
837,1	14,7	5,5	42	30	2,5	1,68	0,23
837,1	14,7	10,3	38	30	2,0	2,37	0,19
884,7	28,3	20,1	45	35	2,0	7,20	0,38
896,4	38,8	25,2	60	50	1,8	6,80	0,47

Результаты экспериментов по обезвоживанию нефтей по схеме электрокоалесценции – отстойник показаны на рис. 2. Полученные в ходе длительных экспериментальных исследований результаты дают основание заключить, что использование в электродегидраторах и электрокоалесцирующих аппаратах резистивных композитных электродов позволяет стабильно обезвоживать нефти с различными физико-химическими и электрическими свойствами до остаточного содержания воды менее 0,5% в широком диапазоне обводненностей сырья, недоступном для аналогичных аппаратов с традиционными металлическими электродами.

Экспериментальные исследования процесса электрообезвоживания сверхвязкой нефти с плотностью порядка 965 кг/м³, слабоминерализованной высокодисперсной водной фазы и, как следствие, крайне низкой разностью плотностей воды и нефти были проведены с использованием стендового электродегидратора с композитными электродами коаксиального исполнения в институте «ТатНИПИнефть» [10]. На основании полученных результатов в работе сделан вывод о возможности эффективного применения аппаратов с композитными электродами для деэмульсации нефтей даже с такими экстремальными физико-химическими свойствами.

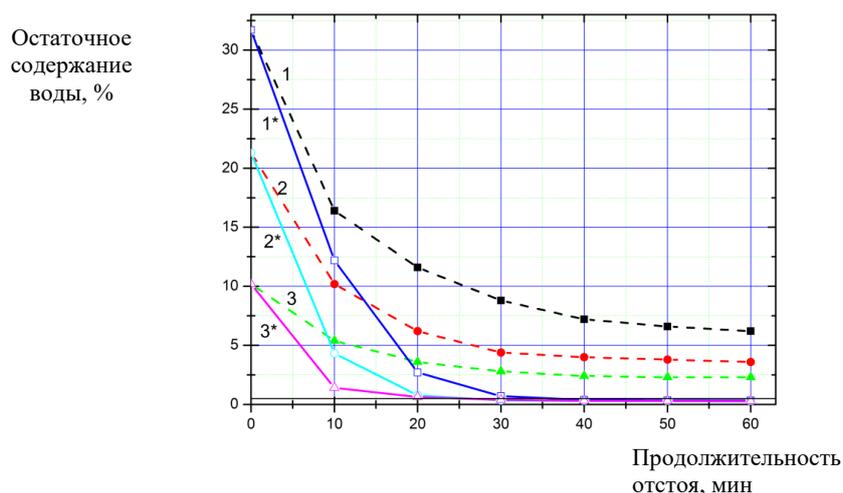


Рис. 2. Динамика обезвоживания нефти по схеме электрокоалесцер – отстойник: исходное содержание воды в нефти, соответственно, 31,7; 21,3; 10,2%; 1, 2, 3 – контрольные пробы (электрическое поле отсутствует); 1*, 2*, 3* – рабочие пробы, напряженность поля, соответственно, 1,2; 1,7; 2,2 кВ/см

На основании изложенных выше теоретических предположений и подтвердивших их результатов экспериментальных исследований были разработаны технические решения, легшие в основу двух типов аппаратов: электродегидраторов [11] и электрокоалесцирующих аппаратов [12] нового поколения, в которых реализуются преимущества использования резистивных композитных электродов.

Электродегидратор с композитными электродами показан в разрезе на рис. 3, общий вид электрокоалесцирующей установки – на рис. 4. В зависимости от количества электрокоалесцеров в составе установки ее производительность составляет от 25 до 200 м³/час.

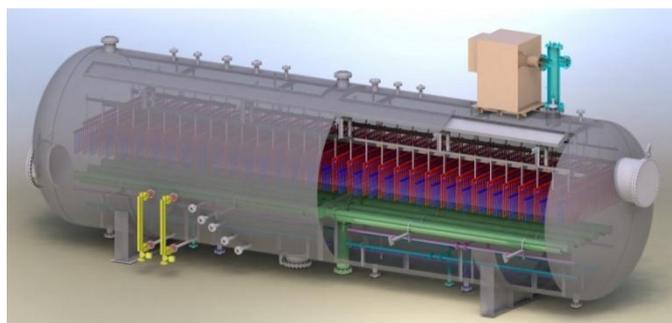


Рис. 3. Электродегидратор

В заключение можно констатировать, что описанный выше концептуально новый подход к решению хронических проблем техники и технологии электродеэмульсации нефти оказался достаточно плодотворным.

Использование в электродегидраторах и электрокоалесцирующих аппаратах композитных резистивных электродов с комплексом заданных электрофизических и физико-химических свойств позволяет:

– исключить возможность коротких замыканий электродов электродегидраторов при обводненности входящего сырья до 20%, электрокоалесцеров – до 40% и более;

– реализовать в электродной зоне электродегидраторов оптимальные конфигурацию электрического поля и режим электрообработки с повышающейся в направлении движения сырья напряженностью поля, согласованные с динамикой одновременно протекающих процессов электрокоалесценции и гравитационного осаждения капель дисперсной водной фазы нефтяной эмульсии;

– реализовать в электрокоалесцерах наиболее благоприятный режим коалесценции с постепенно понижающейся в направлении движения сырья напряженностью электрического поля;

–кратно расширить диапазон обводненностей деэмульгируемых нефтей;

– за счет перечисленных теоретически спрогнозированных и экспериментально подтвержденных преимуществ существенно повысить эффективность и стабильность процесса электродеэмульсации нефти, производительность и надежность аппаратов, а также за счет снижения потребляемых токов повысить энергоэффективность процесса.

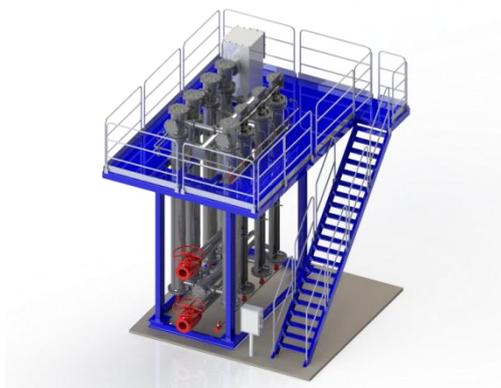


Рис.4. Электрокоалесцирующая установка

В подтверждение сделанных в данной работе выводов следует отметить, что в 2017 году промышленный электродегидратор с композитными электродами прошел опытно-промышленные испытания и введен в эксплуатацию в ОАО «Сургутнефтегаз».

Литература

1. Pat. 987115 U.S. Separating and collection particles of one liquid suspended in another liquid / F.G. Cotrell, J.B.Speed – 1911.
2. Панченков Г.М., Папко В.В. Диспергирование капель воды эмульсии при возникновении коротких замыканий электродов // Нефтяное хозяйство. 1969. № 3. С. 46–47.
3. Reneker D.H., Mattice W.L., Quiker R.P., Kim S.J. Smart Materials and Structures. 1992. V. 1. N 1. P. 84.
4. Newnham R.E. MRS Bull. 1993. V. 18. N 4. P. 24.
5. Гуль В.Е., Шенфиль Л.З. Электропроводящие полимерные композиции. М.: Химия, 1984. 240 с.
6. Филиппов П.Г., Шевченко В.Г., Пономаренко А.Т. и др. // Обзорная информация. Сер. общепромышленные вопросы. М.: НИИТЭХИМ, 1984. Вып. 1 (219). С. 53.
7. Чмутин И.А., Летягин С.В., Шевченко В.Г., Пономаренко А.Т. Электропроводящие полимерные композиты: структура, контактные явления, анизотропия // Высокомолекулярные соединения. 1994. Т. 36, N 4. С. 699–713.
8. Остроумов Г.А. Взаимодействие электрических и гидродинамических полей. М.: Наука, 1979. 320 с.
9. Стишков Ю.К., Остапенко А.А. Электродинамические течения в жидких диэлектриках. Л.: Изд-во Ленингр. ун-ва, 1989. 176 с.

10. Губайдуллин Ф.Р., Сахабутдинов Р.З., Космачева Т.Ф. и др. Эффективность обезвоживания сверхвязкой нефти при воздействии электрического поля / Технологии подготовки сверхвязкой нефти Татарстана. Казань: Центр инновационных технологий, 2015. 280 с.

11. Пат. № 99341 РФ. Электродегидратор // Швецов В.Н., Юнусов А.А. Оpubл. 20.11.2010 г., бюл. № 32.

12. Пат. № 156667 РФ. Электрокоалесцирующая установка // Юнусов А.А., Швецов В.Н. Оpubл. 10.11.2015 г., бюл. № 31.

Авторы публикации

Швецов Владимир Нисонович – канд. техн. наук, с.н.с., генеральный директор ЗАО «Нефтех».

Юнусов Анас Анварович – канд. техн. наук, доцент, заместитель генерального директора по научной работе ЗАО «Нефтех».

References

1. Pat. 987115 U.S. Separating and collection particles of one liquid suspended in another liquid / F.G. Cotrell, J.B.Speed – 1911.

2. Panchenkov G.M., Papko V.V. Dispergирование kapel' vody emul'sii pri vozniknovenii korotkikh замыканий электродов // Neftyanoe khozyaistvo. 1969. N3. S.46–47.

3. Reneker D.H., Mattice W.L., Quiker R.P., Kim S.J. // Smart Materials and Structures. 1992. V.1. N1. P. 84.

4. Newnham R.E. // MRS Bull. 1993. V. 18. N 4. P. 24.

5. Gul' V.E., Shenfil' L.Z. Elektroprovodyashchie polimernye kompozitsiii M.: Khimiya, 1984. 240 с.

6. Filippov P.G., Shevchenko V.G., Ponomarenko A.T. i dr. // Obzornaya informatsiya. Ser. obshcheotraslevye voprosy. M.: NIITEKKhIM, 1984. Vyp. 1 (219). S. 53.

7. Chmutin I.A., Letyagin S.V., Shevchenko V.G., Ponomarenko A.T. Elektroprovodyashchie polimernye kompozity: struktura, kontaktnye yavleniya, anizotropiya // Vysokomolekulyarnye soedineniya. 1994. T. 36. N 4. S. 699–713.

8. Ostroumov G.A. Vzaimodeistvie elektricheskikh i gidrodinamicheskikh polei. M.: Nauka, 1979. 320 с.

9. Stishkov Yu.K., Ostapenko A.A. Elektrogidrodinamicheskie techeniya v zhidkikh dielektrikakh. L.: Izd-vo Leningr. univ., 1989. 176 с.

10. Gubaidullin F.R., Sakhabutdinov R.Z., Kosmacheva T.F. i dr. Effektivnost' obezvozhvaniya sverkhvyazkoi nefti pri vozdeistvii elektricheskogo polya / Tekhnologii podgotovki sverkhvyazkoi nefti Tatarstana. Kazan': Tsentr innovatsionnykh tekhnologii, 2015. 280 с.

11. Пат. № 99341 RF Elektrodegidrator. Shvetsov V.N., Yunusov A.A. Opubl. 20.11.2010 г., byul. № 32.

12. Пат. № 156667 RF Elektrokoalestsiruyushchaya ustanovka. Yunusov A.A., Shvetsov V.N. Opubl. 10.11.2015 г., byul. № 31.

Authors of the publication

Vladimir N. Shvetsov – cand. sci. (techn.), senior researcher, General Director CJSC “Neftech”.

Anas A. Yunusov – cand. sci. (techn.), associate professor, Deputy General Director for Scientific Work CJSC “Neftech”.

Поступила в редакцию

22 января 2018 года.