

ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНАЯ АКТИВАЦИЯ ВОДЫ В ПРОЦЕССАХ ОЧИСТКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ СТОКОВ

При электроимпульсной очистке промышленных стоков используются электрические разряды, возбуждаемые в зернистом электропроводном слое (магнитные гранулы, стружка и др.), через который пропускается техническая вода.

Подача импульсного напряжения на электроды приводит к образованию первичных каналов разряда. В образовавшиеся каналы электрического разряда в течение 10 - 60 мкс вводится энергия конденсаторной батареи. Объем, занимаемый разрядами, составляет доли кубического миллиметра, а площадь привязки импульсного тока – $10^{-5} \dots 10^{-6} \text{ см}^2$. Поэтому плотность тока при подводимой мощности 700...2000 Вт и величине разрядного тока $(1-4) \cdot 10^2 \text{ А}$ достигает значений до $10^6 \dots 10^8 \text{ А/см}^2$, температура внутри канала разряда – $(0,2-2) \cdot 10^4 \text{ К}$ и давление – $10^5 \dots 10^9 \text{ Па}$ [1,2,3].

На разрядной стадии основными действующими факторами являются сильные импульсные электрические и магнитные поля, которые способны не только растянуть и превратить в диполи неполярные молекулы воды с деформацией водородных связей, но и диссоциировать на ионы некоторые полярные молекулы.

Совместное воздействие указанных факторов приводит к изменению структуры и свойств воды [4,5,7,8,15].

Исследование влияния факторов ЭИ разряда на процесс активации воды проводили путем измерения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь водопроводной воды до и после ее обработки на электроразрядном реакторе.

В качестве засыпки реактора использовались гранулы чистого алюминия для того, чтобы по возможности максимально исключить попадание ферромагнитных микрочастиц в область электромагнитного поля.

Мощность, подводимая к реактору, изменялась в диапазоне 700...1500 Вт при скорости прокачки воды 100 л/ч, что соответствует $U = 20 \text{ см/с}$, температуре воды на входе в реактор $T = 19^\circ\text{C}$, $\text{pH} = 7,0$ и частотах следования разрядов 300 Гц.

Для измерения диэлектрической проницаемости воды применялся резонансный метод [9], реализуемый с помощью куметра. Суть метода заключается в том, что исследуемый объект помещается в измерительную ячейку (ИЯ), которая как конденсатор C_x включается параллельно конденсатору переменной емкости C_1 последовательного колебательного контура куметра. Относительная погрешность измерения диэлектрических постоянных образца куметром типа ВМ-560 достигает 20% и больше. При этом погрешность измерений диэлектрической проницаемости тем больше, чем меньше электроемкость образца. К тому же, когда образцу соответствует $\text{tg}\delta \geq 1$ применение резонансного метода затруднительно. Способы преодоления этих проблем описаны в работах [10,11]. Так, расширение пределов измерения $\text{tg}\delta \geq 1$ куметром достигается с помощью параллельного подключения дополнительного конденсатора большой емкости C_0 с образцом электроемкостью C_2 к конденсатору переменной емкости колебательного контура куметра C_1 (рис.1). Определение с высокой точностью изменений резонансной частоты колебательного контура куметра при подключении ИЯ с образцом позволяет повысить точность измерения ϵ . Резонансная частота колебательного контура куметра при $Q \gg 1$ с погрешностью меньше 1% может быть определена как

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Учитывая, что емкость ИЯ C_0 не зависит от тестовой частоты, а дисперсия L и C_2 в высокочастотной (ВЧ) области мала, предложен следующий способ. При данном значении L и C_1 определяется резонансная частота контура f_1 . При подключении ИЯ к контуру резонансная частота изменяется и становится f_2 . После помещения образца в ИЯ измерения резонансной частоты дают f_3 . Из полученных данных рассчитывают ϵ воды:

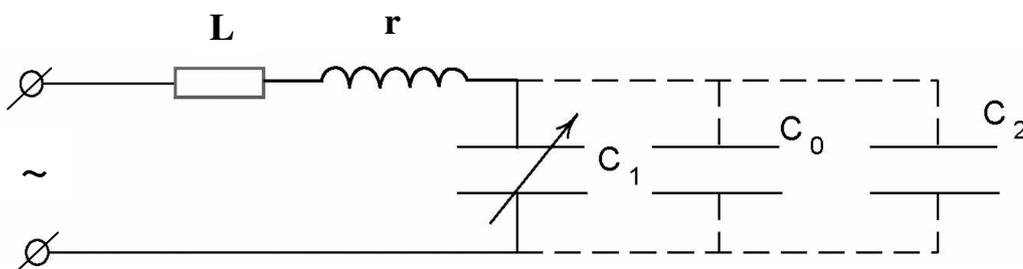


Рисунок 1 - Схема последовательного колебательного контура куметра: r - активное сопротивление контура; L - индуктивность контура

$$\varepsilon_{\text{воды}} = \frac{dC_2}{\varepsilon_0 S} = \frac{d}{\varepsilon_0 S} C_0 \left(\frac{f_2^2 - f_3^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) \frac{f_1^2}{f_3^2}, \quad (2)$$

где d - расстояние между обкладками конденсатора, 2 мм; S - площадь обкладок конденсатора; C_0 - емкость конденсатора, 99,97 пФ; ε_0 - электрическая постоянная, $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; f_1 - резонансная частота колебательного контура емкостью C_1 ; f_2 - резонансная частота колебательного контура емкостью $(C_1 + C_0)$; f_3 - резонансная частота колебательного контура емкостью $(C_1 + C_0 + C_2)$.

Расчеты показывают, что относительная погрешность определения ε составляет 5%. Заметим, что повышению точности данных измерений способствует применение цифровых приборов в экспериментальной установке, блок-схема которой показана на рис. 2.

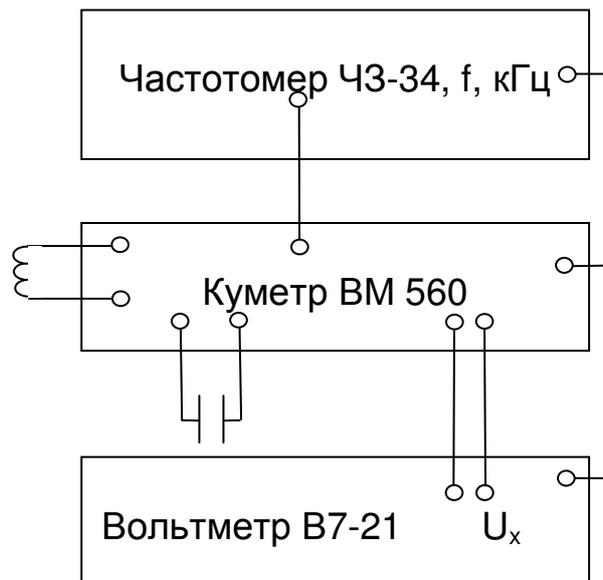


Рисунок 2 – Блок-схема установки для измерения частотных зависимостей диэлектрических постоянных воды

Для повышения точности измерений низкочастотного тангенса угла диэлектрических потерь технической воды до и после ее обработки в электроимпульсном реакторе использовался LCR-измеритель типа «Instek» LCR-819. Измерения проводились на частоте $f = 96,667$ кГц. Приборная погрешность измерений составляет 0,05 %.

Тангенс угла диэлектрических потерь воды $\text{tg} \delta$ определяли по формуле [11]

$$\text{tg} \delta = \frac{C_1 \cdot \text{tg} \delta_1 - C_0 \text{tg} \delta_0}{C_1 - C_0}, \quad (3)$$

где C_0 и $\operatorname{tg}\delta_0$ – емкость и тангенс угла диэлектрических потерь ИЯ без воды;

C_1 и $\operatorname{tg}\delta_1$ – емкость и тангенс угла диэлектрических потерь ИЯ с пробами воды.

На рис. 3 приведена зависимость диэлектрической проницаемости водопроводной воды от тестовой частоты.

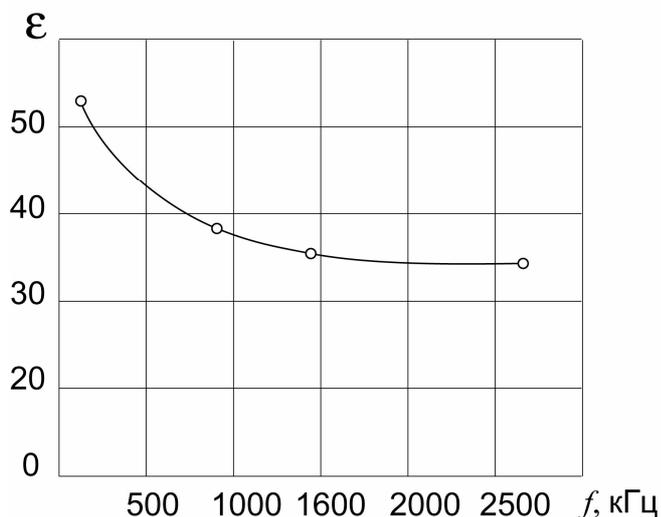


Рисунок 3 - Зависимость диэлектрической проницаемости технической воды от тестовой частоты

Наблюдается снижение ϵ с увеличением тестовой частоты, что согласуется с измерениями [12].

На рис. 4 приведены зависимости ϵ от подводимой к реактору мощности для двух тестовых частот $f = 1438,1$ кГц и $f = 2654,9$ кГц.

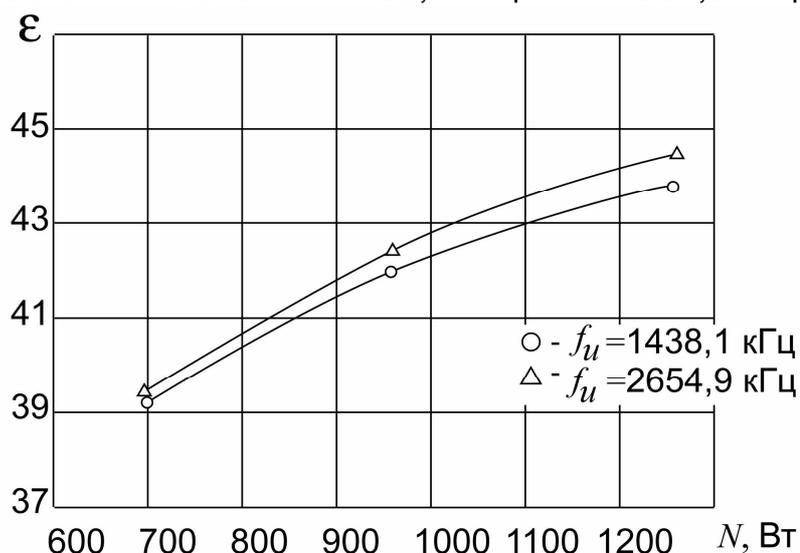


Рисунок 4 - Зависимости ϵ от мощности, вкладываемой при электроимпульсной обработке

Наблюдается плавное повышение ε , причем значения ε при различных тестовых частотах, при постоянной мощности на реакторе находятся в пределах ошибки измерения, что может свидетельствовать о том, что в условиях данного эксперимента активация воды за счет изменения ε достигает своего насыщения (достигается максимум эффективности).

Влияние характеристик электроразрядного процесса на магнитную проницаемость (намагниченность) технической воды до и после прохождения ее через реактор определялось измерением добротности измерительного контура куметра. Измерение добротности достигается введением внутрь стандартной катушки индуктивности куметра ВМ-560 стеклянной пробирки с соответствующей пробой воды или без нее. Введение стеклянной пробирки с пробой воды, обладающей определенной магнитной проницаемостью, изменяет, аналогично магнитопроводящему сердечнику, индуктивность катушки, а следовательно, и резонансную частоту контура. При резонансе максимальное напряжение на конденсаторе $U_{\max} \sim Q$. Зависимости U_{\max} от мощности, подводимой к электроразрядному реактору при указанных частотах индикации, приведены на рис. 5.

Измерения проводились через 5 минут после проведения эксперимента и фильтрации воды и спустя 24 часа.

Наблюдается монотонное падение U_{\max} в зависимости от N .

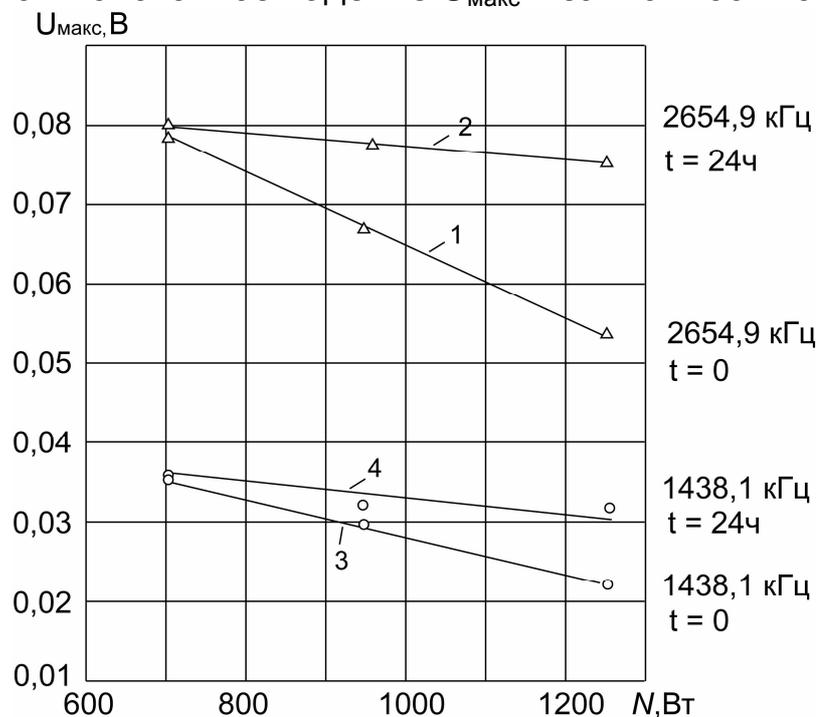


Рисунок 5 - Значение U_{\max} колебательного контура при резонансе в за-

висимости от мощности реактора:

1,2 – тестовая частота $f = 2654,9$ кГц;

3,4 - тестовая частота $f = 1438,1$ кГц

Кроме ВЧ - измерений диэлектрической проницаемости и добротности воды были проведены НЧ - измерения тангенса угла диэлектрических потерь воды с помощью прибора «Instek» LCR-819.

В табл. 1 приведены вычисленные по формуле (3) значения $\operatorname{tg} \delta$ для воды без ИЯ.

Таблица 1 - Значение $\operatorname{tg} \delta$ для необработанной и обработанной в реакторе воды

Параметр	Мощность, подводимая к реактору, Вт			
	0	700	960	1260
$\operatorname{tg} \delta \cdot 10^{-3}$	5,1	5,45	8,99	9,38

Анализ полученной зависимости (рис. 6), показывает, что $\operatorname{tg} \delta$ для обработанной воды носит экстремальный характер.

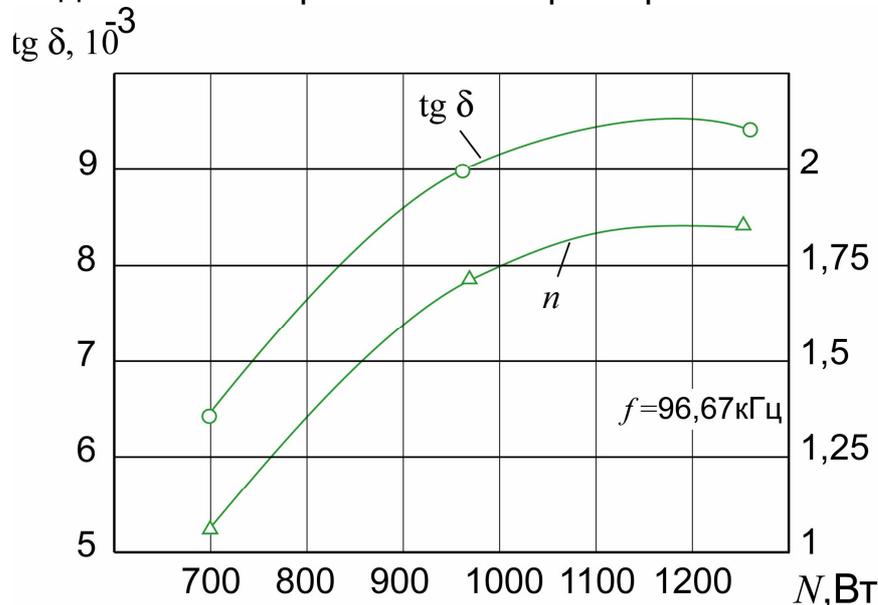


Рисунок – 6. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ и эффективности обработки воды n в электроразрядном реакторе от мощности, вкладываемой в разряд

Поскольку процесс полного выпадения осадков (осветление суспензии), связанный с коагуляцией гидроксида алюминия (аналогичное явление наблюдается при коагуляции гидроксида железа при диспергировании стальной засыпки) продолжается в течение нескольких часов, представляет интерес изменение ϵ и $\operatorname{tg} \delta$ от времени после электроимпульсной обработки воды.

На рис. 7 приведены зависимости $\epsilon(t)$ и $\operatorname{tg} \delta(t)$ для двух значений подводимой мощности $N = 960$ Вт и $N = 1260$ Вт, соответствующие тестовой частоте $f = 2654,9$ кГц.

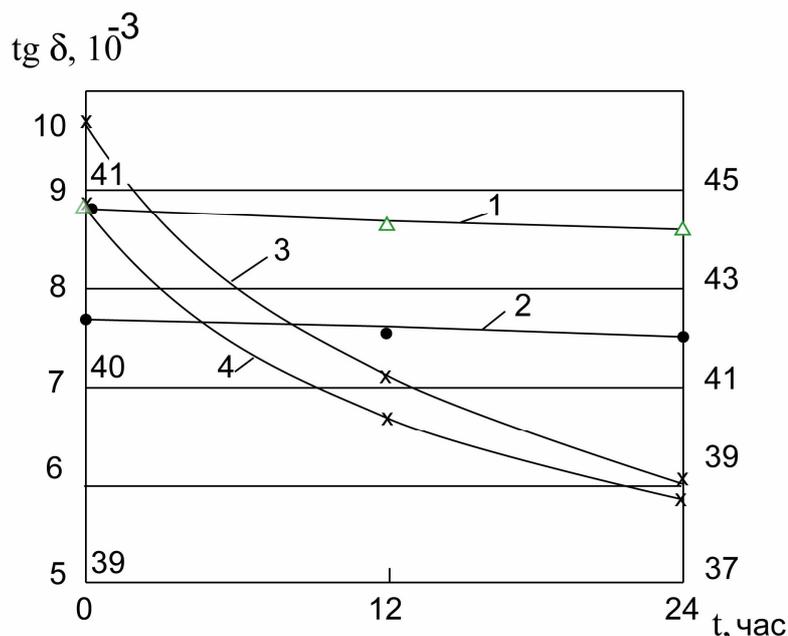


Рисунок 7 - Зависимости ϵ и $\text{tg} \delta$ от времени после обработки:
 1 - $\epsilon(t)$ при подводимой мощности $N = 1260$ Вт; 2 - $\epsilon(t)$ при подводимой мощности $N = 960$ Вт; 3 - $\text{tg} \delta(t)$ при подводимой мощности $N = 1260$ Вт;
 4 - $\text{tg} \delta(t)$ при подводимой мощности $N = 960$ Вт

Обращает на себя внимание то, что уменьшение $\text{tg} \delta(t)$ происходит значительно быстрее, чем уменьшение $\epsilon(t)$. Тангенс угла диэлектрических потерь через 24 часа практически достигает значений $\text{tg} \delta$ необработанной воды, в то время как $\epsilon(t)$ изменяется существенно медленнее (за 24 часа изменение ϵ составляет от 0,24 до 1,2%). Это можно объяснить устойчивой молекулярной структурой ассоциатов, образовавшихся в результате обработки воды, и значительной нейтрализацией метастабильной проводимости ее, вызванной импульсной обработкой.

Одной из важных характеристик электроимпульсной обработки воды является время осаждения диспергированного металла. При анализе результатов экспериментальных исследований обращает на себя внимание тот факт, что с ростом подводимой к реактору мощности было получено увеличение скорости коагуляции и осаждения диспергента из суспензии. Так, выпадение массы в осадок, определяемое по изменению мутности суспензии до 30 мг/дм^3 при подводимой мощности к реактору (при работе на алюминиевой засыпке) $P = 700$ Вт происходило в течение времени $t = 46,3$ мин, а при подводимой мощности $P = 1260$ Вт аналогичное выпадение осадка происходило за $t = 24,1$ мин.

При использовании в качестве засыпки стальных отходов аналогичные процессы происходили за $t = 28,5$ мин и $t = 15$ мин.

Это объясняется тем, что с повышением мощности при тех же расходах воды и росте ее температуры процессы окисления металла идут интенсивнее с образованием большего количества гидроксидов, которые, коагулируя в отстойнике (осадителе), создают обменные структуры

высокой плотности, быстро оседающие на дно. При меньших мощностях создаются коагулянты меньших концентраций, что требует большего времени их коагулирования и создания структур более плотных для осаждения.

Наблюдаемые изменения таких электрофизических параметров воды, как диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь, добротность, а также изменение зависимости скорости коагуляции и выпадения диспергируемого металла в осадок, позволяет ввести понятие эффективности электромагнитной обработки воды в электроимпульсном реакторе:

- по изменению тангенса угла диэлектрических потерь воды

$$n_1 = \frac{tg\delta}{tg\delta_0}; \quad (4)$$

- по изменению диэлектрической проницаемости воды

$$n_2 = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0}. \quad (5)$$

Указанные параметры связаны друг с другом, в связи с чем влияние электромагнитной обработки на электрофизические свойства воды можно определить как их произведение

$$n = n_1 \cdot n_2. \quad (6)$$

Результаты расчетов показателей эффективности для алюминиевой засыпки реактора при рабочих параметрах реактора приведены в табл. 2.

Таблица 2 - Показатели эффективности электромагнитной обработки воды

Р, Вт	Эффективность электромагнитной обработки воды		
	n_1	n_2	$n = n_1 \cdot n_2$
700	1,069	1,083	1,158
960	1,74	1,16	2,018
1260	1,84	1,21	2,226

По мнению автора [13], действие электромагнитного поля на водную систему можно связать с явлениями резонансного типа, возникающими при непрерывных колебательных движениях молекул и атомов воды, их ассоциатов, гидратированных ионов, которым соответствуют определенный энергетический уровень. Электромагнитное поле может изменить величину валентного угла молекулы более чем на 2°. Это приводит к увеличению ди-

польного момента молекулы и изменению взаимодействия между молекулами с укрупнением их ассоциатов. С другой стороны, после развала таких ассоциатов возникают центры роста новых ассоциатов и зародыши кристаллизации.

Наличие в воде ионов, молекул, мелких и крупных ассоциатов растворенных веществ приводит к гидратации воды и изменению ее структурных свойств.

Электромагнитные поля после достижения ассоциатами критических размеров [14] вызывают измельчение этих образований, способствующее изменению диэлектрической проницаемости воды и ускоряет образование зародышей кристаллизации.

Движущаяся техническая вода с носителями заряда аналогична проводнику, движущемуся в магнитном поле, в котором по законам электромагнитной индукции наводится ЭДС. Все упомянутые выше авторы работали с постоянными магнитными полями, поэтому для получения эффекта активации требовался проток воды со скоростью движения не ниже критической. В нашем случае при наличии импульсного электромагнитного поля, изменяющегося по величине и направлению за импульс тока, скорость движения воды не критична для ее активации. При взаимодействии взаимоперемещающегося электромагнитного поля и воды траектория движения гидратированных ионов искривляется под действием силы Лоренца [6,15,16]

$$F = Bvesin\alpha, \quad (7)$$

где B - индукция поля; v - скорость движения иона, e - заряд иона, α - угол между направлением поля и движущегося потока жидкости.

Сила Лоренца отклоняет анионы и катионы в противоположных направлениях, что создает благоприятные условия для возникновения ионных ассоциаций, в которых центры положительных и отрицательных зарядов не совпадают. Это эквивалентно диполям, электрические моменты которых обуславливают превышение диэлектрической проницаемости технической воды в рассматриваемом случае по сравнению с исходной водой.

Скорость взаимного перемещения воды и поля не может быть очень большой, иначе поле «не успеет» воздействовать на движущиеся ионы и образовывать их комплексы (ассоциаты). Очевидно, что величины B , v , α , входящие в уравнение (7), должны иметь оптимальные значения, так как при усложнении структуры ионных ассоциаций асимметрия в расположении зарядов противоположных знаков должна уменьшиться, а следовательно, уменьшаются моменты диполей и для диэлектрических потерь и уменьшается величина диэлектрической проницаемости воды, что подтверждается полученными экспериментальными данными.

Список использованных источников

1. Наугольных К.А. Электрические разряды в воде / К.А. Наугольных, Н.А. Рой. – М.: Наука, 1971. – 155 с.
2. Воробьев В.С. К вопросу о составе равновесной плазмы / В.С. Воробьев, А.Л. Хомкин // Теплофизика высоких температур. – 1977. – т.15, № 6. – С. 1304-1306.
3. Намитоков К.К. Электроэрозионные явления / К.К. Намитоков. – М.: Энергия, 1978. – 456 с.
4. Классен В.И. Омагничивание водных систем / В.И. Классен. – М.: Химия, 1978. – 240 с.
5. Магнитная обработка водных дисперсий флотореагентов / М.А. Орел, Э.А. Арипов, В.И. Лапатухин, Ш.С. и др. – Узб. ССР.: Фан, 1973. – 115 с.
6. Уманский Д.И. Влияние магнитного поля на диэлектрическую проницаемость технической воды / Д.И. Уманский // Журнал технической физики. – 1965. – Вып. 2. – С. 2245 – 2248.
7. Баран Б.А. Вплив конфігурації магнітного поля на іонний обмін / Б.А. Баран, В.С. Дроздовський // Вісник технологічного університету Поділля. – 1999. - №1. – С. 3-5.
8. Баран Б.А. Вплив конфігурації магнітного поля на іонний обмін. Ч. II / Б.А. Баран, В.С. Дроздовський // Вісник технологічного університету Поділля. – 1999. - №4. – С. 117-119.
9. Корндорф С.Ф. / Радиотехнические измерения / С.Ф. Корндорф, А.С. Бернштейн, М.И. Ярославский. – М.- Л.: Госэнергоиздат, 1956. – 400 с.
10. Подкин Ю.Г. Расширение пределов измерения куметров / Ю.Г.Подкин, Е.И. Фединкин // Приборы и техника экспериментов. – 1977. №3 – С 167-168.
11. Олейник С.В. Модификация электрофизических свойств кристаллов ZnSe и $Cd_{1-x}Zn_xTe$ для электронной техники: автореф. дис.... канд. техн. наук: 05.27.06 / Олейник С. В., Харьк. нац. ун-т радиоэлектроники. – Х., 2008. – 20 с.
12. Зеленков В.Е. Очистка сточных и оборотных вод предприятий цветной металлургии / В.Е. Зеленков, А.А. Мусина, В.К. Кульсартов // Труды института «Казмеханобр». – Алма-Ата., 1974. - №13. – С. 214-219.
- 13.Классен В.И. Магнитная обработка воды и водных систем / В.И. Классен // Вопросы теории и практики магнитной обработки воды и водных систем. М., 1971. – С. 3-17.
14. Киргинцев А.Н. О механизме магнитной обработки жидкостей / А.Н Киргинцев // Журнал физической химии. – 1971. – Т.XLV, № 4. – С. 857-859.
15. Миненко В.И. Магнитная обработка водно-дисперсных систем / В.И. Миненко. – К.: Техника, 1970. – 165 с.
16. Миненко В.И. О природе процессов и некоторых особенностях применения магнитной обработки водно-дисперсных систем / В.И. Миненко // Вопросы теории и практики магнитной обработки воды и водных систем. – М., 1971. – С.17-18.

Поступила в редакцию 24.02.2009.

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.В. Гайдачук,
Национальный аэрокосмический университет
им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков*