

Л.Л. Лысенко, Н.А. Мищук, Е.Ф. Рында

## ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРООСМОТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ В КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМАХ

*Теоретически обоснованы условия гидродинамического регулирования рН порового раствора в концентрированных водных дисперсных системах без введения в них агрессивных химических реагентов. Обеспечение оптимальных значений рН позволяет повысить электрокинетический потенциал дисперсных частиц и, соответственно, скорость электроосмотического течения жидкости. Проведенные экспериментальные исследования показали, что использование предложенного метода дает возможность интенсифицировать электроосмос в глинодержащих дисперсных системах и обеспечить его стабильность во времени.*

**Ключевые слова:** дисперсная система, прокачивание электролита, регулирование рН, электрокинетический потенциал, электроосмос, электрохимические реакции.

**Введение.** Обезвоживание разнообразных материалов, в том числе осадков на водоочистных сооружениях [1 – 5], шламов, возникающих при переработке минеральных руд [6, 7] и добыче нефти [8], почв и глинистых минералов [9 – 11], торфа [12], угля [13] и цементных растворов [14], концентрирование биополимеров и соков [15 – 18], укрепление почв с помощью электрокинетических явлений [19 – 21] и др. являются актуальной проблемой, решение которой существенно зависит от типа материала, его влагосодержания, дисперсности и поверхностных свойств.

Использование химических добавок (коагулянтов и флокулянтов) [9, 22 – 25], сочетание электроосмоса с механическим сжатием обрабатываемого влагосодержащего вещества [15, 26, 27] ускоряют процесс и степень обезвоживания последнего. Однако скорость и степень достигаемого обезвоживания по ряду причин остается далекой от совершенства.

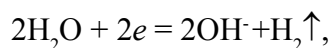
Улучшение обезвоживания дисперсных материалов возможно за счет более эффективного управления как самим процессом электроосмоса, так и путем оптимизации поверхностных характеристик обрабатываемых материалов, в частности за счет применения импульсного режима подачи напряжения [28], удаления продуктов электролиза воды [27] или регулирования рН материалов с помощью электрогидродинамических методов [29 – 31].

© Л.Л. ЛЫСЕНКО, Н.А. МИЩУК, Е.Ф. РЫНДА, 2011

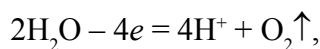
Известно, что скорость электроосмоса определяется напряженностью электрического поля, величиной электрокинетического потенциала, диэлектрической проницаемостью и вязкостью порового раствора [32, 33].

Поскольку величина электрокинетического потенциала дисперсной системы зависит от рН порового раствора, для обеспечения максимального электроосмотического потока необходимо создать и поддерживать такой рН порового раствора, при котором электрокинетический потенциал данной дисперсной системы будет иметь наибольшее возможное значение. В частности, в глиносодержащих дисперсных системах максимальный электрокинетический потенциал обычно достигается в щелочной среде [34].

Однако в процессе электрообработки, благодаря электрохимическим реакциям на электродах, происходит изменение начального значения рН дисперсной системы. В результате разложения воды на катоде возникают ионы гидроксила и происходит выделение водорода:



а на аноде генерируются ионы водорода и выделяется кислород:



что приводит к повышению рН в области катода и снижению его величины в области анода.

Без использования специальных методов регулирования рН, которые позволяют предупредить перемещение  $\text{H}^+$ - и  $\text{OH}^-$ -ионов к противоположным электродам, разложение воды приводит к изменению рН не только в электродных камерах, но и во всем межэлектродном пространстве. Как отмечено в работах [14 – 16],  $\text{H}^+$ - и  $\text{OH}^-$ - ионы движутся навстречу друг к другу и, встречаясь, рекомбинируют так, что в некоторой точке рН дисперсной системы соответствует начальной величине. С катодной стороны от этой точки в течение всего процесса сохраняется повышенное значение рН, с анодной – пониженное (рис. 1).

Профиль рН, полученный при таких условиях, вызывает перераспределение напряжения между электродами [12, 13, 20], изменение величины локального электрокинетического потенциала дисперсных частиц [12, 13] и скорости электроосмоса [20].

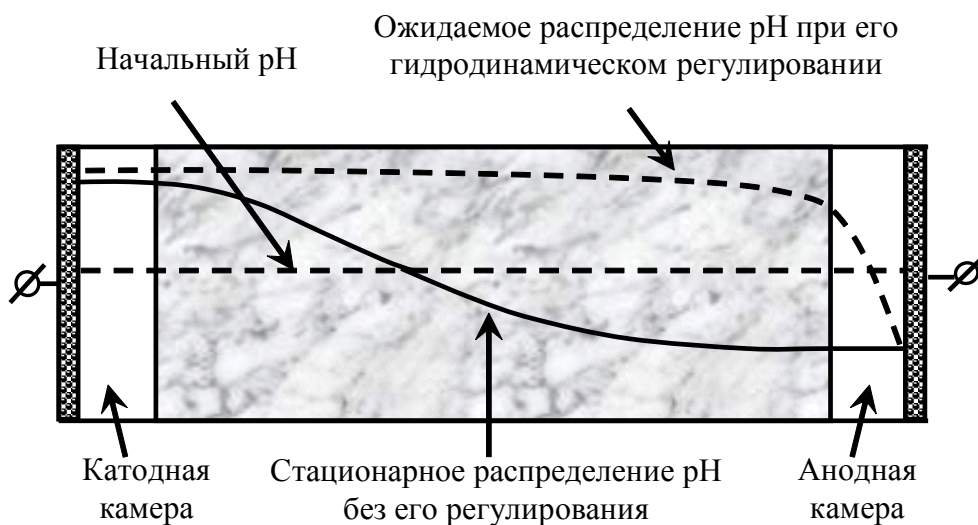


Рис. 1. Схема распределения pH в межэлектродном пространстве

Однако генерирование водород- и гидроксил-ионов в процессе электролиза воды может иметь не только отрицательное влияние, но и быть использовано для создания оптимального значения pH порового раствора дисперсной системы без дополнительного введения химических реагентов. Для этого необходимо, чтобы ионы одного вида не попадали в обрабатываемую систему при обеспечении транспорта через дисперсию ионов другого вида. Соответственно, максимальная величина электроосмотического потока в глиносодержащих дисперсных системах будет достигаться в результате попадания в них гидроксил-ионов при отсутствии водород-ионов. Ожидаемое распределение pH в межэлектродном пространстве при таком регулировании, направленном на создание и поддержание высоких значений pH, показано на рис. 1.

Для регулирования pH могут быть использованы ионообменные мембраны, которые отделяют электродные камеры от дисперсной системы [5, 21, 35, 36]. Однако применение ионообменных материалов имеет свои недостатки, рассмотренные, в частности, в [37].

Другим способом регулирования pH, который активно развивается в последнее время, является нейтрализация щелочного или кислого раствора, образующегося в прикатодной или прианодной области, соответственно, растворами кислот или щелочей [12, 13, 20]. Но использование подкисленного или подщелоченного раствора означает постоянное присутствие агрессивной жидкости, которая снижает экологичность и технологичность процесса, приводит к необходимости

применения при электрообработке дисперсий специального коррозионностойкого оборудования.

Вместе с тем теоретический анализ электромиграционных и гидродинамических процессов, которые протекают в электродных камерах и обрабатываемой дисперсной системе, позволяет не только оптимизировать электрообработку, но и предложить условия, в которых возможно регулирование рН с подачей в анодную или катодную камеру не подщелоченного или подкисленного раствора, а нейтрального раствора [14].

**Методика эксперимента.** Исследования влияния гидродинамического регулирования рН на величину электроосмотического потока проводили в экспериментальной ячейке (рис. 2), которая состоит из двух электродных камер с вертикально установленными платиновыми электродами; центральной камеры, заполненной дисперсией; камеры для подачи увлажняющего раствора и камеры для отвода электроосмотического потока. Расстояние между электродами составляет 8,5 см, площадь электродов –  $2,8 \times 2,3 = 6,44 \text{ см}^2$ , поперечное сечение электродных и центральных камер совпадает с размером электродов.

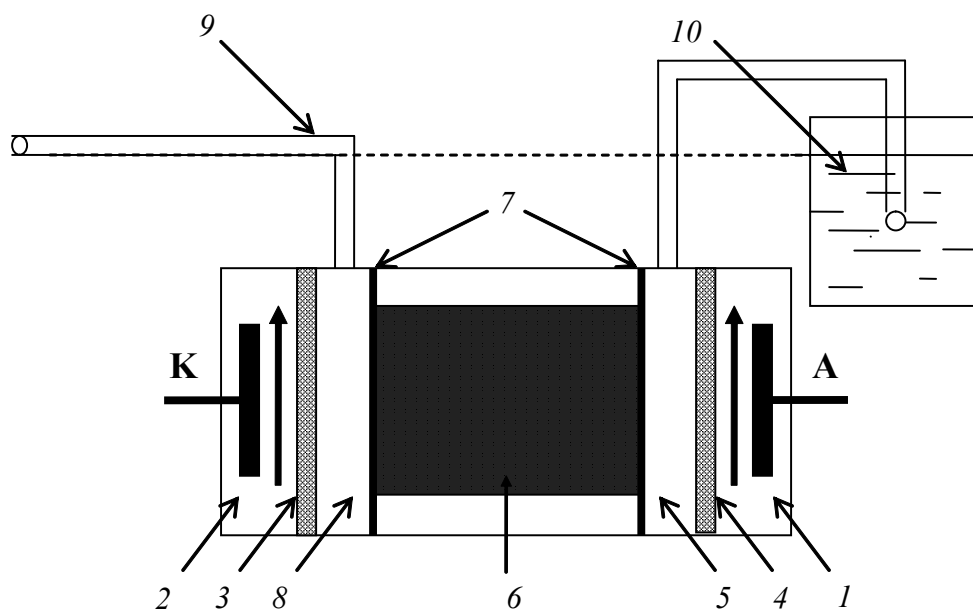


Рис. 2. Схема экспериментальной ячейки для исследования скорости электроосмотического потока: 1 – анодная камера; 2 – катодная камера; 3, 4 – ионообменные мембраны; 5 – камера подпитки каолинита увлажняющим раствором; 6 – рабочая камера, заполненная каолинитом; 7 – полисульфоновая ткань; 8 – камера для отвода электроосмотического потока; 9 – микробьюретка; 10 – компенсационная емкость

Центральную камеру отделяли от соседних камер 5, 8 (см. рис.2) прокладками из полисульфоновой ткани, не создающей собственного электроосмотического потока и не влияющей на перемещение ионов. Электродные камеры ограничивали ионообменными мембранами (полисульфовую ткань в данном случае не использовали, поскольку при ее установке не удастся избежать влияния гидродинамического потока раствора, промывающего камеры, на точность результатов, определяемых по микробиоретке). Для того чтобы мембраны не препятствовали движению генерируемых на катоде и аноде  $\text{OH}^-$  и  $\text{H}^+$ -ионов, катодную камеру отделяли анионообменной мембраной, анодную – катионообменной. Расстояние от электрода до ионообменной мембраны – 1 см.

Промывку электродных камер осуществляли отдельно с использованием двух перистальтических насосов, которые подавали 0,1 М раствор  $\text{NaNO}_3$  с заданной скоростью. Все эксперименты выполнены в потенциостатическом режиме.

В качестве дисперсной системы был использован Глуховецкий каолинит с полной обменной емкостью (ПОЕ), равной 1,3 мг-экв/100 г, и рН водной вытяжки 6,37. Определение проводили по стандартным методикам [38]. Перед началом электрообработки осуществляли предварительное увлажнение каолинита дистиллированной водой до 39% влажности, что обеспечивало достаточную электропроводность исследуемой системы.

В процессе электрообработки измеряли величину электроосмотического потока, по окончании эксперимента проводили послойное определение рН порового раствора.

### **Теоретический анализ транспортных процессов в электродных камерах**

Для выбора условий экспериментальных исследований был выполнен теоретический анализ электромиграционного и гидродинамического транспорта  $\text{H}^+$  в анодной камере.

Как отмечено ранее, до включения электрического поля начальный рН дисперсной системы имеет одно и то же значение по всему объему. После включения электрического поля  $\text{OH}^-$ -ионы движутся от катода к аноду, а  $\text{H}^+$ -ионы – от анода к катоду, обеспечивая высокие значения рН со стороны катода и низкие – со стороны анода.

Совсем другая картина распределения рН должна возникать при быстром прокачивании жидкости через электродные камеры. Рассмотрим схему анодной камеры, которая представлена на рис. 3 (в катодной камере происходит аналогичный процесс).

Движение  $\text{H}^+$  состоит из двух составляющих: гидродинамической со

скоростью потока жидкости вдоль анода и электромиграционной перпендикулярно к аноду со скоростью, которая определяется локальной напряженностью поля и электромиграционной подвижностью ионов.

Для того чтобы  $H^+$ -ионы однозначно не успели попасть в дисперсную среду, необходимо обеспечить такую скорость прокачивания, при которой их гидродинамическое смещение за время движения от анода к дисперсии было больше размера анодной камеры по направлению движения жидкости.

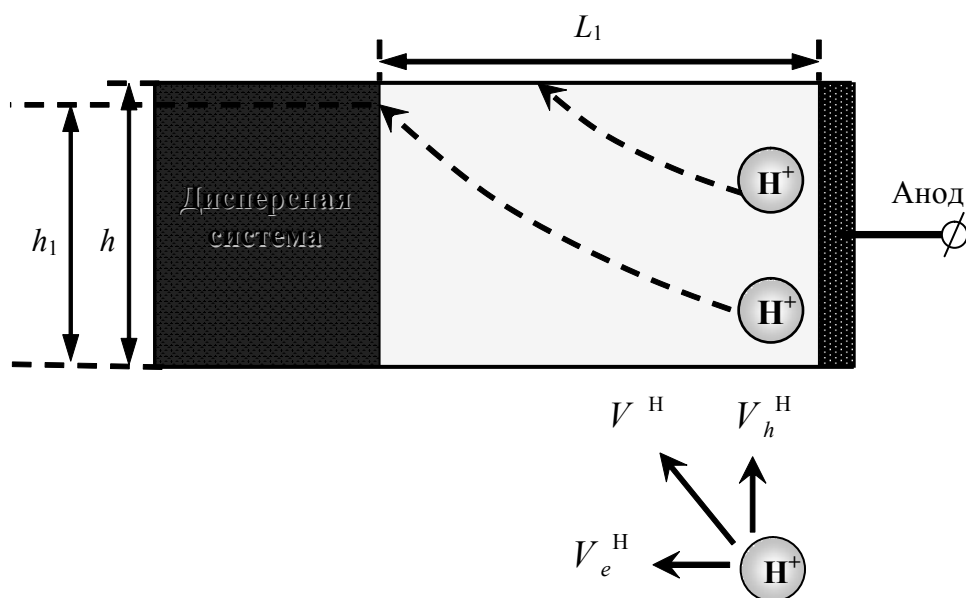


Рис. 3. Схема анодной камеры и движения  $H^+$ :  $L_1$  – расстояние от анода до дисперсной системы;  $h$  – размер анодной камеры по направлению течения жидкости;  $h_1$  – гидродинамическое смещение ионов;  $V^H$  – скорость движения  $H^+$  и ее гидродинамическая  $V_h^H$  и электромиграционная  $V_e^H$  составляющие

Анализируя величины электромиграционного и гидродинамического смещений ионов с учетом характерных размеров анодной камеры по аналогии с расчетами, выполненными нами ранее [14 – 16] при исследовании электроочистки грунтов от тяжелых металлов, находим, что линейная скорость прокачивания жидкости  $V_h^H$  должна быть больше критического значения:

$$V_{cr} \geq \frac{FD_H E}{RT} \frac{h}{L_1} \quad (1)$$

или объемная скорость прокачивания  $Q_{cr}$  больше критического значения

$$Q_{cr} = \frac{FD_H E}{RT} h h_2, \quad (2)$$

где  $F$  – постоянная Фарадея,  $R$  – газовая постоянная,  $T$  – абсолютная температура,  $D_H$  – коэффициенты диффузии ионов водорода,  $E$  – напряженность используемого электрического поля,  $h_2$  – размер анодной камеры поперек течения жидкости.

При достижении такой скорости снижение рН будет иметь место только около поверхности анода, где происходит разложение воды.

С учетом коэффициента диффузии ионов водорода и параметров экспериментальной ячейки ( $h = 2,8$ ,  $h_2 = 2,3$  см) при усредненной по длине ячейки напряженности электрического поля ( $E = 3$  В/см) критическая объемная скорость прокачивания жидкости (2) через анодную электродную камеру составляет  $\sim 210$  см<sup>3</sup>/ч. Естественно, что при изменении напряженности электрического поля  $Q_{cr}$  будет изменяться пропорционально величине  $E$ .

При расчетах использовали экспериментальные значения электромиграционной подвижности ионов водорода при бесконечном разбавлении раствора [39]. Безусловно, изменение концентрации носителей тока, а также рН раствора влияет на подвижность как ионов солей, присутствующих в почве, так и ОН<sup>-</sup> и Н<sup>+</sup>-ионов, генерируемых на электродах. В частности, гидратация ионов водорода может снижать их подвижность, что, в свою очередь, должно влиять на критическую скорость прокачивания раствора в анодной камере. Вместе с тем для устойчивой работы установки необходимо определять критическую скорость прокачивания с некоторым запасом, поэтому расчеты, проведенные при максимально возможной подвижности иона водорода, являются оптимальными.

### **Анализ полученных экспериментальных данных**

Для определения влияния рН дисперсной среды и методов его регулирования на скорость электроосмотического потока проведена серия экспериментов. Каолинит имеет отрицательный электрокинетический потенциал и, соответственно, электроосмотический поток будет направлен от анода к катоду, а его величина должна повышаться с увеличением рН порового раствора. Так, согласно [34], при рН 2  $\xi$ -потенциал равен 0,7 мВ, а при рН 10 – –54 мВ.

Изменение знака заряда связано со структурой каолинита. Известно [40, 41], что его частички имеют как базальные грани, заряжен-

ные в водной среде отрицательно, так и боковые грани, на которых существуют два типа участков с противоположными знаками:  $\equiv\text{SiO}^-\text{H}^+$  и  $=\text{Al}^+\text{OH}^-$ . Для водных дисперсий каолинита при  $\text{pH} \geq 7$  соотношение этих участков примерно одинаково, и, соответственно, заряд частички определяется знаком заряда базальной грани. Однако при  $\text{pH} \leq 5$  преобладают группы  $\equiv\text{SiO}^-\text{H}^+$ , что приводит к тому, что боковые грани приобретают положительный заряд, снижая значение усредненного по частичкам заряда до нуля или даже изменяя его знак, что отражается на получаемом экспериментально электрокинетическом потенциале.

Для подтверждения правомерности идеи о снижении скорости электроосмотического переноса при уменьшении значения  $\text{pH}$  порового раствора исследуемой дисперсной системы проведен эксперимент с регулированием  $\text{pH}$ , направленным на получение его низких значений по всему объему загрузки. В экспериментальной ячейке были установлены две катионообменные мембраны, в результате чего ионы гидроксила не поступали в каолинит, а ионы водорода, двигаясь под действием электрического поля от анода к катоду, привели к уменьшению  $\text{pH}$  во всей дисперсной системе. Снижение скорости электроосмотического переноса вплоть до полной его остановки полностью коррелирует с полученным профилем  $\text{pH}$  (рис. 4, а, б).

В качестве эксперимента сравнения при проведении процесса электрообработки определено распределение  $\text{pH}$  без его регулирования. Как и предполагалось, при этом происходит перераспределение начального значения  $\text{pH}$  с повышением со стороны катода и снижением со стороны анода (см. рис. 4, а).

Полученный профиль качественно совпадает с профилем  $\text{pH}$ , представленном на рис. 1. Характер электроосмотического течения жидкости при таком распределении  $\text{pH}$  и причины, его определяющие, будут рассмотрены ниже.

Дальнейшие исследования направлены на определение влияния скорости прокачивания нейтрального раствора через электродные камеры, на формирование профиля  $\text{pH}$  и, соответственно, скорость электроосмоса в обрабатываемой системе.

Как было показано выше, при промывке электродных камер со скоростью ниже критической (для катодной камеры она составляет  $85 \text{ см}^3/\text{ч}$ ), в результате того, что  $\text{H}^+$  и  $\text{OH}^-$  попадают в дисперсию, происходит перераспределение начального  $\text{pH}$  со снижением его значений в прианодной области и повышением – в прикатодной (рис. 5, а).



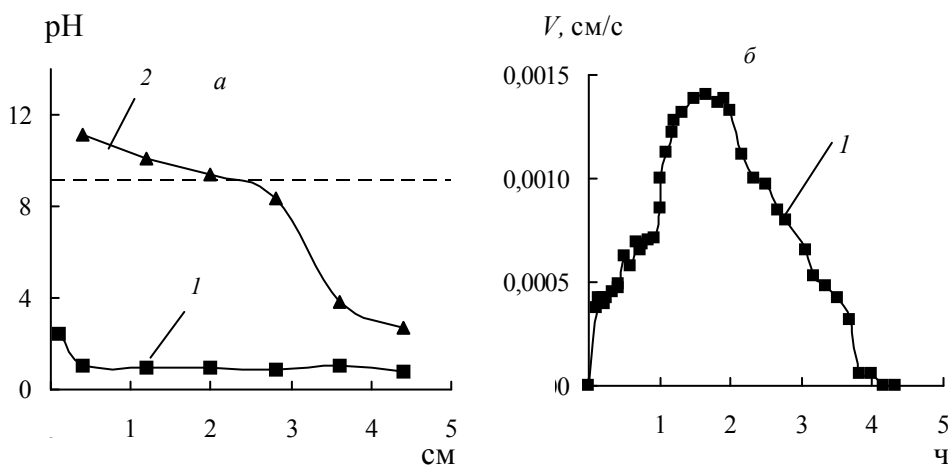


Рис. 4. Распределение рН в образце каолинита (исходная влажность – 39%) в направлении от катода к аноду (а) и зависимость скорости электроосмотического потока от времени (б) при регулировании рН с использованием ионообменных мембран (1), напряженность поля – 6 В/см; без регулирования рН (2), напряженность поля – 3 В/см. Пунктирная линия – начальное значение рН порового раствора

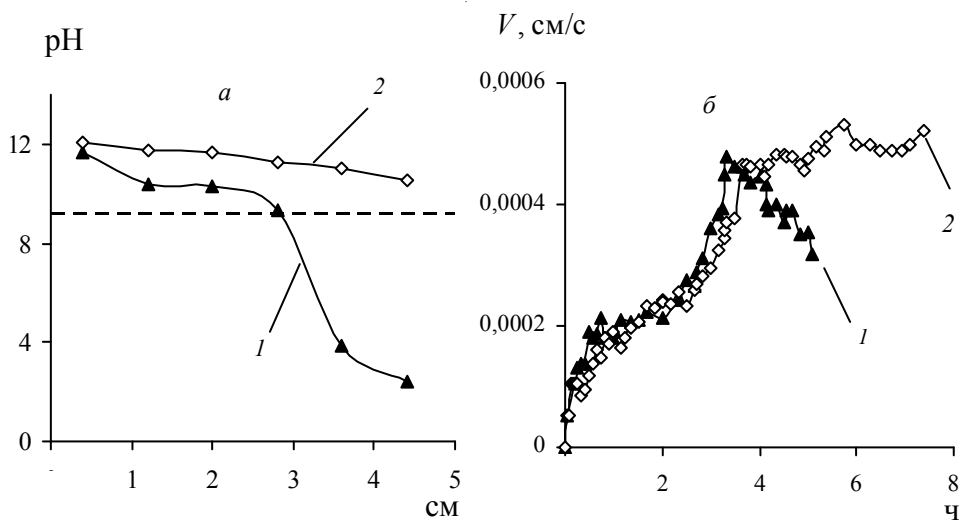


Рис. 5. Распределение рН в образце каолинита (исходная влажность – 39%) в направлении от катода к аноду (а) и зависимость скорости электроосмотического потока от времени (б): 1 – скорость промывки анодной камеры – 30, катодной камеры – 30 см<sup>3</sup>/ч; 2 – скорость промывки анодной камеры – 250, катодной камеры – 30 см<sup>3</sup>/ч. Напряженность поля – 3 В/см. Пунктирная линия – начальное значение рН порового раствора

Полученный профиль рН коррелирует с профилем, формирующимся в результате обработки, проведенной без регулирования рН (см. рис. 4, а). Изменение рН сопровождается изменением скорости электроосмотического переноса (см. рис. 4, б). На начальном этапе (~ 2 ч), до тех пор, пока величина рН порового раствора по всему объему загрузки приблизительно одинакова и близка к начальному значению, и, соответственно, одинаковы электропроводность системы и напряженность электрического поля, скорость электроосмоса постоянна и определяется величиной электрокинетического потенциала, характерной для данного значения рН.

В ходе обработки дисперсии поступление ионов водорода и гидроксидов в каолинит приводит не только к изменению рН, что сопровождается снижением электрокинетического потенциала со стороны анода и повышением со стороны катода, но и к локальному изменению электропроводности системы. Несмотря на то, что водород- и гидроксил-ионы попадают в каолинит в эквивалентных количествах, электропроводность участков со сниженным рН превышает таковую на участках с повышенным рН, поскольку подвижность ионов водорода в 2,5 раз выше, чем подвижность ионов гидроксидов. В результате происходит перераспределение напряженности электрического поля. При этом на участке повышенного рН создаются условия, которые приводят к росту скорости электроосмотического переноса в системе (более высокое значение электрокинетического потенциала и большая напряженность электрического поля, чем на участке со сниженным рН), что и отражено на рис.4 (~2,0 – 3,5 ч). Однако, поскольку одновременно с увеличением электроосмотического потока в области с повышенным рН происходит его уменьшение в области со сниженным рН, в определенный момент начинается снижение скорости электроосмоса на выходе из системы, так как электроосмотический поток в прианодной области не может компенсировать отток порового раствора через прикатодную область.

Для формирования щелочного профиля рН, который обеспечивает увеличение электрокинетического потенциала каолинита и максимальную скорость электроосмотического потока, промывку электродных камер осуществляли следующим образом. Через анодную камеру нейтральный раствор прокачивали со скоростью, превышающей критическую (согласно проведенным расчетам достижение критического значения подачи раствора в анодную камеру составляет 210 см<sup>3</sup>/ч), что позволяет не допустить поступления водород-ионов в дисперсную систему. При этом прокачивание катодной камеры осуществляли со скоростью ниже критической, что приводит к попаданию ОН-ионов, образовавшихся на катоде в процессе электрообработки, в дисперсию.

В результате проведенного регулирования действительно получен щелочной профиль рН (см. рис. 5, а). При этом, соответственно, обрабатываемая дисперсная система имеет максимальный электрокинетический потенциал, что обеспечивает равномерный, стабильный во времени электроосмотический поток по всему ее объему (см. рис. 5, б).

**Выводы.** На основании вышеизложенного можно заключить, что предложенный метод позволяет получить необходимый профиль рН при использовании нейтрального раствора за счет варьирования скоростей промывки электродных камер. Следовательно, при гидродинамическом регулировании рН может быть получен стабильный электроосмотический поток с максимально возможной скоростью при заданной напряженности электрического поля без применения агрессивных реагентов и ионообменных материалов, что и было подтверждено проведенными измерениями скорости электроосмоса.

**Резюме.** Теоретично обґрунтовані умови гідродинамічного регулювання рН порового розчину в концентрованих водних дисперсних системах без введення в них агресивних хімічних реагентів. Забезпечення оптимального рН дозволяє підвищити електрокінетичний потенціал дисперсних частинок та, відповідно, швидкість електроосмотичної течії рідини. Проведені експериментальні дослідження показали, що використання запропонованого методу дозволяє інтенсифікувати електроосмос в глиновмісних дисперсних системах і забезпечити його стабільність у часі.

*L.L. Lysenko, N.A. Mishchuk, E.F. Rynda*

## **INTENSIFICATION OF ELECTROOSMOTIC FLOW OF WATER SOLUTIONS IN CONCENTRATED DISPERSE SYSTEMS**

### **Summary**

The conditions of hydrodynamic regulation of pH of pore solution in concentrated aqueous disperse systems without introduction of aggressive chemical reagents are theoretically substantiated. The support of optimal pH allows to increase the electrokinetic potential of disperse particles and, correspondingly, the velocity of electroosmotic flow of liquid. The performed experimental investigations had shown that the use of proposed methods allows to intensify electroosmosis in argilliferous disperse systems and to provide its stability in time.

1. *Byun S., Kwon J.H., Kim M.H., Park K.Y., Lee S.* // *Separ. and Purif. Technol.*– 2007. – **57**. – P. 230 – 236.
2. *Glendinning S., Lamont- Black J., Jones C.J.F.P.* // *J. Hazard. Materials.* – 2007. – **139**, Issue 3. – P. 491 – 499.
3. *Yuan C., Weng C.H.* // *Adv. Environ. Res.*– 2003.– **7**. – P. 727 – 732.
4. *Reddy K.R., Urbanek A., Khodadoust A.P.* // *J. Environ. Management.* – 2006. – **78**. – P. 200 – 208.
5. *Cheremisinoff N.P.* *Liquid Filtration* (second edition). – Boston: Butterworth – Heinemann, 1998. – 320 p.
6. *Fourie A.B., Jones C.J.F.P.* // *Geotextiles and Geomembr.* – 2010. – **28**. – P. 181 – 190.
7. *McGuire M.J., Addai-Mensah J., Bremmell K.E.* // *Colloids and Surfaces, A.* – 2006. – **275**.– P. 153 – 160.
8. *Yang L., Nakhla G., Bassi A.* // *J.Hazard. Materials.*– 2005.– **125**, N1/3.– P. 130 – 140.
9. *Lockhart N.C.* // *Colloids and Surfaces.* – 1983. – **6**, N 3.– P. 239 – 251.
10. *Shang J.Q., Lo K.Y.* // *J.Hazard. Materials.* – 1997.– **55**, N 1/3.– P. 117 – 133.
11. *Ju S., Weber M. E., Mujumdar A. S.* // *Separ. Technol.*– 1991.– **1**, N 4.– P. 214 – 221.
12. *Ayub A.L., Sheppard J.D.* // *Colloids and Surfaces.* – 1986.– **18**, N 1.– P. 43 – 52.
13. *Lockhart N.C.* // *Fuel.* – 1982. – **61**, N 8. – P. 780 – 781.
14. *Kuin A.J., Ogrinc H.J.A., Stein H.N.* // *Colloids and Surfaces.*– 1987.– **27**, Issue 4. – P. 65 – 80.
15. *Hofmann R., Posten C.* // *Chem. Eng. Sci.* – 2003. – **58**. – P. 3847 – 3858.
16. *Yin X., Han P., Lu X., Wang Y.* // *Ultrason. Sonochem.*– 2004. – **11**.– P. 337 – 348.
17. *Al-Asheh S., Jumah R., Banat F., Al-Zoubi K.* // *Food and Bioproducts Proces.* – 2004.– **82**(C3).– P. 193 – 200.
18. *Sarkar B., De S., DasGupta S.* // *Separ. and Purif. Technol.* – 2008.– **63**.– P. 582 – 591.
19. *Glendinning S., Jones C.J.F.P., Lamont-Black J.* *Ground Improvement.: Case Histories / Eds. J.Chu, B. Indraratna.* – London: Elsevier Science, 2005.– Vol.3. – P. 997 – 1043.
20. *Adamson L.G., Quigley D.W., Ainsworth H.R., Chilingar G.V.* // *Eng. Geol.*– 1966.– **1**, N6.– P. 451 – 459.
21. *Rittirong A., Shang J.* *Ground Improvement.: Case Histories / Eds. J.Chu, B.Indraratna.* – London: Elsevier Science, 2005. – Vol.3. – P. 967 – 996.
22. *Saveyn H., Pauwels G., Timmerman R., Van der Meeren P.* // *Water Res.* – 2005. – **39**. – P. 3012 – 3020.
23. *Saveyn H., Curvers D., Pel L., De Bondt P., Van der Meeren P.* // *Ibid.*– 2006.– **40**. – P. 2135 – 2142.
24. *Addai-Mensah J., Ralston J.* // *Powder Technol.* – 2005.– **160**.– P. 35 – 39.
25. *Addai-Mensah J., Ralston J.* // *Hydrometallurgy.* – 2004. – **74**.– P. 221 – 231.
26. *Weber K., Stahl W.* // *Separ. and Purif. Technol.* – 2002. – **26**.– P. 69 – 80.
27. *Larue O., Wakeman R.J., Tarleton E.S., Vorobiev E.* // *Chem. Eng. Sci.* – 2006.– **61**.– P. 4732 – 4740.
28. *Yoshida H., Kitajyo K., Nakayama M.* // *Drying Technol.*– 1999.– **17**, N3.– P. 539 – 554.

29. *Лысенко Л.Л., Мищук Н.А.* // Химия и технология воды. – 2009. – **3**, № 3. – С. 245 – 261.
30. *Мищук Н.А., Лысенко Л.Л.* // Коллоид. журн. – 2009. – **71**, № 1. – С. 1 – 10.
31. *Lysenko L.L., Mishchuk N.A.* // Colloids and Surfaces, A. – 2009. – **333**. – С. 59 – 66.
32. *Духин С. С.* Электропроводность и электрокинетические свойства дисперсных систем. – Киев, 1975. – 248 с.
33. *Тихомолова К.П.* Электроосмос. – Л.: Химия. – 1989. – 247 с.
34. *Saichek R.E., Reddy K.R.* // Critical Rev. Environ. Sci. and Technol. – **35**. – 2005. – P. 115 – 192.
35. *Hung W.T., Chang I.L., Lin W.W.* // Environ. Sci. and Technol. – 1996. – **30**. – P. 2391 – 2396.
36. *Lee D.J., Hsu Y.H.* // Ibid. – 1994. – **28**. – P. 1444 – 1449.
37. *Kornilovich B.Yu., Mishchuk N.A., Abruzzese C., Pshinko G.N., Klischenko R.E.* // Colloids and Surfaces, A. – 2005. – **265**. – P. 114 – 123.
38. *Аринушкина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. – М.: Изд-во МГУ, 1970. – 487 с.
39. *Краткий справочник физико-химических величин* / Под ред. А.А. Равделя, А.М. Пономаревой. – Л.: Химия, 1983. – 232 с.
40. *Тарасевич Ю.И.* // Химия и технология воды. – 1998. – **20**, № 1. – С. 42 – 51.
41. *Тарасевич Ю.И.* Природные сорбенты в процессах очистки воды. – Киев: Наук. думка, 1981. – 208 с.

Ин-т коллоид. химии и химии воды  
им.А.В.Думанского НАН Украины,  
г. Киев

Поступила 04.11.2010

