

УДК 544.77:544.638:628.166

DOI: 10.20535/1810-0546.2017.3.102714

Л.Л. Лысенко*, Н.А. Мищук

Институт коллоидной химии и химии воды имени А.В. Думанского НАН Украины, Киев, Украина

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ НА МАССОПЕРЕНОС ПРИ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРАЦИОННОМ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИИ ВОДЫ

Background. The development of a method for increasing the efficiency of an installation for electrochemical water disinfection.

Objective. The aim of the paper is the study of the influence of electrokinetic phenomena on the mass transfer in a system with a charged porous diaphragm, aimed at determining the conditions that allow increasing the efficiency of the process of electrofiltration water disinfection while maintaining the parameters of its conduct and ensuring the necessary degree of decontamination.

Methods. The determination of the efficiency of the microporous filter element in various ways of organizing the electrofiltration process is conducted.

Results. The efficiency of the microporous charged element depends on the location of the cathode and the anode, which determines the direction of the electroosmosis with respect to the flow of the treated water. Increasing the strength of the electric field while maintaining the value of the operating pressure leads to an intensification of the processes affecting the efficiency.

Conclusions. The location of electrodes, which ensures the counter motion of the hydrodynamic flow of the treated water and the electroosmotic flow occurring in the pores of the charged diaphragm, allows substantially increasing the productivity of the disinfection process.

Keywords: charged porous diaphragm; electroosmosis; electrophoresis; ζ -potential; bacteria.

Введение

Данные контроля состояния водоемов Украины свидетельствуют о загрязнении их недостаточно очищенными сточными водами, отмечаются случаи зараженности возбудителями паразитарных инфекций. В последние годы требования по обеспечению безопасности питьевой воды в отношении патогенных микроорганизмов повышаются, вводятся новые микробиологические показатели качества воды. Сложившаяся ситуация указывает на необходимость обеззараживания как питьевой воды, так и всех видов сточных вод, поступающих прямо или косвенно в открытые водоемы. Известно, что традиционные методы водоподготовки (коагуляция, седиментация, фильтрация) могут обеспечить очистку воды от микробиологических загрязнений только в сочетании с эффективным процессом обеззараживания.

Методы обеззараживания делятся на три группы:

– химические (хлорирование, озонирование, обработка пероксидом водорода и некоторыми ионами металлов) [1, 2];

– физические (ультрафиолетовое излучение, ультразвук, электрическое поле, фильтрация) [3, 4];

– физико-химические (коагуляция, флотация, сорбция, электрофильтрация, электрохимическое обеззараживание, мембранная фильтрация) [5–7].

В настоящее время не существует единого универсального метода обеззараживания воды, все они, помимо достоинств, имеют и недостатки. Так, например, для установок малой производительности использование озонирования мало приемлемо, поскольку метод технически сложен и отличается высокой опасностью при эксплуатации оборудования, обработка ультрафиолетовым облучением накладывает ограничения по качеству обеззараживаемой воды, а химическое хлорирование связано с необходимостью доставки и работы с агрессивными реагентами. Поэтому выбор того или иного метода определяется исходя из конкретных условий его применения.

Комбинирование методов позволяет повысить эффективность обеззараживания, поскольку при их совместном использовании возможно возникновение синергидного эффекта [2, 3, 8]. Так, например, усиление обеззараживающего действия дезинфектантов может быть достигнуто с помощью электрического поля [9].

В настоящей работе рассмотрен способ электрофильтрационного обеззараживания, сочетающий транспорт воды через микропористую ке-

* corresponding author: lysenko_ll@yahoo.com

рамическую диафрагму с наложением электрического поля на зону фильтрования. Диафрагмы из оксидной керамики применяют как непосредственно для фильтрования, так и с целью разделения анодной и катодной зон при проведении электрохимического обеззараживания воды [10–12]. К преимуществам их использования относятся механическая прочность, термостойкость и устойчивость к действию растворов кислот и щелочей.

Производительность фильтрующего элемента зависит как от размера пор, так и от условий проведения процесса. Поскольку оксидная керамика имеет поверхностный заряд, использование электрического поля не только обеспечивает получение дезинфектанта, но и вызывает электроосмотический поток через поры, направление которого определяется расположением электродов. Нами высказано предположение, что смена полярности электродов, сопровождающаяся изменением направления электроосмоса по отношению к гидродинамическому течению воды, будет влиять на массоперенос в системе и, соответственно, на производительность фильтрующего элемента.

Постановка задачи

Целью исследования является изучение влияния электрокинетических явлений на массоперенос в системе с заряженной пористой диафрагмой, направленное на определение условий, позволяющих увеличить производительность процесса электрофильтрационного обеззараживания воды при сохранении параметров его проведения (напряженности электрического поля, рабочего давления, размера пор фильтрующего элемента) и обеспечении необходимой степени обеззараживания.

Материалы и методы

Экспериментальная установка состояла из емкости с исходной водой, электрохимической ячейки, источника постоянного тока, гидравлического насоса, вольтметра, амперметра и манометра. Схема ячейки, в которой происходил процесс электрохимического обеззараживания воды, представлена на рис. 1. Основными элементами ячейки являются цилиндрический корпус 1, в который помещены фильтрующий элемент 2 и электроды 3. Направления гидродинамических потоков указаны на схеме стрелками.

В работе использованы микропористые фильтры в форме трубки, изготовленные из ок-

сидной керамики ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) и имеющие геометрические параметры: длина – 120 мм, внешний и внутренний диаметр – соответственно 12 и 6 мм, размер пор – 0,7–0,8 и 5,2–5,3 мкм. Один из электродов обмотан вокруг внешней поверхности фильтра, второй, выполненный в форме спирали, находится внутри него. Материал электродов – платина.

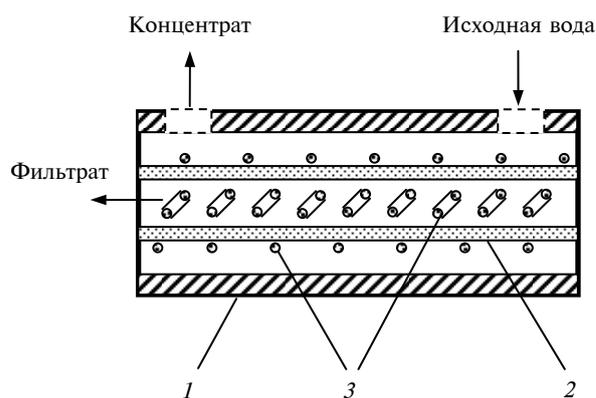


Рис. 1. Схема электрохимической ячейки для обеззараживания воды: 1 – корпус, 2 – фильтрующий элемент, 3 – электроды

В качестве биологического загрязнения использовали культуру *Escherichia coli*, клетки бактерий палочковидные, размер $0,4\text{--}0,8 \times 1\text{--}3$ мкм [13].

В ходе экспериментов измеряли объем фильтрационного потока, с учетом площади фильтрующей поверхности керамического элемента рассчитывали производительность установки. Напряженность электрического поля в выполненных исследованиях составляла 10, 15 и 25 В/см, рабочее давление варьировали в диапазоне от 0,06 до 0,4 МПа.

Эксперименты проведены при следующих режимах обработки:

- без наложения внешнего электрического поля, электроосмос отсутствует (режим I);
- при наложении внешнего электрического поля с катодом, расположенным снаружи фильтрующего элемента, поток исходной воды и электроосмотический поток направлены в противоположные стороны (режим II);
- при наложении внешнего электрического поля с катодом, расположенным внутри фильтрующего элемента, направления потоков совпадают (режим III).

Поскольку исследованию закономерностей получения дезинфектантов при электрохимической обработке в зависимости от материала электродов, параметров ведения процесса, химического состава обеззараживаемой воды посвящены

многочисленные исследования [6, 7, 11, 12], здесь ограничимся лишь констатацией факта обеззараживания воды (необходимая степень обеззараживания соответствует содержанию бактерий <3 ед/см³).

Результаты и их обсуждение

На первом этапе исследований обработку воды проводили без наложения электрического поля, т.е. реализовывали непосредственно процесс фильтрования бактерий (концентрация *E. coli* в исходной воде составляла $2 \cdot 10^6$ ед/см³). При использовании фильтра с размером пор 0,7–0,8 мкм обеспечивается относительно невысокая производительность установки – 0,32 м³/м²×ч при давлении 0,2 МПа и 0,58 м³/м²×ч при 0,4 МПа, а также наблюдается быстрое забивание пор фильтрующего элемента. Результаты, полученные нами [14], показали, что в данном случае происходит полное удаление микроорганизмов в диапазоне рабочего давления до 0,4 МПа.

Увеличения производительности установки и продолжительности рабочего цикла без повышения давления можно достичь за счет применения фильтрующего элемента с более крупными порами. Однако при переходе к размеру пор 5,2–5,3 мкм даже при концентрации *E. coli* $2 \cdot 10^3$ ед/см³, т.е. на три порядка меньше, чем в предыдущем случае и давлении 0,06 МПа, не удается обеспечить задержание бактерий – концентрация *E. coli* в фильтрате составляет порядка 20–26 ед/см³ [14].

Дальнейшие исследования проводили с использованием электрического поля при внесении в обрабатываемую воду хлорида натрия, что обеспечивало электрохимическое образование дезинфектанта.

Рассмотрим, каким образом организация процесса электрофильтрации может влиять на производительность установки. Как было сказано, оксидная керамика имеет поверхностный заряд [15], а значит, при наложении внешнего электрического поля в порах фильтра возникает электроосмотический поток. В зависимости от того, какой именно электрод (анод или катод) расположен внутри фильтрующего элемента, а какой снаружи (см. рис. 1), направление исходного потока обрабатываемой воды будет либо совпадать с направлением электроосмоса, либо находиться в противотоке (оксидная керамика заряжена отрицательно, соответственно, электроосмос направлен к катоду).

На рис. 2 представлены результаты обработки, проводившейся в разных режимах при исполь-

зовании керамического фильтра с размером пор 5,3–5,5 мкм и при рабочем давлении 0,1 МПа, концентрация *E. coli* составляла 10^4 ед/см³.

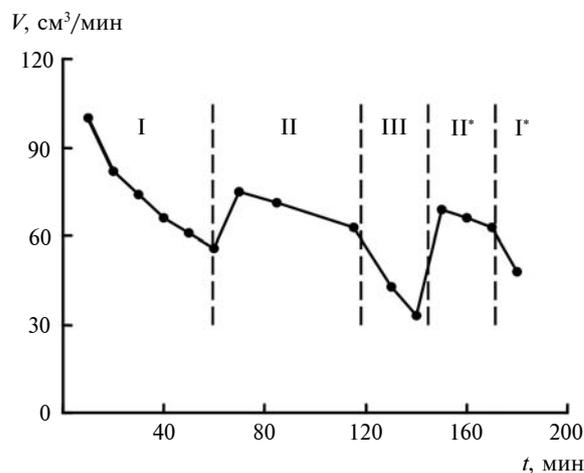


Рис. 2. Объемная скорость фильтрата при разных режимах обработки: I и I* – без наложения электрического поля, электроосмос отсутствует; II и II* – при наложении электрического поля, обеспечивающего разнонаправленное движение гидродинамического и электроосмотического потоков; III и III* – при наложении электрического поля, обеспечивающего однонаправленное движение гидродинамического и электроосмотического потоков

Из полученных данных видно, что после обычного фильтрования (рис. 2, участок I) включение электрического поля, обеспечивающего течение электроосмоса в направлении, противоположном движению исходного потока, позволяет увеличить скорость фильтрата (рис. 2, участок II), при этом наблюдается замедление падения скорости. Проведение переполюсовки, сопровождающееся изменением направления течения электроосмоса, приводит к резкому уменьшению скорости фильтрования (рис. 2, участок III). Возврат к предыдущему режиму позволяет практически восстановить прежние значения (рис. 2, участок II*). При отключении электрического поля скорость фильтрата понижается (рис. 2, участок I*) по сравнению с режимом II, однако остается выше, чем при режиме III.

Для того чтобы определить причину изменения производительности фильтрующего элемента, проанализируем отличия между течением жидкости и движением бактерий в его порах без электрического поля и при его использовании. Линейная $V_h(r)$ и объемная Q_h скорости гидродинамического течения жидкости в поре радиусом R при заданном перепаде давления ΔP на диафрагме толщиной h определяются выражениями [16]

$$V_h(r) = \frac{(R^2 - r^2)\Delta P}{4\eta h} \quad \text{и} \quad Q_h = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8\eta h}, \quad (1)$$

где r – расстояние от центра поры, η – вязкость жидкости.

Без внешнего электрического поля скорость движения бактерии V_b совпадает со скоростью гидродинамического потока $V_h(r)$, а при использовании электрического поля определяется также скоростью электроосмотического течения в поре V_{eo} и собственной скоростью электрофореза V_{ef} :

$$V_b(r) = V_h(r) + V_{eo} + V_{ef}. \quad (2)$$

При используемой концентрации электролита 0,01 моль/дм³ радиус Дебая составляет величину порядка 3 нм, т.е. при любом из размеров пор, характерном для используемой керамической диафрагмы можно считать, что скорость электроосмоса постоянна по сечению поры [17]. Согласно формуле Смолуховского она равна [18]

$$V_{eo} = -\frac{\varepsilon}{\eta} \zeta_d E, \quad (3)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость раствора, ζ_d – электрокинетический потенциал диафрагмы.

Скорость электрофореза бактерий определяется также формулой Смолуховского:

$$V_{ef} = \frac{\varepsilon}{\eta} \zeta_b E, \quad (4)$$

где ζ_b – электрокинетический потенциал бактерии.

Учтем, что электрокинетический потенциал бактерий составляет величину порядка $-(10,5-33,5)$ мВ [19], а ζ -потенциал диафрагмы в зависимости от используемого материала и pH раствора может изменяться в достаточно широком диапазоне от 5–10 до $-(40-120)$ мВ. Поскольку знак заряда бактерий обычно совпадает со знаком заряда пор диафрагмы, то они движутся в электрическом поле в направлении, противоположном электроосмотическому потоку. В частном случае одинаковых величин ζ -потенциала диафрагмы и бактерии суммарная скорость движения бактерии в электрическом поле будет равна нулю, т.е. ее скорость будет совпадать со скоростью гидродинамического потока. Однако такое совпадение маловероятно. Рассмотрим для примера вариант достаточно большого различия ζ -потенциалов, например, $\zeta_b = -20$ мВ, а $\zeta_d = -100$ мВ. На рис. 3. приведены результаты расчета скорости гидродинамического течения $V_h(r)$ при давлении 0,1 МПа и интегральной скорости движения бактерии $V_b(r)$ с учетом указанных потенциалов для двух направлений электрического поля при его напряженности 25 В/см.

Для удобства сопоставления полученных результатов для разного радиуса пор R расстояние от центра пор r нормировано на R . По центру канала отличие между $V_h(r)$ и $V_b(r)$ в процентном отношении незначительное (рис. 3, а).

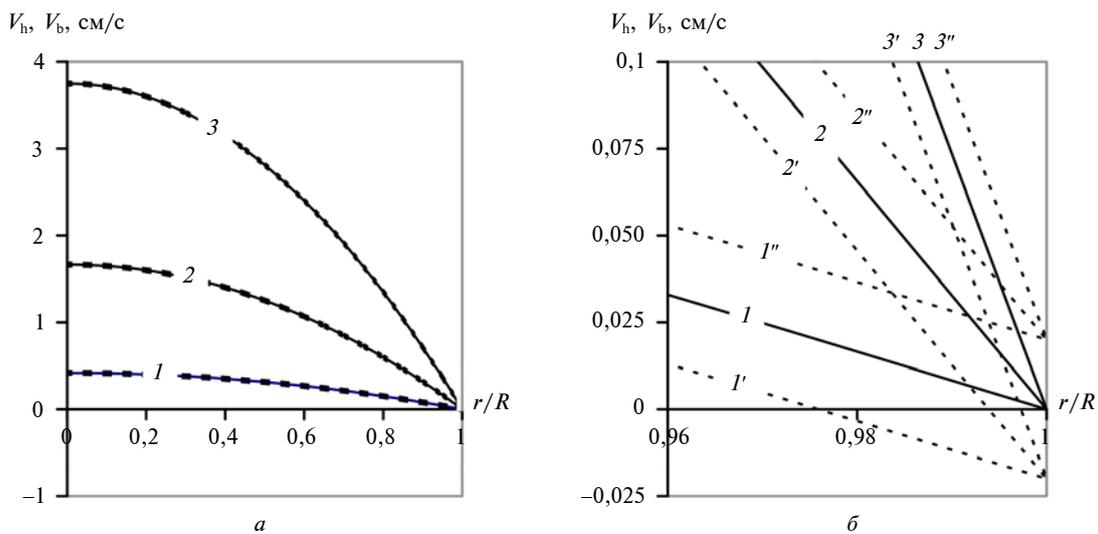


Рис. 3. Распределение скоростей движения $V_h(r)$ и $V_b(r)$ по сечению поры при различных величинах ее радиуса, представленное в разных масштабах (а, б). Кривые 1, 2, 3 – $V_h(r)$; 1', 2', 3' – $V_b(r)$ при наложении электрического поля, обеспечивающего разнонаправленное движение гидродинамического и электроосмотического потоков; 1'', 2'', 3'' – $V_b(r)$ при наложении электрического поля, обеспечивающего однонаправленное движение гидродинамического и электроосмотического потоков; $R = 2$ (1, 1', 1''), 4 (2, 2', 2''), 6 (3, 3', 3'') мкм

Однако в пристеночной области они не только становятся величинами одного порядка (рис. 3, б), но и из-за стремления $V_i(r)$ к нулю скорость движения бактерий стремится к $V_b(r) \rightarrow V_{eo} + V_{ef}$, и при разных направлениях поля в этой области бактерии движутся или по направлению гидродинамического потока, или против него.

Сопоставляя приведенные здесь данные с рис. 2, видим, что повышение производительности фильтра возникает в случае, когда электроосмос направлен навстречу гидродинамическому потоку и суммарная скорость течения жидкости, хотя незначительно, но все же уменьшается, т.е., на первый взгляд, производительность должна снижаться.

Для объяснения этого явления надо рассмотреть три фактора. Первый фактор – при включении поля изменяется ориентация бактерий. Если в присутствии только одного гидродинамического потока они могут принимать произвольное положение, то в случае наложения электрического поля они будут ориентироваться преимущественно вдоль поры, что должно уменьшать вероятность закупорки пор и тем самым увеличивать производительность диафрагмы.

Однако при наличии только переориентации бактерий влияние разных направлений поля равноправно, т.е. закупорка пор должна уменьшаться в обоих случаях, что не согласуется с рис. 2. Поэтому можно предположить, что действует еще один фактор. Одновременно с изменением ориентации бактерий на их транспорт через поры диафрагмы влияет изменение направления их движения в пристеночной области, обусловленное электроосмосом. Благодаря локальной неоднородности течения жидкости возникает своеобразная локальная турбулизация потока, ухудшаются условия адгезии бактерий к стенке. В результате поток выносит бактерии из порового пространства, не закупоривая пору. Эта же неоднородность течения отрывает бактерии, прилипшие к стенкам поры на предыдущем этапе эксперимента (в отсутствие электрического поля). Чем выше ζ_d , тем больше скорость электроосмотического потока, тем сильнее локальная неоднородность потока жидкости и слабее адгезия.

Следующий фактор, улучшающий транспорт бактерий через поры, – турбулизация потока, связанная с изменением рН порового раствора. Благодаря электролизу воды, сопровождающемуся повышением рН у катода и снижением у анода, происходит локальное изменение рН и, соответственно, электрокинетического потенциала: со стороны катода ζ -потенциал диафрагмы ζ_d по-

вышается, а со стороны анода уменьшается или даже изменяет знак, для $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ точка нулевого заряда в зависимости от условий получения лежит в интервале рН 8,3–9,4 [15].

Именно при высоких значениях рН может достигаться величина ζ_d , приближающаяся к использованному нами для расчетов значению. При этом, если в прианодной области рН ζ_d достигает положительных значений, то в некоторой области поры электроосмотические потоки изменяют свое направление, что также ухудшает адгезию бактерий к стенке поры или приводит к отрыву уже прилипших к ней бактерий. Этот же эффект в несколько менее выраженной форме будет иметь место и без изменения знака потенциала стенки поры, а только при его неоднородности, когда ζ -потенциал и, соответственно, скорость электроосмоса вдоль поры изменяются, тем самым вызывая нормальные к стенке поры потоки жидкости, предотвращающие адгезию бактерий.

Отметим, что анализ изменения рН в поре достаточно сложный. Поскольку вдали от стенок поры скорость гидродинамического потока значительно больше скорости электроосмоса, величина рН по центру поры должна сохранять значение рН вводимого раствора. Поэтому изменение рН происходит только в прилегающих к стенке поры областях, что достаточно для изменения локального ζ -потенциала диафрагмы, но, вероятно, недостаточно для заметного влияния на ζ -потенциал бактерии, диаметр которой больше толщины пристеночного слоя с неоднородным течением жидкости. Более того, изменение рН раствора в порах достигает квазистационарного значения через несколько минут после включения поля и остается постоянным в течение всей обработки раствора. В это же время благодаря высокой скорости гидродинамического потока бактерия быстро проходит пору, что является дополнительным аргументом в пользу того, что ζ -потенциал бактерий не успевает отреагировать на изменение рН.

Возможно также возникновение нелинейного электрофореза бактерий, изменяющего скорость их движения через поры. Действительно, энергия диполь-дипольного взаимодействия палочкообразных частиц с характерными для бактерий размерами и используемыми в работе напряженностями поля согласно формулам, приведенным в монографии [20], существенно выше энергии теплового движения частиц. В этом случае формируются цепочечные агрегаты, поляризация которых заметно превышает поляризацию

отдельной бактерии и, следовательно, приводит к возникновению индуцированного заряда и нелинейной составляющей скорости электрофореза, тем самым интенсифицируя массоперенос через диафрагму.

Для подтверждения выводов о целесообразности использования предложенного режима работы установки были выполнены исследования при разных параметрах ведения процесса.

Сравнение результатов, полученных при одинаковых значениях рабочего давления и напряженности электрического поля (0,2 МПа и 25 В/см), т.е. при равных энергозатратах, показало, что производительность фильтрующего элемента увеличивается от 0,43 м³/м²×ч при однонаправленных потоках до 0,71 м³/м²×ч при разнонаправленных гидродинамическом и электроосмотическом потоках (концентрация *E. coli* 10⁶ ед/см³).

При прочих равных условиях производительность установки уменьшается с ростом исходной концентрации *E. coli*, например, при увеличении содержания бактерий от 10⁶ до 10⁷ ед/см³ наблюдается снижение производительности от 0,71 до 0,64 м³/м²×ч (0,2 МПа, 25 В/см, режим II).

Повышение напряженности электрического поля интенсифицирует действие рассмотренных факторов, что сопровождается увеличением производительности фильтрующего элемента при фиксированных значениях рабочего давления и исходной концентрации *E. coli*. Так, напряженностям поля 10, 15 и 25 В/см соответствуют про-

изводительности 0,63, 0,66 и 0,71 м³/м²×ч, полученные при рабочем давлении 0,2 МПа и концентрации *E. coli*, равной 10⁶ ед/см³.

Выводы

Проведенное исследование показало, что при электрофилтрационном обеззараживании воды с использованием заряженной пористой диафрагмы производительность установки может быть существенно увеличена за счет специальной организации процесса обработки при сохранении заданной степени обеззараживания. В частности, при рабочем давлении 0,2 МПа и напряженности электрического поля 25 В/см происходит более чем 1,5-кратное возрастание производительности (исходная концентрация *E. coli* 10⁶ ед/см³). Необходимый результат достигается путем такого размещения электродов, при котором обеспечивается встречное движение гидродинамического потока обрабатываемой воды и электроосмотического течения, возникающего в порах диафрагмы. При этом полученное соотношение будет изменяться при варьировании параметров проведения процесса.

В дальнейшем планируется изучение влияния размера пор диафрагмы и внесения химических добавок в обрабатываемую воду на массоперенос в системе при электрофилтрационном обеззараживании воды.

Список литературы

1. *Two-step chlorination: A new approach to disinfection of a primary sewage effluent* / Y. Li, M. Yang, X. Zhang et al. // *Water Res.* – 2017. – **108**. – P. 339–347.
2. *Wash water disinfection of a full-scale leafy vegetables washing process with hydrogen peroxide and the use of a commercial metal ion mixture to improve disinfection efficiency* / S. Van Haute, I. Tryland, A. Veys, I. Sampers // *Food Control.* – 2015. – **50**. – P. 173–183.
3. *Zou H., Wang L. The disinfection effect of a novel continuous-flow water sterilizing system coupling dual-frequency ultrasound with sodium hypochlorite in pilot scale* // *Ultrason. Sonochem.* – 2017. – **36**. – P. 246–252.
4. *Domestic wastewater disinfection by combined treatment using multi-soil-layering system and sand filters (MSL-SF): A laboratory pilot study* / L. Latrach, N. Ouazzani, T. Masunaga et al. // *Ecol. Eng.* – 2016. – **91**. – P. 294–301.
5. *Statistical approaches to understanding the impact of matrix composition on the disinfection of water by ultrafiltration* / M.C. Cruz, L.C. Romero, M.S. Vicente, V.B. Rajal // *Chem. Eng. J.* – 2017. – **316**. – P. 305–314.
6. *Electrochemical disinfection of simulated ballast water on PbO₂/graphite felt electrode* / S. Chen, W. Hu, J. Hong, S. Sandoe // *Mar. Pollut. Bull.* – 2016. – **105**, № 1. – P. 319–323.
7. *Schaefer C.E., Andaya C., Urtiaga A. Assessment of disinfection and by-product formation during electrochemical treatment of surface water using a Ti/IrO₂ anode* // *Chem. Eng. J.* – 2015. – **264**. – P. 411–416.
8. *Influence of ultrasound enhancement on chlorine dioxide consumption and disinfection by-products formation for secondary effluents disinfection* / X. Zhou, J. Zhao, Z. Li et al. // *Ultrason. Sonochem.* – 2016. – **28**. – P. 376–381.
9. *Савлук О.С. Интенсификация антимикробного действия дезинфектантов в электрическом поле* // *Науч. тр. Всесоюз. совещания "Гигиенические вопросы опреснения воды"*. – М., 1981. – С. 33–35.
10. *Simonis J.J., Basson A.K. Manufacturing a low-cost ceramic water filter and filter system for the elimination of common pathogenic bacteria* // *Phys. Chem. Earth.* – 2012. – **50-52**. – P. 269–276.

11. Баштан С.Ю., Гончарук В.В., Чеботарева Р.Д. Влияние качества хлорида натрия на параметры процесса электрохимического синтеза гипохлорита натрия // Химия и технология воды. – 2001. – 23, № 4. – С. 364–370.
12. Гончарук В.В., Баштан С.Ю., Чеботарева Р.Д. Электрохимическое обеззараживание морской воды в плавательном бассейне // Химия и технология воды. – 2003. – 25, № 4. – С. 334–341.
13. Kubitschek H.E. Cell volume increase in *Escherichia coli* after shifts to richer media // J. Bacteriol. – 1990. – 172, № 1. – P. 94–101.
14. Спосіб знезараження води: Пат. 74083 Україна, С2, 7 C02F1/00, B01D61/14 / В.В. Гончарук, Л.Л. Лисенко, Т.Ю. Дульнева та ін. – Опубл. 17.10.2005, Бюл. № 10.
15. Kosmulski M. pH-dependent surface charging and points of zero charge. IV. Update and new approach // J. Colloid Interface Sci. – 2009. – 337, № 2. – P. 439–448.
16. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М., Л.: Гостехиздат, 1950. – 676 с.
17. Non-stationary electro-osmotic flow in closed cylindrical capillaries. Theory and experiment / N.A. Mishchuk, A.V. Delgado, S. Ahualli, F. Gonzalez-Caballero // J. Colloid Interface Sci. – 2007. – 309. – P. 308–314.
18. Духин С.С. Электропроводность и электрокинетические свойства дисперсных систем. – К.: Наук. думка, 1975. – 246 с.
19. Гриценко В.А., Журлов О.С., Андрейчев В.В. Анализ взаимосвязи серорезистентности и физико-химических свойств кишечной палочки со способностью к биопленкообразованию // Вестник ОГУ. – 2012. – № 4. – С. 201–205.
20. Духин С.С., Эстрела-Льонис В.Р., Жолковский Э.К. Электроповерхностные явления и электрофильтрация. – К.: Наук. думка, 1985. – 287 с.

References

- [1] Y. Li *et al.*, “Two-step chlorination: A new approach to disinfection of a primary sewage effluent”, *Water Res.*, vol. 108, pp. 339–347, 2017. doi: 10.1016/j.watres.2016.11.019
- [2] S. Van Haute *et al.*, “Wash water disinfection of a full-scale leafy vegetables washing process with hydrogen peroxide and the use of a commercial metal ion mixture to improve disinfection efficiency”, *Food Control*, vol. 50, pp. 173–183, 2015. doi: 10.1016/j.foodcont.2014.08.028
- [3] H. Zou and L. Wang, “The disinfection effect of a novel continuous-flow water sterilizing system coupling dual-frequency ultrasound with sodium hypochlorite in pilot scale”, *Ultrason. Sonochem.*, vol. 36, pp. 246–252, 2017. doi: 10.1016/j.ultsonch.2016.11.041
- [4] L. Latrach *et al.*, “Domestic wastewater disinfection by combined treatment using multi-soil-layering system and sand filters (MSL–SF): A laboratory pilot study”, *Ecol. Eng.*, vol. 91, pp. 294–301, 2016. doi: 10.1016/j.ecoleng.2016.02.036
- [5] M.C. Cruz *et al.*, “Statistical approaches to understanding the impact of matrix composition on the disinfection of water by ultrafiltration”, *Chem. Eng. J.*, vol. 316, pp. 305–314, 2017. doi: 10.1016/j.cej.2017.01.081
- [6] S. Chen *et al.*, “Electrochemical disinfection of simulated ballast water on PbO₂/graphite felt electrode”, *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 105, no. 1, pp. 319–323, 2016. doi: 10.1016/j.marpolbul.2016.02.003
- [7] C.E. Schaefer *et al.*, “Assessment of disinfection and by-product formation during electrochemical treatment of surface water using a Ti/IrO₂ anode”, *Chem. Eng. J.*, vol. 264, pp. 411–416, 2015. doi: 10.1016/j.cej.2014.11.082
- [8] X. Zhou *et al.*, “Influence of ultrasound enhancement on chlorine dioxide consumption and disinfection by-products formation for secondary effluents disinfection”, *Ultrason. Sonochem.*, vol. 28, pp. 376–381, 2016. doi: 10.1016/j.ultsonch.2015.08.017
- [9] O.S. Savluk, “Intensification of the antimicrobial effect of disinfectants in the electric field”, in *Nauchnyye Trudy Vsesoyuznogo Soveshchaniya “Gigiyenicheskiye Voprosy Opresneniya Vody”*, Moscow, SU, 1981, pp. 33–35 (in Russian).
- [10] J.J. Simonis and A.K. Basson, “Manufacturing a low-cost ceramic water filter and filter system for the elimination of common pathogenic bacteria”, *Phys. Chem. Earth*, vol. 50–52, pp. 269–276, 2012. doi: 10.1016/j.pce.2012.05.001
- [11] S.Yu. Bashtan *et al.*, “Effect of sodium chloride quality on the parameters of the electrochemical synthesis process of sodium hypochlorite”, *J. Water Chem. Technol.*, vol. 23, no. 4, pp. 364–370, 2001 (in Russian).
- [12] V.V. Goncharuk *et al.*, “Electrochemical disinfection of sea water in a swimming pool”, *J. Water Chem. Technol.*, vol. 25, no. 4, pp. 334–341, 2003 (in Russian).
- [13] H.E. Kubitschek, “Cell volume increase in *Escherichia coli* after shifts to richer media”, *J. Bacteriol.*, vol. 172, no. 1, pp. 94–101, 1990.
- [14] V.V. Goncharuk *et al.*, “Water disinfection method”, UA Patent 74083, Oct. 17, 2005 (in Ukrainian).
- [15] M. Kosmulski, “pH-dependent surface charging and points of zero charge. IV. Update and new approach”, *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 337, no. 2, pp. 439–448, 2009. doi: 10.1016/j.jcis.2009.04.072
- [16] L.G. Loitsyanskii, *Mechanics of Liquids and Gases*. Moscow, SU: Gostekhizdat, 1950 (in Russian).

- [17] N.A. Mishchuk *et al.* "Non-stationary electro-osmotic flow in closed cylindrical capillaries. Theory and experiment", *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 309, pp. 308–314, 2007. doi: 10.1016/j.jcis.2007.02.042
- [18] S.S. Dukhin, *Electrical Conductivity and Electrokinetic Properties of Disperse Systems*. Kyiv, SU: Naukova Dumka, 1975 (in Russian).
- [19] V.A. Gritsenko *et al.*, "An analysis of the correlation between seroresistance and physico-chemical properties of *Escherichia coli* with the ability of forming biofilms", *Vestnik OGU*, vol. 140, no. 4, pp. 201–205, 2012 (in Russian).
- [20] S.S. Dukhin *et al.*, *Electrosurface Phenomena and Electrofiltration*. Kyiv, SU: Naukova Dumka, 1985 (in Russian).

Л.Л. Лисенко, Н.О. Міщук

ВПЛИВ ЕЛЕКТРОКІНЕТИЧНИХ ЯВИЩ НА МАСОПЕРЕНОС ПРИ ЕЛЕКТРОФІЛЬТРАЦІЙНОМУ ЗНЕЗАРАЖЕННІ ВОДИ

Проблематика. Розробка способу підвищення продуктивності установки для електрохімічного знезараження води.

Мета дослідження. Вивчення впливу електрокінетичних явищ на масоперенос у системі із зарядженою пористою діафрагмою, спрямоване на визначення умов, що дадуть змогу збільшити продуктивність процесу електрофільтраційного знезараження води при збереженні параметрів його проведення та забезпеченні необхідного ступеня знезараження.

Методика реалізації. Проведено визначення продуктивності мікропористого фільтрувального елемента за різних способів організації процесу електрофільтрування.

Результати досліджень. Продуктивність мікропористого зарядженого елемента залежить від розміщення катода й анода, що визначає напрямок електроосмосу відносно потоку оброблюваної води. Збільшення напруженості електричного поля при збереженні величини робочого тиску призводить до інтенсифікації процесів, що впливають на продуктивність.

Висновки. Розміщення електродів, за якого забезпечується зустрічний рух гідродинамічного потоку оброблюваної води та електроосмотичної течії, яка виникає в порах зарядженої діафрагми, дає змогу істотно збільшити продуктивність процесу знезараження.

Ключові слова: заряджена пориста діафрагма; електроосмос; електрофорез; ζ -потенціал; бактерії.

Л.Л. Лысенко, Н.А. Мищук

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ НА МАССОПЕРЕНОС ПРИ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРАЦИОННОМ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИИ ВОДЫ

Проблематика. Разработка способа повышения производительности установки для электрохимического обеззараживания воды.

Цель исследования. Изучение влияния электрокинетических явлений на массоперенос в системе с заряженной пористой диафрагмой, направленное на определение условий, позволяющих увеличить производительность процесса электрофильтрационного обеззараживания воды при сохранении параметров его проведения и обеспечении необходимой степени обеззараживания.

Методика реализации. Проведено определение производительности микропористого фильтрующего элемента при различных способах организации процесса электрофильтрования.

Результаты исследований. Производительность микропористого заряженного элемента зависит от расположения катода и анода, определяющего направление электроосмоса по отношению к потоку обрабатываемой воды. Увеличение напряженности электрического поля при сохранении величины рабочего давления приводит к интенсификации процессов, влияющих на производительность.

Выводы. Размещение электродов, при котором обеспечивается встречное движение гидродинамического потока обрабатываемой воды и электроосмотического течения, возникающего в порах заряженной диафрагмы, позволяет существенно увеличить производительность процесса обеззараживания.

Ключевые слова: заряженная пористая диафрагма; электроосмос; электрофорез; ζ -потенциал; бактерии.

Рекомендована Радою
хіміко-технологічного факультету
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
30 березня 2017 року