

ISSN 1561-8358 (Print)  
 ISSN 2524-244X (Online)  
 УДК 628.165  
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-4-444-454>

Поступила в редакцию 30.11.2017  
 Received 30.11.2017

**А. С. Жданок<sup>1</sup>, А. Г. Червяк<sup>1</sup>, С. В. Шушков<sup>2</sup>, Заид С. Альотаби<sup>3</sup>, Ясин Г. Альхарби<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>ООО «Перспективные исследования и технологии», Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,  
 Минск, Беларусь

<sup>3</sup>Национальный центр технологий солнечной энергии,  
 Научно-технологический центр им. Короля Абдулазиза, Эр-Рияд, Королевство Саудовская Аравия

## МЕТОД СОКРАЩЕНИЯ ВРЕМЕНИ ДЕСАЛИНИЗАЦИИ В ПРОТОЧНОМ CDI-ОПРЕСНИТЕЛЕ

**Аннотация.** Исследована работа CDI-опреснителя соленой воды, основанного на принципе объемной деионизации за счет создания двойного электрического слоя на пористой структуре электрода. Изучена возможность увеличения эффективности опреснения за счет сокращения времени разрядных диффузионных процессов в высокопористых электродах. В экспериментах использовался опреснитель типа «flow-through electrodes», прокачка раствора в котором осуществляется сквозь пористые электроды, отделенные друг от друга водонепроницаемым сепаратором, без использования ионообменных мембран. Проведен анализ возможных размеров пор для различных сорбирующих материалов и выполнены оценки длительности соответствующих импульсов управляющего напряжения. Предварительные эксперименты, проведенные на модельной CDI-ячейке, позволили оптимизировать выбор электрофизических параметров для электродов из углеродного войлока типа «Карбопон-Актив» и ткани «АУТ-М-2» производства ОАО «СветлогорскХимволокно». Предложен метод сокращения времени разрядного цикла за счет подачи серии импульсов напряжения обратной полярности на электроды опреснителя. При согласовании характеристик пористости электродного материала и продолжительности импульсов можно добиться ускоренного удаления ионов соли за счет повышения напряженности электрического поля в направлении из глубины пор наружу, в межэлектродный зазор. Оцениваемая величина пор составляла ~ 100 мкм, поэтому в относительно протяженном межэлектродном зазоре ~ 1 мм основная масса ионов за время импульса не успевала достичь поверхности электродов. Это позволило поддерживать высокую эффективность процесса CDI-опреснения. Эксперименты на модельной ячейке и полномасштабном CDI-опреснителе продемонстрировали в режиме наложения управляющих импульсов снижение времени разрядного цикла в ~ 2,5 раза по сравнению с режимом короткого замыкания электродов.

**Ключевые слова:** опреснение, солевой раствор, объемная деионизация, опреснитель-суперконденсатор, пористый электрод, сорбция ионов, режим электропитания

**Для цитирования.** Метод сокращения времени десалинизации в проточном CDI-опреснителе / А. С. Жданок [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2018. – Т. 63, № 4. – С. 444–454. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-4-444-454>

**A. S. Zhdanok<sup>1</sup>, A. G. Chervjak<sup>1</sup>, S. V. Shushkov<sup>2</sup>, Zaid S. Alotaibi<sup>3</sup>, Yaseen G. Alharbi<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Advanced Research and Technologies LLC, Minsk, Belarus

<sup>2</sup>A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

<sup>3</sup>National Center for Solar Energy, King Abdulaziz City for Science and Technology (KACST),  
 Er-Riyad, Kingdom of Saudi Arabia

## METHOD FOR REDUCING THE DESALINATION TIME IN A “FLOW-THROUGH” CDI-WATER CLEARANCE EQUIPMENT

**Abstract.** The work of the CDI salt water distiller based on the principle of bulk deionization by creating a double electric layer on the porous structure of the electrode was investigated. The possibility of increasing the efficiency of desalination by reducing the time of discharge diffusion processes in high-porous electrodes is studied. In the experiments, a flow-through type was used, the pumping of the solution in which is carried out through porous electrodes separated from each other by a permeable separator, without the use of ion-exchange membranes. The analysis of possible pore sizes for various sorbing materials is carried out and estimates of the duration of the corresponding pulses of the control voltage are performed. Preliminary experiments carried out on a model CDI cell allowed us to optimize the choice of electrophysical parameters for carbon felt electrodes of the “Carbopon-Active” type and the “AUT-M-2” fabric produced by OJSC “SvetlogorskKhimvolokno”. A method is proposed for reducing the discharge cycle time by supplying a series of pulses of reverse polarity voltage to the electrodes of a desalter. When matching the characteristics of the porosity of the electrode material and the duration of the pulses, it is possible to achieve accelerated removal of salt ions

by increasing the electric field strength from the depth of the pores to the outside, into the interelectrode gap. The estimated pore size was  $\sim 100 \mu\text{m}$ ; therefore, in a relatively long interelectrode gap of  $\sim 1 \text{ mm}$ , the main mass of ions during the pulse does not have time to reach the surface of the electrodes. This made it possible to maintain the high efficiency of the CDI desalination process. Experiments on a model cell and a full-scale CDI-desalter demonstrated a 2.5-fold decrease in the discharge cycle time in the regime of superposition of control pulses in comparison with the short-circuit mode of electrodes.

**Keywords:** desalination, saline solution, volumetric deionization, desalination supercapacitor, porous electrode, ion sorption, power supply mode

**For citation:** Zhdanok A. S., Chervjak A. G., Shushkov S. V., Alotaibi Zaid S., Alharbi Yaseen G. Method for reducing the desalination time in a “flow-through” CDI-water clearance equipment. *Vesti Natsyonal'noi akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-technichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 4, pp. 444–454 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-4-444-454>

**Введение.** В настоящее время ввиду нарастающей нехватки пресной воды актуальным является использование многочисленных источников так называемой солоноватой воды, концентрация солей в которой составляет 10 г/л и менее. Кроме того, опреснение, например, морской воды с концентрацией солей  $\sim 35 \text{ г/л}$  достаточно эффективно производится методами электродиализа или обратного осмоса [1], однако при снижении концентрации соли до величин  $\sim 1 \text{ г/л}$  экономическая эффективность этих методов резко уменьшается. Поэтому для опреснения воды с концентрацией солей менее 10 г/л успешно применяется технология объемной деионизации (Capacitive Deionization, CDI), аналогичная способу разделения зарядов в проточном суперконденсаторе с водным электролитом [1–3]. Высокая сорбирующая способность электродов опреснителя обеспечивается за счет применения пористых материалов, как правило, на основе углерода [4, 5]. В процессе зарядки под действием приложенного напряжения электроды (изготовленные, к примеру, из расширенного графита) сорбируют ионы соли, снижая концентрацию примесей в очищаемой воде. В следующем по времени цикле, при электрическом соединении электродов проводником накоротко (режим короткого замыкания), происходит обратный процесс десорбции ионов соли и удаление их промывочной жидкостью, в качестве которой часто используется исходный раствор.

Для изучения процессов диффузии зарядов в CDI-ячейках и их характеристики применяют различные режимы электропитания [6–8]. Так, эффективно используется рекуперация энергии, выделяемой в цикле разряда опреснителя или суперконденсатора, для ее использования в следующем цикле заряда [9]. Оптимальный выбор схемы питания позволяет понизить величину энергетических потерь в процессе CDI-опреснения [10].

*Цель работы* заключалась в изучении возможности увеличения эффективности опреснения за счет сокращения времени разрядных диффузионных процессов в высокопористых электродах.

**Влияние сорбционных характеристик электродного материала на эффективность CDI-опреснения.** Решение обозначенной задачи представляется перспективным для CDI-опреснителей типа «flow-through electrodes» [3], электроды в котором разделены друг от друга водопроницаемым сепаратором, без применения ионообменных мембран, а прокачка раствора осуществляется сквозь пористые электроды (рис. 1).

С наибольшей полнотой сорбция соли достигается при продолжительном времени зарядки, когда ионы успевают диффундировать в поры материала электродов. Ионы покрывают поверхность электродов, образуя так называемый двойной электрический слой зарядов (electrical double layers, EDLs [3]), который и определяет высокую емкость суперконденсатора. В проточном канале присутствуют ионы разных знаков, за счет чего раствор между электродами близок к квазинейтральному состоянию. На рис. 2 показана идеализированная схема предельного состояния опреснителя-суперконденсатора после зарядки, когда ионы соли одного знака распределяются по поверхности противоположно заряженного электрода. Водопроницаемый сепаратор, изображенный штриховой линией, предохраняет электроды от замыкания.

Параметр  $d$  является важной величиной при расчетах пористых электродов с учетом тонких эффектов [11]. Например, в [2] поры систематизированы по их поперечному размеру как макропоры при  $d > 50 \text{ нм}$ , мезопоры при  $d = 2\text{--}50 \text{ нм}$  и микропоры при  $d < 2 \text{ нм}$ . Однако поскольку поперечный размер микропор  $d$  существенно меньше, чем, например, средняя величина глубины пор  $L$ , то время диффузионного выравнивания  $\tau_d \sim d^2/D$  ( $D$  – коэффициент диффузии ионов соли

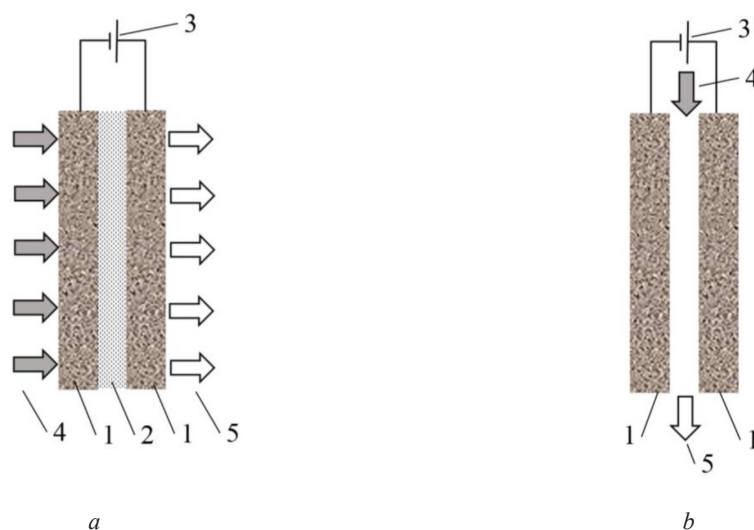


Рис. 1. Принципиальная схема CDI-опреснителей, функционирующих по схеме «flow-through electrodes» (a) и «flow-between electrodes» (b): 1 – емкостной электрод, 2 – пористый сепаратор, 3 – источник питания, 4 – поток соленой воды, 5 – поток опресненной воды

Fig. 1. Schematic diagram of CDI-desalination plants functioning according to the flow-through electrodes (a) and flow-between electrodes (b): 1 – capacitive electrode, 2 – porous separator, 3 – power supply, 4 – flow of salt water, 5 – a stream of desalinated water

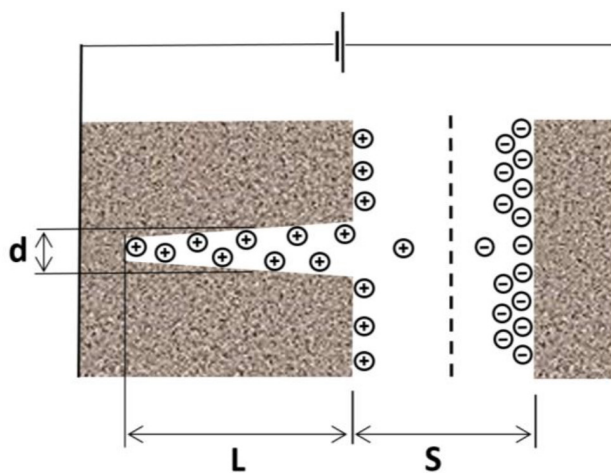


Рис. 2. Влияние пор электродного материала на распределение ионов по сорбирующей поверхности электродов суперконденсатора CDI-опреснителя и в его проточном канале.  $S$  – характерный размер проточного канала,  $d$  – диаметр поры,  $L$  – глубина поры

Fig. 2. Effect of electrode material pores on the ion distribution over the sorbing surface of the electrodes of the CDI desalination super-capacitor and in its flow channel.  $S$  – characteristic size of the flow channel,  $d$  – pore diameter,  $L$  – pore depth

в растворе) оказывается весьма мало и выравнивание концентрации поперек микропор  $d$  можно считать опережающим по сравнению с прочими дрейфовыми процессами в CDI-опреснителе. В то же время, как можно представить из структуры графитовых и прочих углеродных пористых материалов, глубина пор  $L$  и различных межслоевых полостей сравнима с характерным размером электродов и может достигать нескольких миллиметров. Тем самым характерное время  $\tau_L = L^2/D$  удаления ионов соли из пор глубиной  $L$  может оказаться сравнимым со временем перемещения ионов в проточном канале размером  $S$  между электродами:  $\tau_S = S^2/D$ .

В случае наложения электрического поля направленная скорость дрейфа ионов возрастает, однако с учетом сложной геометрии пористых каналов в нашем случае допустимо использовать время  $\tau$  чисто концентрационного выравнивания на основе коэффициента  $D$  как верхнюю оценку по времени, когда основная часть ионов соли окажется удаленной из рассматриваемой зоны.

**Процессы переноса ионов при зарядке CDI-опреснителя.** Зарядка обычно производится при постоянном напряжении, не превышающем  $\sim 1,2$  В во избежание электролиза воды (рис. 3).

Гальваностатический режим заряда CDI-опреснителя постоянным по величине током также может быть использован, однако его применение должно быть согласовано с материалом электродов. Например, в ходе проведения нами исследований при зарядке относительно большим током напряжение на модельной CDI-ячейке быстро достигало критического значения 1,2 В, в то время как диффузия ионов соли в микропоры материала еще продолжалась. При этом величина перенесенного в цикле заряда, пропорциональная площади под токовой кривой, оказывалась меньше, чем в случае зарядки при постоянном напряжении, когда ионы соли успевали заполнить поры материала (рис. 4).



Рис. 3. Схема соединения электродов и направление перетекания ионов соли в проточном канале в процессах зарядки и разряда CDI-опреснителя: *a* – зарядка, *b* – разряд (короткое замыкание)

Fig. 3. Scheme of electrodes connection and direction of salt ions flow in the flow channel in the process of the CDI desalination plant charging and discharging: *a* – charging, *b* – discharging (short circuit)

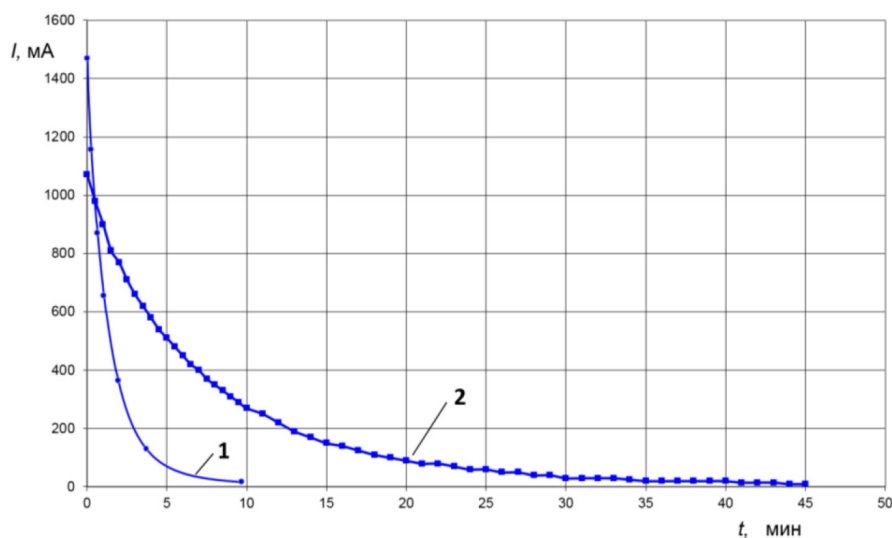


Рис. 4. Разрядные характеристики CDI-ячейки (материал электродов – углейлок «Карбопон-Актив», площадь 1560 см<sup>2</sup>; концентрация соли NaCl в растворе 1 г/л): 1 – после зарядки в гальваностатическом режиме током 2 А, 2 – после зарядки в потенциостатическом режиме при напряжении 1 В

Fig. 4. The discharge characteristics of the CDI-cell (carbon-fiber electrodes “Carbofon-Active”, area 1560 cm<sup>2</sup>; the NaCl concentration in the solution is 1 g/l): 1 – after charging in galvanostatic mode with a current of 2 A, 2 – after charging in potentiostatic mode at a voltage of 1 V

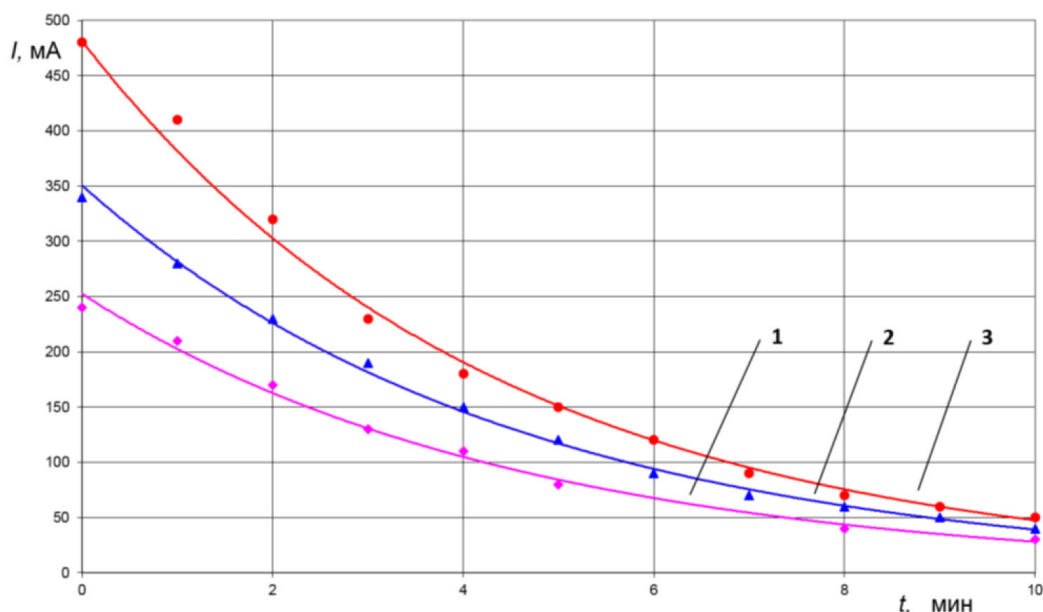


Рис. 5. Зависимость разрядного тока от времени для модельной CDI-ячейки (материал электродов – углеродная ткань «АУТ-М-2» ( $15 \times 15 \text{ см}^2$ ); концентрация соли NaCl – 1 г/л): 1 – ток при циклах зарядки и разряда продолжительностью 10 мин, 2 – при циклах 20 мин, 3 – при циклах 40 мин

Fig. 5. Dependence of the discharge current on time for the model CDI cell (the electrodes are carbon cloth “AUT-M-2” ( $15 \times 15 \text{ cm}^2$ ); the NaCl concentration is 1 g/l): 1 – the current for 10 minutes charge and discharge cycles, 2 – the current with cycles of 20 minutes, 3 – the current with cycles of 40 minutes

**Особенности разрядных процессов на сорбирующих электродах.** Разряд CDI-опреснителя часто производится путем электрического соединения электродов проводником. В растворе при этом противоположно заряженные ионы взаимно притягиваются и дрейфуют друг к другу, и в итоге происходит постепенная релаксация до нейтрального состояния. Количество  $G$  выделенной с электродов соли в одном цикле пропорционально перенесенному заряду  $Q$  и рассчитывается по закону Фарадея:  $G = Q\mu/(eN_A)$ , где  $e$  – заряд электрона,  $N_A$  – число Авогадро,  $\mu$  – молекулярный вес соли. Поэтому чем большим по времени в экспериментах на модельной ячейке нами выбирался период зарядки и разряда, тем большей оказывалась величина перенесенного заряда, пропорциональная площади под токовой кривой, и полнее происходила очистка CDI-электродов (рис. 5).

Физически продолжительный период разряда для целей максимально полного удаления соли связан со значительным временем диффузии ионов из глубины  $L$  пор электродного материала. При слишком длительном разрядном цикле уменьшается величина среднего по времени тока и соответственно снижается производительность опреснителя. Если, напротив, пытаться задавать короткие периоды «зарядка–разряд», то средняя величина переносимого заряда также окажется незначительной, поскольку наложение на электроды обратного по знаку напряжения приводит к началу перезарядки еще не успевшего полностью разрядиться конденсатора, что эквивалентно снижению эффективной емкости (см. рис. 5). При коротких циклах ионы соли совершают возвратно-поступательные перемещения внутри пор  $L$ , не успевая выйти наружу, что используется в суперконденсаторе как накопителе энергии, но не подходит для CDI-опреснителя.

**Оптимизация разрядных процессов по времени.** Ускорить процесс диффузии ионов из пор материала возможно, если приложить к электродам на короткое время вместо замыкания обратное напряжение (рис. 6, а). При этом скорость дрейфа ионов из пор  $L$  увеличивается, поскольку существенно возрастает электрическое поле, перемещающее их к противоположному электроду.

Одновременно в проточном канале  $S$  начинается дрейф ионов к поверхности соответствующих электродов. Однако если отключить импульс обратного напряжения в то время, когда основная масса ионов еще не достигла противоположного электрода, и переключить на замыкание, то в проточном канале снова начинается перемешивание ионов (рис. 6, б). Тем самым основная



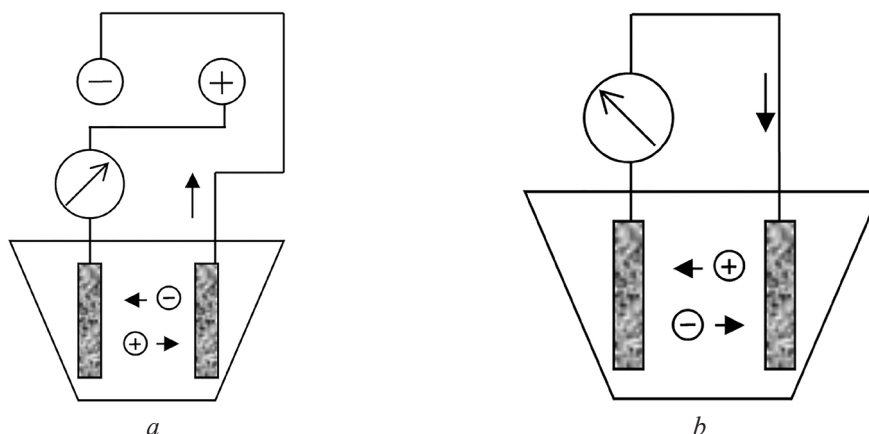


Рис. 6. Схема соединения электродов и перетекания ионов соли в проточном канале в режиме приложения к электродам напряжения обратной полярности: *a* – изменение полярности напряжения на электродах, *b* – замыкание электродов после импульса напряжения обратной полярности

Fig. 6. Scheme of the electrodes connection and salt ions flow in the flow channel when reversal voltage is applied to the electrodes: *a* – voltage polarity reversal on the electrodes, *b* – electrode shorting after voltage impulse of reverse polarity

масса ионов в проточном канале  $S$  будет колебательно перемещаться между электродами, не оседая на их поверхности.

В то же время дрейф ионов из микропор  $L$  будет происходить в одну сторону, к проточному каналу  $S$ , поскольку поры в конце цикла зарядки заполнены преимущественно ионами одного знака. Поэтому в моменты короткого замыкания, в паузах между импульсами приложения обратного напряжения, нескомпенсированный заряд противоположных ионов, находящихся в проточном канале, поддерживает удаление ионов соли из пор электродного материала.

**Взаимозависимость характеристик электродного материала, определяющих эффективность разрядных процессов в CDI-опреснителе.** Длительность  $\tau_1$  импульса обратного напряжения следует выбрать равной величине  $L^2/D$ , которая соответствует характерному времени диффузии ионов на расстояние  $L$  из глубины пор в проточный канал  $S$ . Кроме того, следует соблюсти условие, что длительность импульса обратного напряжения не должна превышать величину  $S^2/D$ , которая отражает время диффузии ионов в проточном канале  $S$  между электродами. В последнем случае в качестве  $\tau_1$  принимается величина  $S^2/D$ . Этим предотвращается вынос основной части ионов на стенки канала, приводящий к преждевременной перезарядке электродов. Одновременно при подаче импульса обратной полярности ограничивается скачок напряжения на электродах до величины, меньшей начала электролиза воды.

Очевидно, что для каждого вида электродного материала соответственно его параметрам  $S$  и  $L$  требуется подбирать конкретные продолжительность периода приложения обратного напряжения и скважность этих импульсов, что требует теоретических расчетов или экспериментального тестирования.

Например, промежуток  $S$  между электродами в проточной системе типа «flow-through electrodes» определяется толщиной сепаратора и в случае изготовления последнего из ткани на основе полимерных волокон может составлять величину 0,1–0,5 мм. Коэффициент диффузии для соли NaCl при концентрации  $\sim 1$  г/л и при комнатной температуре составляет величину  $D \sim 1,1 \cdot 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с. Поэтому продолжительность паузы между импульсами должна составлять величину не менее  $\tau_2 = (S^2/D) \sim 100$  с.

Глубина пор  $L$  изменяется в широких пределах для любого сорбирующего материала. Можно ввести понятие среднего размера пор и соотнести с ним характеристики электрической емкости электродов, как, например, в [5]. В нашем случае величина  $L$  оценивалась из измерений времени разряда образцовой CDI-ячейки с относительно тонкими ( $< 1$  мм) электродами из конкретного материала.

Для электродов на основе активированного угля средний размер глубины пор  $L$  может достигать 1 мм и более за счет возможного соединения отдельных пор между собой в процессе

активации. Тогда оценка продолжительности импульсов обратного напряжения дает значение  $(L^2/D) \sim 1000$  с и длительность импульсов обратного напряжения следует выбрать  $\tau_1 = (S^2/D) = 100$  с.

Для значительного класса углеродных материалов, в том числе углеродного войлока, средний размер глубины пор  $L$  может достигать 100 мкм. Поэтому для подобных углеродных материалов продолжительность импульсов обратного напряжения оптимально выбирать равной  $\tau_1 = (L^2/D) \sim 10$  с. Продолжительность паузы между импульсами желательно выдерживать также не менее  $\tau_2 = (S^2/D) \sim 100$  с.

Для перспективных электродных материалов, в которых, например, используют прививку химических компонент типа  $\text{COO}^-$  внутри сорбирующих каналов [12], необходимо учитывать изменение коэффициентов диффузии и вводить соответствующую временную поправку при выборе длительности импульсов.

В проточной системе «flow-between electrodes» размер канала  $S$  между электродами значительный и может быть выбран равным около 1 мм и более. В этом случае паузу между импульсами для полной релаксации зарядов в канале  $S$  оптимально выбирать равной нескольким минутам, поскольку  $\tau_2 = (S^2/D) \sim 10^3$  с.

**Проведение экспериментов на модели CDI-опреснителя.** Нами в экспериментах в качестве материала электродов использовались углеродная ткань «АУТ-М-2» или войлок «Карбопон-Актив» производства ОАО «СветлогорскХимволокно».

Для маломасштабной модели CDI-опреснителя в режиме замыкания электродов время разрядки, установленное по критерию снижения величины тока на порядок, составляло около 1 ч (рис. 7).

В сравнительном испытании наложение обратного напряжения производилось относительно короткими периодами по 2–5 мин, при этом ток снижался до несущественной для работы CDI-ячейки величины (несколько мА) за время около 12 мин (рис. 7).

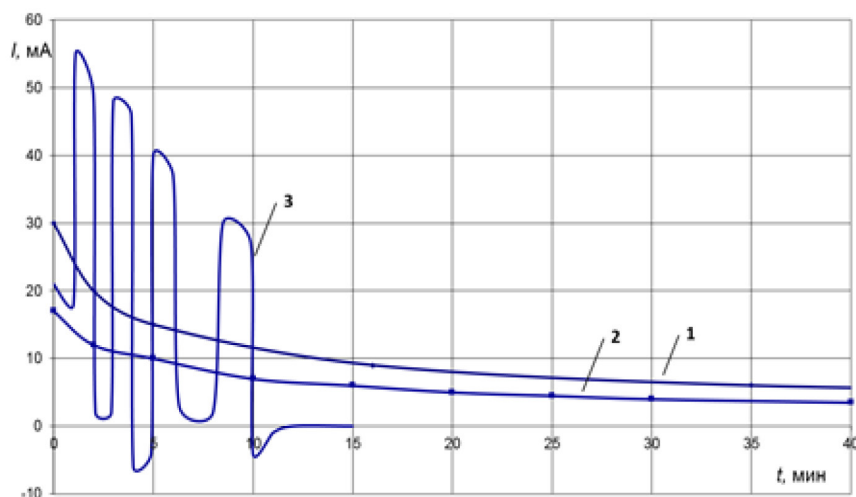


Рис. 7. Характерные зависимости тока через CDI-ячейку от времени в процессе зарядки (1), разрядки (2) и в режиме наложения импульсов обратного напряжения на электродах (3). Материал электродов – углеродная ткань «АУТ-М-2» ( $15 \times 15$  см<sup>2</sup>); концентрация соли NaCl – 1 г/л

Fig. 7. Characteristic dependences of current through CDI-cell on time in the process of charging (1), discharging (2) and in the mode of voltage polarity reversal on the electrodes (3). The electrodes are carbon cloth “АУТ-М-2” ( $15 \times 15$  cm<sup>2</sup>); the concentration of NaCl salt is 1 g/l

Как видно, возможно состояние CDI-ячейки, когда во внешней цепи ток в процессе разряда начинает течь в обратную сторону (рис. 7, период 4–5 мин). Это соответствует рассмотренной схеме по рис. 6, *b* в случае, если происходит оседание на электроды значительной части ионов из проточного канала, что приводит к началу преждевременной перезарядки емкости суперконденсатора.

Важным моментом является тот факт, что после достижения нулевого значения тока не наблюдается релаксации достигнутого состояния и ток через CDI-ячейку практически прекращается. Это свидетельствует о завершении основных процессов переноса зарядов, диффузии и релаксации ионов в проточном канале и в материале пористых электродов.

**Эксперименты на полномасштабном опреснителе.** Для проверки эффективности режима наложения импульсов обратного напряжения при масштабировании нами были проведены эксперименты на CDI-установке для опреснения воды с производительностью 100 л/ч (рис. 8).



Рис. 8. CDI-опреснитель производительностью 100 л/ч

Fig. 8. CDI-desalination plant with a capacity of 100 l/h

Зарегистрированная в ходе эксперимента зависимость величины тока от времени представлена на совместном графике (рис. 9). В начале испытания были проведены зарядка при напряжении 1,4 В (период времени 45–75 мин) и разряд в режиме замыкания (80–120 мин). При этом напряжение внутри ячейки не превышало 1,2 В за счет падения потенциала на токовых проводниках. Далее записан цикл аналогичной потенциостатической зарядки (125–160 мин) и разряда с наложением импульсов обратного напряжения (165–180 мин).

Как можно видеть на рис. 10, после зарядки в потенциостатическом режиме при приложенном к электродам CDI-ячейки напряжении 1,4 В цикл разряда со снижением величины тока до нескольких ампер в режиме замыкания занимает около 40 мин.

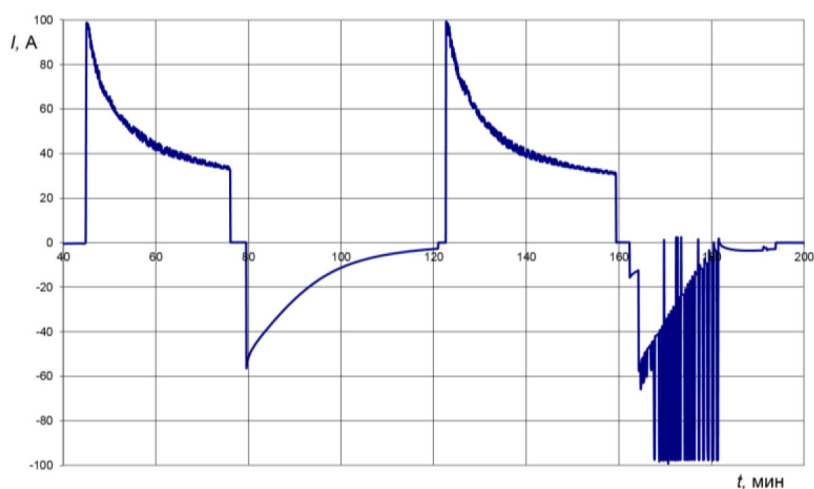


Рис. 9. Зависимость величины тока через CDI-опреснитель в циклах зарядки и разряда. Разряд проведен коротким замыканием электродов (период 80–120 мин) и путем наложения импульсов обратного напряжения (период 165–180 мин)

Fig. 9. Dependence of current through CDI-desalination plant in charging and discharging cycles. Discharging by the electrodes short-circuiting (80–120 min) and by superimposing of voltage reversal pulses (165–180 min)



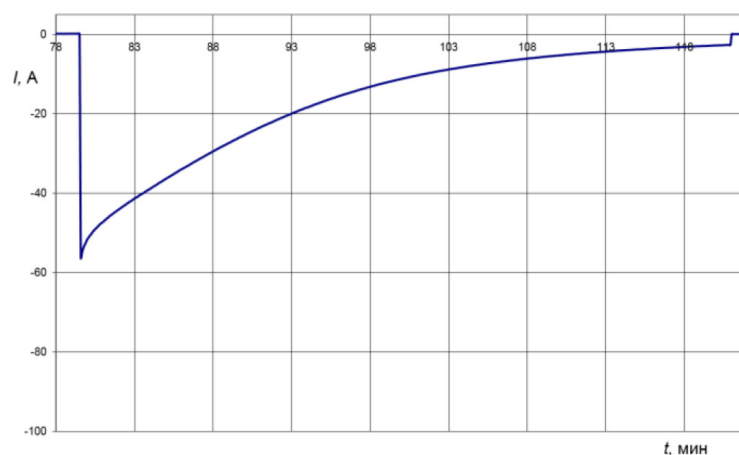


Рис. 10. Зависимость тока разряда CDI-опреснителя от времени в режиме короткого замыкания  
 Fig. 10. Dependence on time for the discharge current of a CDI-desalination plant in the short-circuit mode

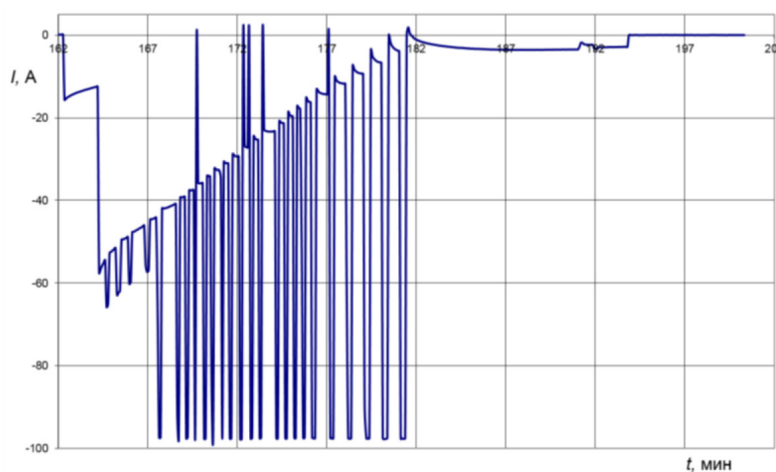


Рис. 11. Зависимость тока разряда CDI-опреснителя от времени при наложении импульсов обратного напряжения  
 Fig. 11. Dependence on time for the discharge current of a CDI-desalination plant upon imposing voltage reversal pulses on the electrodes

При этом в цикле зарядки концентрация соли NaCl уменьшилась, например, в опресняемой воде с 0,81 до 0,66 г/кг, или на 18,5 %. В цикле разряда количество соли, десорбированной из электродов в промывочный раствор исходной концентрации, составило также ~ 18 %.

При периодической подаче на электроды импульсов напряжения обратной полярности амплитудой (-)1,4 В, длительностью 10–30 с, со скважностью 10–20 время цикла удается сократить в ~ 2,5 раза, до 15 мин (рис. 11). Амплитуда бросков тока при этом аппаратно ограничивалась источником питания на уровне около (-)100 А.

После цикла разряда, поддерживаемого импульсами напряжения обратной полярности, выделение соли составило 17,5 %. Тем самым количество сорбированной и десорбированной соли при одинаковых условиях зарядки и оптимальном выборе режима импульсов обратного напряжения оказывается практически одинаковым с режимом КЗ-разряда.

Как можно видеть, продолжительность импульсов обратного напряжения в экспериментах на CDI-ячейке (см. рис. 7) и опреснителе (см. рис. 11) была выбрана несколько превышающей оптимальную длительность ~ 10 с, полученную из теоретических оценок. Вследствие этого на приведенных зависимостях тока от времени при приближении сигнала к нулевому значению наблюдаются выбросы тока, противоположного разрядке направления, что соответствует неоптимальной по времени перезарядке электродов.

При наложении обратного напряжения на имеющееся в проточном канале поле величина суммарной разницы потенциалов может превысить уровень начала электролиза. Однако ввиду относительно короткой длительности прикладываемого импульса напряжения величина поля в наиболее напряженных приэлектродных зонах остается в среднем на уровне, определяемом образованием двойного электрического слоя. В условиях наших экспериментов при относительно коротких импульсах обратного напряжения газообразования отмечено не было.

**Заключение.** За счет режима приложения импульсов обратного напряжения удастся осуществить разряд CDI-опреснителя за время в  $\sim 2,5$  раза меньшее по сравнению с режимом короткого замыкания, что существенно повышает общую производительность установки.

Эффект достигается за счет результативного удаления ионов соли из микропор электродного материала под действием повышенного электрического поля. После того как разрядный ток в описанном режиме достигает нулевого значения, во внешней цепи CDI-ячейки более не наблюдается его существенного изменения, что свидетельствует о завершении основных процессов диффузии и релаксации ионов в проточном канале опреснителя и внутри пористых электродов.

### Список использованных источников

1. Уразаев, В. Обзор методов очистки воды / В. Уразаев // Технологии в электрон. пром-сти. – 2007. – № 2. – С. 72–79.
2. Review on the science and technology of water desalination by capacitive deionization / S. Porada [et al.] // *Progress Mater. Sci.* – 2013. – Vol. 58, Iss. 8. – P. 1388–1442. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.03.005>
3. Water desalination *via* capacitive deionization: what is it and what can we expect from it? / M. E. Suss [et al.] // *Energy Environ. Sci.* – 2015. – Vol. 8, Iss. 8. – P. 2296–2319. <http://dx.doi.org/10.1039/C5EE00519A>
4. Елецкий, А. В. Наноглеродные материалы: физико-химические и эксплуатационные свойства, методы синтеза, энергетические применения / А. В. Елецкий, В. Ю. Цицерман, Г. А. Кобзев // *Теплофизика высоких температур.* – 2015. – Т. 53, № 1. – С. 117–140.
5. Nanostructured carbon for energy storage and conversion / S. L. Candelariaa [et al.] // *Nano Energy.* – 2012. – Vol. 1, Iss. 2. – P. 195–220. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2011.11.006>
6. Resistance identification and rational process design in Capacitive Deionization / J. E. Dykstra [et al.] // *Water Research.* – 2016. – Vol. 88. – P. 358–370. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.10.006>
7. Characterization of Resistances of a Capacitive Deionization System / Yatian Qu [et al.] // *Environ. Sci. Technol.* – 2015. – Vol. 49, Iss. 16. – P. 9699–9706. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b02542>
8. Бисхейвель, П. М. Электрохимия и емкостное заряджение пористых электродов в асимметричных многокомпонентных электролитах / П. М. Бисхейвель, Й. Фу, М. З. Базант // *Электрохимия.* – 2012. – Т. 48, № 6. – С. 645–658.
9. Optimum Peak Current Hysteresis Control for Energy Recovering Converter in CDI Desalination / A. M. Pernia [et al.] // *Energies.* – 2014. – Vol. 7, Iss. 6. – P. 3823–3839.
10. Energy breakdown in capacitive deionization / Ali Hemmatifar [et al.] // *Water Research.* – 2016. – Vol. 104. – P. 303–311. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.08.020>
11. Anomalous Increase in Carbon Capacitance at Pore Sizes Less than 1 Nanometer / J. Chmiola [et al.] // *Science.* – 2006. – Vol. 313, Iss. 5794. – P. 1760–1763. <https://doi.org/10.1126/science.1132195>
12. Complementary surface charge for enhanced capacitive deionization / X. Gao [et al.] // *Water Research.* – 2016. – Vol. 92. – P. 275–282. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.01.048>

### References

1. Urazaev V. Review of water purification methods. *Tekhnologii v elektronnoi promyshlennosti = Technologies in Electronics Industry*, 2007, no. 2, pp. 72–79 (in Russian).
2. Porada S., Zhao R., Wal A. van der, Presser V., Biesheuvel P. M. Review on the science and technology of water desalination by capacitive deionization. *Progress in Materials Science*, 2013, vol. 58, iss. 8, pp. 1388–1442. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.03.005>
3. Suss M. E., Porada S., Sun X., Biesheuvel P. M., Yoon J., Presser V. Water desalination *via* capacitive deionization: what is it and what can we expect from it? *Energy & Environmental Science*, 2015, vol. 8, iss. 8, pp. 2296–2319. <http://dx.doi.org/10.1039/C5EE00519A>
4. Eletskaia A. V., Zitserman V. Y., Kobzev G. A. Nanocarbon materials: Physical-chemical and performance properties, synthesis methods, and energy applications. *High Temperature*, 2015, vol. 53, no. 1, pp. 130–150. <https://doi.org/10.1134/S0018151X15010034>
5. Candelaria S. L., Yuyan Shaob, Zhouc Wei, Lib Xiaolin, Xiao Jie, Zhangb Ji-Guang, Wang Yong, Li Jun, Lic Jinghong, Cao Guozhong. Nanostructured carbon for energy storage and conversion. *Nano Energy*, 2012, vol. 1, iss. 2, pp. 195–220. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2011.11.006>

6. Dykstra J. E., Zhao R., Biesheuvel P. M., Wal A. van der. Resistance identification and rational process design in Capacitive Deionization. *Water Research*, 2016, vol. 88, pp. 358–370. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.10.006>

7. Qu Yatian, Baumann T. F., Santiago J. G., Stadermann M. Characterization of Resistances of a Capacitive Deionization System. *Environmental Science & Technology*, 2015, vol. 49, iss. 16, pp. 9699–9706. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b02542>

8. Biesheuvel P. M., Fu Y., Bazant M. Z. Electrochemistry and capacitive charging of porous electrodes in asymmetric multicomponent electrolytes. *Russian Journal of Electrochemistry*, 2012, vol. 48, iss. 6, pp. 580–592. <https://doi.org/10.1134/S1023193512060031>

9. Pernía A. M., Álvarez-González F. J., Díaz J., Villegas P. J., Nuño F. Optimum Peak Current Hysteresis Control for Energy Recovering Converter in CDI Desalination. *Energies*, 2014, vol. 7, pp. 3823–3839. <https://doi.org/10.3390/en7063823>

10. Ali Hemmatifar, Palko J. W., Stadermann M., Santiago J. G. Energy breakdown in capacitive deionization. *Water Research*, 2016, vol. 104, pp. 303–311. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.08.020>

11. Chmiola J., Yushin G., Gogotsi Y., Portet C., Taberna P. L., Simon P. Anomalous Increase in Carbon Capacitance at Pore Sizes Less than 1 Nanometer. *Science*, 2006, vol. 313, iss. 5794, pp. 1760–1763. <https://doi.org/10.1126/science.1132195>

12. Gao X., Porada S., Omosibi A., Liu K.-L., Biesheuvel P. M., Landon J. Complementary surface charge for enhanced capacitive deionization. *Water Research*, 2016, vol. 92, pp. 275–282. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.01.048>

### Информация об авторах

*Жданок Артем Сергеевич* – кандидат физико-математических наук, ведущий инженер, заведующий лабораторией применения углеродных материалов, ООО «Перспективные исследования и технологии» (ул. Толбухина, 2а, а/я 166, 220012, Минск, Республика Беларусь).

*Червяк Алексей Геннадьевич* – научный сотрудник, ООО «Перспективные исследования и технологии» (ул. Толбухина, 2а, а/я 166, 220012, Минск, Республика Беларусь).

*Шушков Сергей Васильевич* – научный сотрудник, Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [chouch@itmo.by](mailto:chouch@itmo.by)

*Зайд Саад Альотаиби* – доктор философии, директор Национального центра технологий солнечной энергии, Научно-технологический центр им. Короля Абдулазиза (а/я 6086, 11442, Эр-Рияд, Королевство Саудовская Аравия).

*Ясин Гханиман Альхарби* – дипломированный инженер, ведущий менеджер научных проектов, Национальный центр технологий солнечной энергии, Научно-технологический центр им. Короля Абдулазиза (а/я 6086, 11442, Эр-Рияд, Королевство Саудовская Аравия).

### Information about the authors

*Artem S. Zhdanok* – Ph. D. (Physics and Mathematics), Leading Engineer, Head of the Laboratory of carbon materials application, “Advanced Research and Technology” LLC (P. O. box 166, 2a, Tolbukhin Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus).

*Aleksei G. Chervjak* – Researcher, “Advanced Research and Technology” LLC (P. O. box 166, 2a, Tolbukhin Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus).

*Sergey V. Shushkov* – Researcher, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Science of Belarus (15, Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [chouch@itmo.by](mailto:chouch@itmo.by)

*Zaid S. Alotaibi* – Ph. D. (Electrical Engineering), Director of the National Center for Solar Energy Technology, King Abdulaziz City for Science and Technology (KACST) (P. O. box 6086, 11442, Er-Riyad, Kingdom of Saudi Arabia).

*Yaseen G. Alharbi* – M. Sc. Degree in mechanical engineering, General Manager of research grants, National Center for Solar Energy Technology, King Abdulaziz City for Science and Technology (KACST) (P. O. box 6086, 11442, Er-Riyad, Kingdom of Saudi Arabia).