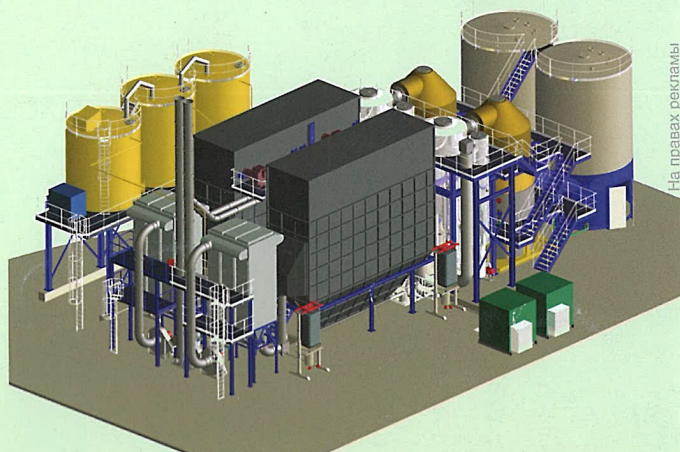




### Установки для сжигания осадка сточных вод

#### Печи TERMIPAK®

- Компактные печи для небольших станций очистки сточных вод
- **Объем сжигаемого осадка: от 2000 до 6000 тонн в год**
- Низкие инвестиционные и эксплуатационные расходы



На правах рекламы

«ВэйстТэк-2017» –  
стенд E3.1

#### Печи SUN SAND®

- Печи для средних и больших станций очистки сточных вод
- **Объем сжигаемого осадка: от 6000 до 80 000 тонн в год**
- Требуется проектирование и установка здания

#### Преимущества печей FMI:

- Позволяют перерабатывать осадок **без предварительной сушки** непосредственно на месте его складирования и хранения
- **Низкий уровень выбросов** в атмосферу
- Не загрязняют окружающую среду и могут размещаться вблизи жилых районов
- Автоматический контроль и управление всеми технологическими процессами
- Возможная остановка и быстрый последующий запуск (концепция «stop & start»)
- Простота монтажа



2017  
ГОД ЭКОЛОГИИ  
В РОССИИ

УДК 628.166.094.3

## Производственные испытания обеззараживания питьевой воды прямым электролизом

Л. Н. ФЕСЕНКО<sup>1</sup>, А. Ю. СКРЯБИН<sup>2</sup>, С. А. БРЕУС<sup>3</sup>, И. В. ПЧЕЛЬНИКОВ<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Фесенко Лев Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Водное хозяйство, инженерные сети и защита окружающей среды», Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова 346428, Россия, Ростовская область, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132, тел.: (8635) 25-53-34, e-mail: 65613@mail.ru

<sup>2</sup> Скрябин Александр Юрьевич, кандидат технических наук, доцент, первый заместитель главы администрации г. Ростова-на-Дону 344002, Россия, г. Ростов-на-Дону, Б. Садовая ул., 47, офис 424, тел.: (8632) 244-12-22, e-mail: media@rostov-gorod.ru

<sup>3</sup> Бреус Сергей Александрович, заместитель генерального директора по производству, ГУП Ростовской области «Управление развития систем водоснабжения» 344019, Россия, г. Ростов-на-Дону, ул. М. Горького, 295, тел.: (8632) 01-74-60, e-mail: breus\_s\_a@mail.ru

<sup>4</sup> Пчельников Игорь Викторович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Водное хозяйство, инженерные сети и защита окружающей среды», Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова 346428, Россия, Ростовская область, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132, тел.: (8635) 25-53-34, e-mail: pchelnikov.igor@mail.ru

Приведены результаты исследования прямого электролиза природной подземной воды с целью установления возможности получения из нее низкоконцентрированного гипохлорита натрия для обеззараживания питьевой воды перед подачей жителям станицы Грушевской Аксайского района Ростовской области. Использование в качестве электролита природных поверхностных или подземных вод позволяет отказаться от этапа искусственного приготовления хлоридного раствора, что упростит технологию получения дезинфектанта на месте его потребления и снизит эксплуатационные затраты. Исследования проводили на промышленной установке по двум направлениям: определение оптимальных электрохимических параметров работы проточного электролизера; определение срока службы электродов. Результаты производственных испытаний показали возможность обеззараживания природной хлоридсодержащей

воды (концентрация хлоридов 200–233 мг/дм<sup>3</sup>) путем ее прямого электролиза. Установлены технологические параметры работы электролизера на подземной пресной воде: плотность тока; скорость подачи воды в электролизер (расход); время работы электрода в режиме анода и в режиме катода. Определен оптимальный состав покрытия электродов: в оксидно-иридий-рутениево-титановом аноде массовое соотношение Ru и Ir составляет 20:80. Использование иридия в покрытии влияет на образование активного хлора и на срок службы электродов. Наличие в оксидном слое рутения в массовом соотношении с иридием 20:80 увеличивает время эксплуатации анода в 10 раз (до 4000 часов) по сравнению с анодами без добавления иридия.

**Ключевые слова:** водоподготовка, питьевая вода, прямой электролиз, электролизер, низкоконцентрированный гипохлорит натрия, обеззараживание.

Метод электрохимического получения раствора гипохлорита натрия, известный с конца XIX века, хорошо изучен и в силу ряда преимуществ по-прежнему востребован. Широкое практическое применение этого метода связано с улучшением эколого-экономических показателей технологического процесса, который постоянно совершенствуется и модернизируется.

Низкоконцентрированный гипохлорит натрия, применяемый для обеззараживания питье-

вых и сточных вод, может быть получен электролизом искусственно приготовленных растворов поваренной соли или прямым электролизом природных минеральных хлоридных вод в бездиафрагменных электролизерах [1–3]. В случае применения искусственного электролита основные затраты на получение гипохлорита натрия складываются из стоимости электроэнергетики, поваренной соли и воды [1; 3]. Использование в качестве электролита природных поверхностных

или подземных вод позволит отказаться от этапа искусственного приготовления хлоридного раствора, что упростит технологию получения дезинфектанта на месте его потребления и снизит эксплуатационные затраты.

Прямой электролиз природной питьевой воды можно проводить как в стационарных условиях (например, на насосных станциях в небольших поселениях), так и в составе мобильных установок водоподготовки, применяемых в том числе и в период чрезвычайных ситуаций [4].

Установлено [1; 3], что для эффективной работы электролизера при прямом электрохимическом обеззараживании воды необходим не только обоснованный выбор материала покрытия анодов, но и поддержание оптимальных электрофизических параметров протекания процесса (анодная плотность тока, расход электролита), соответствующих конкретному составу воды, а также проведение мероприятий по предотвращению катодных отложений солей жесткости. Так, в работе [3] отмечено, что для получения активного хлора из природных вод концентрация хлоридов в них должна быть не менее 20 мг/дм<sup>3</sup>, при этом электролиз желательно проводить с возможно меньшим значением плотности тока (20–100 А/м<sup>2</sup>).

Наиболее простым способом предотвращения отложений солей жесткости во время прямого электролиза является увеличение скорости протекания воды в электролизере (0,1–0,3 м/с) в сочетании с периодическим переключением режима работы электрода с анодной поляризации «+» на катодную «-» и обратно (реверс).

Поскольку рекомендаций по назначению оптимальных технологических параметров прямого электролиза обеззараживаемой питьевой воды в литературе нет, были проведены лабораторные исследования прямого электролиза донской воды с концентрацией хлоридов 100–130 мг/дм<sup>3</sup>. Определен оптимальный режим работы электролизера со следующими параметрами: плотность тока до 100 А/м<sup>2</sup>; скорость протока воды в электролизере 0,2–0,3 м/с; время работы электрода в режиме анода  $\tau^+$  300 с, в режиме катода  $\tau^-$  1 ч. Рекомендован состав коррозионно-стойкого анодного покрытия. Электрод – оксидно-иридий-рутениево-титановый анод (ОИРТА) с массовым соотношением рутения и иридия 20:80 [1; 4].

Обеззараживание природной воды методом ее прямого электролиза (для получения гипохлорита натрия) следует проводить с учетом особенностей химического состава, присущего пресным и слабоминерализованным водам. Концентрация хлоридов в природных водах Ростовской обла-

сти колеблется в широких пределах: от 18,4 до 1258,8 мг/дм<sup>3</sup>. При электролизе таких растворов предъявляются повышенные требования к сроку службы анодного покрытия. Наиболее предпочтительным является ОИРТА, который в 8 раз превосходит оксидно-рутениево-титановый анод по коррозионной стойкости [1].

После предварительных лабораторных исследований испытания были продолжены на промышленной установке производства ООО НПП «ЭКОФЕС» с учетом рекомендаций, изложенных в работе [4]. Установка была смонтирована в насосной станции станицы Грушевской Аксайского района Ростовской области и состояла из проточного электролизера объемом 19,5 дм<sup>3</sup> (габариты 1400x160 мм), блока питания с возможностью автоматической записи напряжения и регулирования силы тока (рис. 1). Покрытие электродов – оксидно-иридий-рутениево-титановое (Ru 20% и Ir 80%) с удельной закладкой драгоценных металлов 7,5 г/м<sup>2</sup>.

Во время работы электролизера расход воды изменялся от 8 до 20 м<sup>3</sup>/ч. Силу тока варьировали от 5 до 20 А с шагом 5 А, что соответствовало плотности тока 25–100 А/м<sup>2</sup>. Концентрация хлоридов в подземной воде составляла 200–230 мг/дм<sup>3</sup>. Температура исходной воды колебалась в пределах 11,7–12,2 °С.

Исследования проводили по двум направлениям: определение оптимальных электрохимических параметров работы проточного электролизера; определение срока службы электродов.



Рис. 1. Производственная электролизная установка 1 – блок питания постоянного тока с возможностью реверса; 2 – проточный электролизер

### Определение оптимальных электрохимических параметров работы проточного электролизера

Влияние расхода воды на процесс электролиза определяли в ходе производственных испытаний, изменяя этот параметр от 8 до 20 м<sup>3</sup>/ч. Было установлено (рис. 2), что при увеличении расхода и, соответственно, уменьшении времени пребывания электролита в электролизере концентрация активного хлора на выходе уменьшается и наоборот. Полученные результаты хорошо согласуются с данными, описанными в работах [1; 2]. Однако концентрация активного хлора, зависящая от расхода, при прочих неизменных параметрах (плотность тока, концентрация хлоридов) не дает представления об эффективности процесса электролиза.

Для качественной оценки прямого электролиза был построен график зависимости количества вырабатываемого хлора от расхода воды, что позволило определить границу эффективности электролиза с точки зрения образующейся массы хлора, которая составила 12–16 м<sup>3</sup>/ч (рис. 2). При этом максимальный выход хлора по току в исследуемом процессе был равен 31,3% и наблюдался при расходе воды 16 м<sup>3</sup>/ч.

Выход хлора по току  $\eta$ , %, рассчитывали по формуле:

$$\eta = Q_r / Q_d \cdot 100,$$

где  $Q_r$  – теоретическое количество электричества, необходимое для проведения электролиза по закону Фарадея, А·ч;  $Q_d$  – действительные затраты электроэнергии, А·ч.

Теоретическое количество электричества определяли из выражения [5]:

$$Q_r = C_{ак} q \tau / k_3,$$

где  $C_{ак}$  – концентрация активного хлора в электролите, г/л;  $q$  – расход электролита, дм<sup>3</sup>/ч;  $\tau$  – продолжительность электролиза, ч;  $k_3$  – электрохимический эквивалент, г/(А·ч), для хлора  $k_3 = 1,32$  г/(А·ч) [5].

Действительные затраты электроэнергии рассчитывали по формуле:

$$Q_d = I \tau,$$

где  $I$  – сила тока, А.

Увеличение расхода в два раза (с 8 до 16 м<sup>3</sup>/ч) повышает выход хлора по току на 11 процентных единиц, или в 1,54 раза по сравнению с его начальным значением (с 20,3 до 31,3%). Дальнейшее увеличение расхода воды приводит к постепенному снижению выхода хлора – на

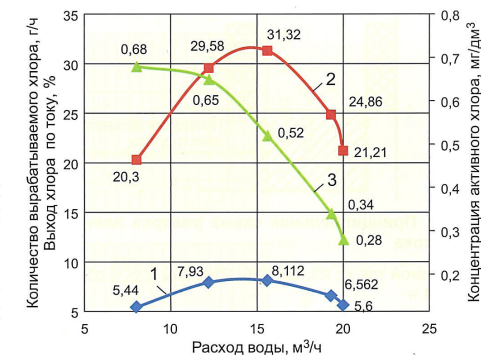


Рис. 2. Зависимость количества вырабатываемого хлора (1), выхода активного хлора по току (2) и концентрации активного хлора (3) от расхода воды (плотность тока 102 А/м<sup>2</sup>)

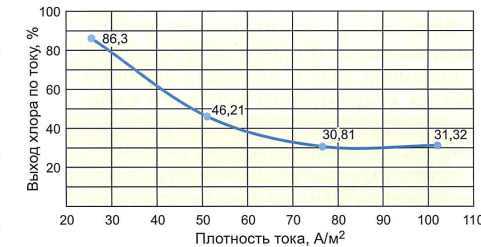


Рис. 3. Зависимость выхода хлора по току от плотности тока

10 процентных единиц при 20 м<sup>3</sup>/ч относительно 16 м<sup>3</sup>/ч.

На рис. 3 представлена зависимость выхода хлора по току от его анодной плотности, полученная при расходе воды через электролизер 16 м<sup>3</sup>/ч. При увеличении плотности тока от 25,5 до 102 А/м<sup>2</sup> выход хлора по току снижается на 63,6%.

Особенность обеззараживания воды прямым электролизом заключается в подаче воды, прошедшей через электролизер, напрямую в сеть потребителю, поэтому концентрация активного хлора в питьевой воде поддерживается в интервале 0,3–0,5 мг/дм<sup>3</sup> (СанПиН 2.1.4.1074-01 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества») при всех режимах работы электролизера (рис. 2).

### Определение срока службы электродов

В экспериментах по определению срока службы электродов изменение времени реверса электрического тока приняли  $\tau^- = 1$  ч,  $\tau^+ = 300$  с при плотности тока 25 А/м<sup>2</sup> (рис. 4). Расход исход-

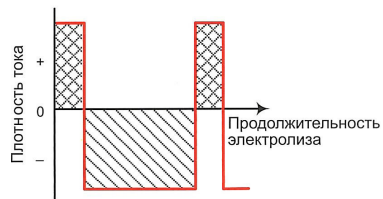


Рис. 4. Принципиальная схема реверса электрического тока

▨ прямой ток  $\tau^+$ : 25; 60; 120; 210; 300 с; ▨ обратный ток  $\tau^-$ : 1 ч

ной воды составил 8–20 м<sup>3</sup>/ч, температура 11,6–13,3 °С. Концентрация хлоридов изменялась от 200 до 233 мг/дм<sup>3</sup>. Продолжительность производственных испытаний составила 4855 ч.

Влияние продолжительности работы электролизера, концентрации хлоридов в подземной воде и плотности анодного тока на концентрацию активного хлора представлено на рис. 5. На графиках выделены четыре характерные зоны (I–IV):

в зоне I концентрация активного хлора составляла в среднем 0,4 мг/дм<sup>3</sup> при плотности тока 25 А/м<sup>2</sup> (рис. 5, а), напряжение на клеммах электролизера (рис. 5, б) – 10,7–11,31 В. После 900 часов работы наблюдалось повышение концентрации хлоридов (рис. 5, в) в подземной воде с 206 до 220 мг/дм<sup>3</sup>, в свою очередь расход (рис. 5, г) исходной воды в момент роста концентрации хлоридов снизился на 28%;

в зоне II при работе электролизера выше 1000 часов фиксировали колебание концентрации остаточного хлора с максимальным значением 1,13 мг/дм<sup>3</sup>, при этом расход подземной воды увеличился до 22 м<sup>3</sup>/ч, что еще раз подтверждает необходимость рассмотрения количества образующегося хлора (рис. 6, а). Количество хлора, вырабатываемого при электролизе на протяжении всего времени испытаний, находилось на уровне 5–6 г/ч;

зона III характеризуется сезонным (осенне-зимний период) повышением концентрации хлоридов (рис. 5, в) и снижением расхода (рис. 5, г) подземной воды. Концентрация активного хлора изменялась от 0,15 до 0,71 мг/дм<sup>3</sup> при плотности тока 30,6 А/м<sup>2</sup>. Кривая напряжения (рис. 5, б) после 4000 часов работы возрастает;

зона IV характеризуется снижением концентрации Cl<sup>-</sup>, что ускоряет рост плотности тока до 76,5 А/м<sup>2</sup> и напряжения до 16,82 В.

С течением времени в процессе электролиза металлооксидный слой электродов постепенно вырабатывался и перемещался с покрытия в электролит. Как следствие, повышалось напряжение, сокращался выход активного хлора (рис. 6, б). Для поддержания необходимых параметров работы электролизера по выходу активного хлора приходилось увеличивать плотность тока. При работе электродов более 4559 часов требуемая концентрация активного хлора достигалась повышением плотности тока с 51 до 102 А/м<sup>2</sup> (рис. 5).

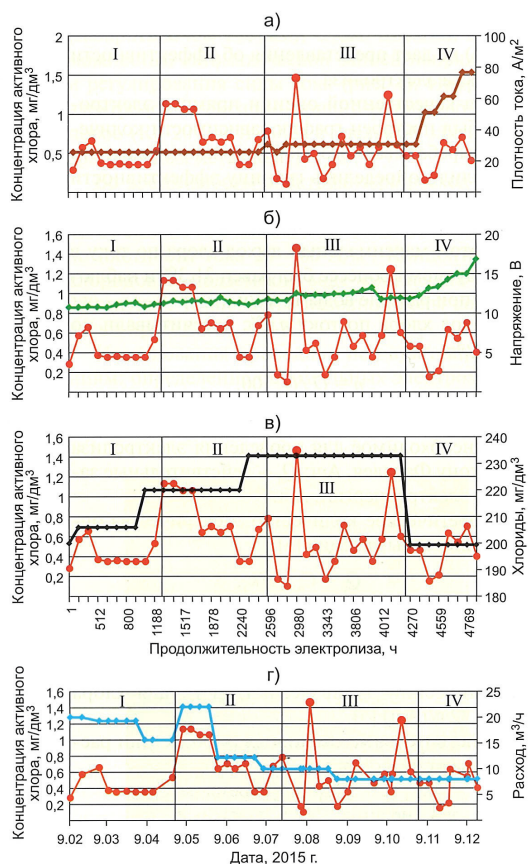


Рис. 5. Зависимость концентрации активного хлора (—●—) от продолжительности электролиза и других параметров процесса

а – плотность анодного тока; б – напряжение на клеммах электролизера; в – концентрация хлоридов; г – расход воды; I–IV – характерные зоны изменения концентрации активного хлора

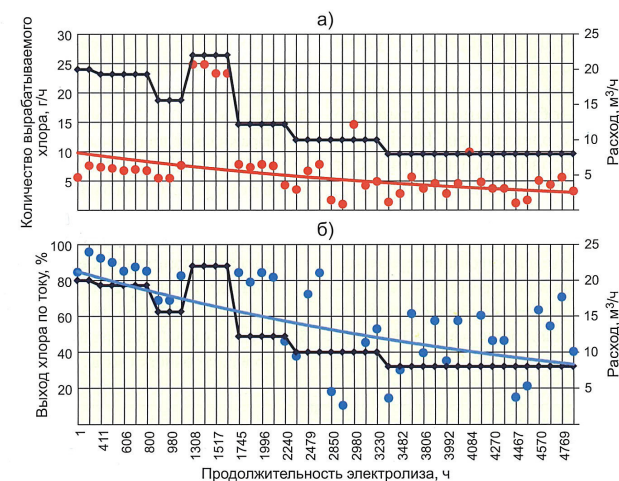


Рис. 6. Зависимость количества образующегося активного хлора (а) и выхода хлора по току (б) от продолжительности электролиза при разных расходах воды (—●—)

Анализируя зависимости, представленные на рис. 5, можно сделать вывод, что электроды ОИРТА с соотношением рутения и иридия 20:80 следует использовать при электролизе гипохлорита натрия из природной воды при непрерывном процессе более 4000 часов.

На рис. 7 представлены фотографии электродной cassette после ее непрерывной эксплуатации в течение 4855 часов. После продолжительной работы электродной cassette в межэлектродном пространстве образовались белые рыхлые отложения, а сами электродные пластины приобрели темно-синий оттенок, свидетельствующий о выработке металлооксидного покрытия.

**Выводы**

1. Результаты производственных испытаний показали возможность обеззараживания природной хлоридсодержащей воды (с концентрацией хлоридов 200–233 мг/дм<sup>3</sup>) путем ее прямого электролиза и подтверждают данные, полученные в лабораторных условиях [4]: плотность тока 25 А/м<sup>2</sup>; скорость подачи воды в электролизер 0,3–0,5 м/с (расход 16 м<sup>3</sup>/ч); время работы электрода в режиме анода 300 с, в режиме катода 1 ч; электрод – оксидно-иридий-рутениево-титановый анод с массовым соотношением рутения и иридия 20 и 80%.

2. Изменение режима работы электрода с анодной поляризации «+» на катодную «-» и обратно ( $\tau^- = 1$  ч,  $\tau^+ = 300$  с) при плотности тока 25 А/м<sup>2</sup> положительно влияет на рост концентрации ак-

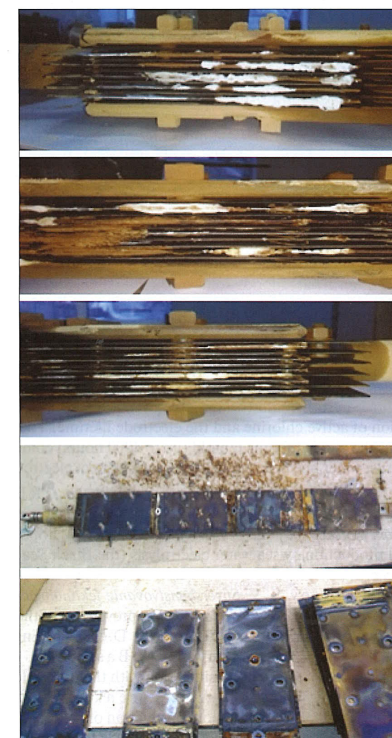


Рис. 7. Электродные cassette после 4855 часов наработки

тивного хлора, устраняет отложения на поверхности электродов и увеличивает срок службы электрода до 4000 часов.

3. Использование иридия в покрытии электродов заметно влияет на образование активного хлора и на срок службы электродов. Наличие в оксидном слое Ru в массовом соотношении с Ir 20:80 увеличивает срок службы анода в 10 раз.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пчельников И. В. Совершенствование технологии производства обеззараживающего реагента – гипохлорита натрия электролизом морской воды (на примере Черного моря): Дисс. ... канд. техн. наук. – Новочеркасск, 2014. 155 с.
2. Кудрявцев С. В. Совершенствование технологических параметров установок получения электролитического гипохлорита натрия для обеззараживания воды: Дисс. ... канд. техн. наук. – Новочеркасск, 2009. 161 с.
3. Медриш Г. Л., Тейшева А. А., Басин Д. Л. Обеззараживание природных и сточных вод с использованием электролиза. – М.: Стройиздат, 1982. 81с.
4. Бреус С. А., Скрябин А. Ю., Фесенко Л. Н. Разработка технологии очистки природной воды для питьевых целей на период чрезвычайных ситуаций: производство активного хлора электролизом воды // Инженерный вестник Дона. 2016. № 2. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n2y2016/3655](http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2016/3655) (дата обращения 12.04.2017).
5. Кульский Л. А., Гребенюк О. С. Электрохимия в процессах очистки воды. – Киев: Техника, 1987. 223 с.

## DRINKING WATER SUPPLY

### Field tests of drinking water disinfection by direct electrolysis

L. N. FESENKO<sup>1</sup>, A. Iu. SKRIABIN<sup>2</sup>, S. A. BREUS<sup>3</sup>, I. V. PCHEL'NIKOV<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Fesenko Lev Nikolaevich, Doctor of Engineering, Professor, «Water Industry, Utilities and Environmental Protection» Department, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)  
132 Prosveshcheniia St., 346428, Novocheerkassk, Rostov Area, Russian Federation, tel.: +7 (8635) 25-53-34, e-mail: 65613@mail.ru

<sup>2</sup> Skriabin Aleksandr Iur'evich, Ph. D. (Engineering), Associate Professor, First Deputy of Head of Rostov-on-Don Administration Office 424, 47 B. Sadovaia St., 344002, Rostov-on-Don, Russian Federation, tel.: +7 (8632) 244-12-22, e-mail: media@rostov-gorod.ru

<sup>3</sup> Breus Sergei Aleksandrovich, Deputy General Director for Production, «Management of the Water Supply Development», PUE, Rostov Area  
295 M. Gor'kogo St., 344019, Rostov-on-Don, Russian Federation, tel.: +7 (8632) 01-74-60, e-mail: breus\_s\_a@mail.ru

<sup>4</sup> Pchel'nikov Igor' Viktorovich, Ph. D. (Engineering), Senior Lecturer, «Water Industry, Utilities and Environmental Protection» Department, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)  
132 Prosveshcheniia St., 346428, Novocheerkassk, Rostov Area, Russian Federation, tel.: +7 (8635) 25-53-34, e-mail: pchel'nikov.igor@mail.ru

The results of studying direct electrolysis of natural underground water with the purpose of determining possible production of low concentration sodium hypochlorite for drinking water disinfection before supplying it to the residents of Grushevskaiia village of the Aksaisk District, Rostov Area are presented. The use of natural surface or underground water as electrolyte provides for eliminating the stage of artificial chloride solution making; that will simplify the technology of disinfectant production at the point of application and reduce the operation expenses. The studies were carried out in a full-scale plant in two directions: determination of the optimal parameters of the flow-through electrolyzer; determination of the lifetime of electrodes. The results of the full-scale studies confirmed possible disinfection of chloride-containing natural water (chloride concentrations 200–233 mg/dm<sup>3</sup>) by direct electrolysis. The process parameters of the electrolyzer operation with underground fresh water were determined: current density; water flow to the electrolyzer (flow rate); the time of electrode operation as an anode and as a cathode. The optimal composition of electrode coating was determined: in ruthenium – iridium oxide coating the weight ratio of Ru to Ir was 20:80. The use of iridium in the coating effects the formation of active chlorine and the electrode lifetime. The presence of ruthenium in the oxide layer in 20:80 weight ratio to iridium increases the anode lifetime tenfold (up to 4000 hours) compared to the anode without iridium.

**Key words:** water purification, drinking water, direct electrolysis, electrolyzer, low concentration sodium hypochlorite, disinfection.

#### REFERENCES

1. Pchel'nikov I. V. *Sovershenstvovanie tekhnologii proizvodstva obezrazhivaiushchego reagenta – gipokhlorita natriia elektrolizom morskoi vody (na primere Chernogo moria)* [Improvement of the technology of sodium hypochlorite – disinfecting chemical production by sea water electrolysis (the Black Sea case study)]. Ph. D. thesis in Engineering Science. Novocheerkassk, 2014, 155 p.].
2. Kudriavtsev S. V. *Sovershenstvovanie tekhnologicheskikh parametrov ustanovok polucheniia elektroliticheskogo gipokhlorita natriia dlia obezrazhivaniia vody* [Improvement of the process parameters of the facilities for electrolytic production of sodium hypochlorite for water disinfection. Ph. D. thesis in Engineering Science. Novocheerkassk, 2009, 161 p.].
3. Medrish G. L., Teisheva A. A., Basin D. L. *Obezrazhivanie prirodnykh i stochnykh vod s ispol'zovaniem elektroliza* [Natural and waste water disinfection with the use of electrolysis. Moscow, Stroizdat Publ., 1982, 81 p.].
4. Breus S. A., Skriabin A. Iu., Fesenko L. N. [Development of natural water purification technology for drinking for the periods of emergency situation: production of activated sludge by water electrolysis]. *Inzhenernyi Vestnik Dona*, 2016, no. 2. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n2y2016/3655](http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2016/3655) (accessed 12.04.2017). (In Russian).
5. Kul'skii L. A., Grebeniuk O. S. *Elektrokhimiia v protsessakh oshistki vody* [Electrochemistry in water treatment processes. Kiev, Tekhnika Publ., 1987. 223 p.].