

4. Circulating water supply system in a heated barn / G.P. Yukhin, A.A. Katkov, Z.V. Makarovskaya et al. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2015; 55(5): 89-90.

5. Milk productivity of Holstein cows in a robotic complex / N.I. Morozova, F.A. Musaev, R.Z. Sadikov et al. *Herald of Ryazan State Agrotechnological University Named after P.A. Kostychev*. 2018; 38(2): 32-36.

6. The use of robotic technology in a fattening complex / A.A. Katkov, A.M. Kalimullin, T.A. Sedykh et al. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2019; 77(3): 157-160.

7. System of machines and equipment for the implementation of innovative technologies in crop production and animal husbandry of the Republic of Bashkortostan / ed. I.I. Gabitov, S.G. Mudarisov, G.P. Yukhin et al. Ufa: Bashkir State Agrarian University, 2014. 327 p.

8. Yukhin G.P., Martynov V.M., Katkov A.A. Economic efficiency of milk production on reconstructed farms // Innovative development of the agro-industrial complex – scientific support: mater. intl. scientific-practical. conf. in the framework of the XXII Intern. specialized vyst. «Agrocomplex-2012». Ufa: Bashkir State Agrarian University, 2012, pp. 62-64.

**Геннадий Петрович Юхин**, доктор технических наук, профессор, gpet1@yandex.ru

**Владимир Михайлович Мартынов**, доктор технических наук, профессор, m\_w\_m@mail.ru

**Владимир Александрович Шахов**, доктор технических наук, профессор, Shahov-V@Ya.ru,

<https://orcid.org/0000-0002-1902-0074>

**Гульнара Флуровна Латыпова**, кандидат биологических наук, g1311@mail.ru

**Азамат Миннигалеевич Калимуллин**, кандидат технических наук, доцент, kazamatm@mail.ru

**Алексей Анатольевич Катков**, кандидат технических наук, доцент ak1409@mail.ru

**Gennady P. Yukhin**, Doctor of Technical Sciences, Professor, gpet1@yandex.ru

**Vladimir M. Martynov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, m\_w\_m@mail.ru

**Vladimir A. Shakhov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Shahov-V@Ya.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1902-0074>

**Gulnara F. Latypova**, Candidate of Biology, g1311@mail.ru

**Azamat M. Kalimullin**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, kazamatm@mail.ru

**Aleksey A. Katkov**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor ak1409@mail.ru

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 24.06.2022; одобрена после рецензирования 15.07.2022; принята к публикации 05.09.2022.

The article was submitted 24.06.2022; approved after reviewing 15.07.2022; accepted for publication 05.09.2022.

Научная статья

УДК 66.0875:631.3

doi: 10.37670/2073-0853-2022-97-5-153-158

## Повышение эффективности электрокоагуляции топливно-смазочных фракций в сточных водах моек сельскохозяйственной техники путём их обработки в неоднородном электрическом поле

**Анатолий Викторович Крутов, Михаил Анатольевич Бойко**

Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Республика Беларусь

**Аннотация.** В статье рассматриваются способы очистки сточных вод постов мойки сельскохозяйственной техники в электролизере с однородным и неоднородным электрическим полем. Удаление нефтесодержащих фракций из стоков происходит в результате их электрохимической коагуляции. В качестве коагулянта выступает хлорное железо, образующееся в процессе электролиза путём разложения стальных электродов. При электрообработке стоков электроэнергия расходуется на электрохимическое разложение анода и нагрев очищаемой воды. Для снижения энергозатрат на очистку использована электрообработка стоков в неоднородном электрическом поле проточного электрокоагулятора. На входе в электрокоагулятор напряжённость электрического поля выше, а на выходе – ниже. Это позволило снизить температуру очищаемых стоков, стабилизировать плотность тока электрокоагуляции, получая необходимую дозу хлорного железа. Приведены зависимости удельной электрической проводимости модельных стоков от их температуры, а также температуры стоков при обработке в однородном и неоднородном электрическом поле. Применение неоднородного электрического поля позволило снизить затраты электроэнергии на очистку стоков от топливно-смазочных фракций в 1,4 раза. Достигнутая степень очистки стоков позволяет использовать очищенную воду в системе оборотного водоснабжения моек.

**Ключевые слова:** сточные воды, электрокоагуляция, электрическое поле, энергозатраты.

**Для цитирования:** Крутов А.В., Бойко М.А. Повышение эффективности электрокоагуляции топливно-смазочных фракций в сточных водах моек сельскохозяйственной техники путём их обработки в неоднородном электрическом поле // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2022. № 5 (97). С. 153–158. (In Russ.). <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2022-97-5-153-158>.

## Improving the efficiency of electrocoagulation of fuel and lubricants fractions in the wastewater of agricultural machinery sinks by processing them in an inhomogeneous electric field

Anatoli V. Krutau, Michail A. Boyko

Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Republic of Belarus

**Abstract.** The article discusses the methods of wastewater treatment of agricultural machinery washing stations in an electrolyzer with a homogeneous and inhomogeneous electric field. Removal of oily fractions from effluents occurs as a result of their electrochemical coagulation. Iron chloride acts as a coagulant, which is formed during electrolysis by decomposition of steel electrodes. In the electrical treatment of effluents, electricity is spent on the electrochemical decomposition of the anode and heating of the purified water. To reduce energy consumption for cleaning, electrical treatment of effluents in an inhomogeneous electric field of a flow-through electrocoagulator was used. The electric field strength is higher at the input to the electrocoagulator, and lower at the output. This made it possible to reduce the temperature of the treated effluents, stabilize the current density of electrocoagulation, receiving the necessary dose of ferric chloride. The dependences of the specific electrical conductivity of model effluents on their temperature, as well as the temperature of effluents during processing in a homogeneous and inhomogeneous electric field are given. The use of an inhomogeneous electric field made it possible to reduce the cost of electricity for wastewater treatment from fuel and lubricant fractions by 1.4 times. The achieved degree of wastewater treatment allows the use of purified water in the recycling water supply system of sinks.

**Keywords:** wastewater, electrocoagulation, electric field, energy consumption.

**For citation:** Krutau A.V., Boyko M.A. Improving the efficiency of electrocoagulation of fuel and lubricants fractions in the wastewater of agricultural machinery sinks by processing them in an inhomogeneous electric field. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2022; 97(5): 153-158. (In Russ.). <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2022-97-5-153-158>.

Сточные воды моечных станций автотракторной техники содержат различные минеральные загрязнения. В их составе остатки почвы, растительности, дорожная пыль, протекшие топливно-смазочные материалы, рабочие жидкости, синтетические поверхностно-активные вещества (СПАВ), содержащиеся в технических моющих средствах, и другие нежелательные компоненты. Неочищенные стоки машинных дворов сельскохозяйственных организаций от нефтепродуктов и СПАВ опасны для окружающей среды. Их очистка после отстаивания с применением электрокоагуляции, электрофлотации в электромагнитных гидроциклонах позволяет повысить степень обезвреживания воды и обеспечивает повторное её использование на технические нужды. Это способствует рациональному расходованию водных ресурсов, снижению вредного воздействия загрязняющих веществ на гидросферу.

К примеру, в сточных водах машинных дворов сельскохозяйственных организаций установлено содержание нефтепродуктов от 200 до 350 мг/л, взвешенных веществ – от 2300 до 3300 мг/л. Динамика изменения содержания нефтепродуктов в сточных водах не одинакова в течение года. Это объясняется прежде всего различной интенсивностью использования техники по сезонам сельскохозяйственных работ. Наибольшее содержание нефтепродуктов (330–500 мг/л) отмечается в июле – августе и наименьшее (120–180 мг/л) – в декабре – феврале [1]. Химический анализ показал, что в отдельных стоках концентрация нефтепродуктов составляет 1,88 г/л. Такое высокое

содержание нефтепродуктов объясняется тем, что в резервуар со сточными водами иногда сливалось отработанное масло после его замены при очередном техническом обслуживании техники. Согласно литературным источникам, содержание нефтепродуктов в сточных водах автохозяйств составляет 0,23–0,35 г/л [2, 3]. Применяемые в настоящее время системы и способы очистки сточных вод весьма разнообразны. Однако анализ экологоохранной ситуации вокруг наружных постов мойки сельскохозяйственной техники на машинных дворах показывает, что в подавляющем большинстве сельскохозяйственных организаций отсутствуют очистные сооружения, системы оборотного водоснабжения. В результате сброса сточных вод окружающей среде наносится большой ущерб из-за её загрязнения нефтепродуктами, другими вредными веществами.

**Цель исследования** – повысить эффективность и качество очистки сточных вод моечных станций сельскохозяйственной техники от нефтепродуктов (смытых протечек бензина, дизельного топлива, моторного масла, гидравлического масла, рабочих жидкостей, поверхностно-активных веществ технических моющих средств) электро-технологическими методами и снизить затраты потребляемой электроэнергии.

Нами проводились опыты по электрохимической коагуляции модельных растворов, близких по составу к сточным водам постов мойки после их отстаивания и удаления всплывших нефтепродуктов. В сточных водах остаются загрязнения в виде эмульсий. Для их удаления применяется электрокоагуляция и электрофлотация [2–4].

В качестве коагулянта использовался хлорид железа, образующийся в процессе электролиза путём растворения стальных электродов. Хлорное железо гидролизует в воде с образованием хлопьев ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ). На очистных сооружениях дозировка коагулянта (хлорного железа) составляет 30–80 г/м<sup>3</sup> [5]. При однородном электрическом поле напряжённостью 1,6 кВ/м, плотности тока 120–170 А/м<sup>2</sup> одновременно происходили электрокоагуляция находящихся в стоках нефтепродуктов и нагрев воды до температуры 45–50 °С.

Плотность тока при электрокоагуляции можно определить из выражения:

$$J = \gamma E,$$

где  $J$  – плотность тока, А/м<sup>2</sup>;

$\gamma$  – удельная электропроводность среды, См/м;

$E$  – напряжённость электрического поля, В/м.

Известно, что удельная электропроводность изменяется с ростом температуры по следующей зависимости:

$$\gamma_t = \gamma_{20} [1 + \alpha(t - 20)],$$

где  $\gamma_t$ ,  $\gamma_{20}$  – удельная электропроводность среды при температуре  $t$  и температуре 20 °С соответственно;

$\alpha$  – температурный коэффициент удельной проводимости, °С<sup>-1</sup> (для стоков постов мойки, согласно экспериментальным данным,  $\alpha = 0,013 \dots 0,017$ ).

Зависимость удельной электропроводности модельных стоков от температуры приведена на рисунке 1. При кипении удельная электропроводность несколько уменьшается.

**Материал и методы.** После отстаивания и сбора всплывших нефтепродуктов в сточных водах остаются эмульгированные загрязнения, образованные в результате диффузии, перекачивания стоков. Электрообработка нефтесодержащих сточных вод проводилась в проточном электрокоагуляторе. Плотность тока регулировалась из-

менением напряжения, подаваемого на электроды. Использовалось постоянное напряжение 12–24 В. Контроль величины тока и напряжения осуществлялись амперметром и вольтметром соответственно. Класс точности используемых приборов не ниже 1,5. Регулирование скорости движения воды через электролизер осуществлялось путём изменения количества воды, подаваемой в установку. В проведённых исследованиях использовались модельные растворы нефтепродуктов в воде, реальные сточные воды машинных дворов кафедры производственного обучения Белорусского ГАТУ, ОАО «Асвица» Стародорожского района Минской области. Содержание нефтепродуктов в образцах определялось в аналитической лаборатории БГАТУ гравиметрическим методом. По результатам составлялся протокол исследований. Для повышения электропроводности модельных растворов и уменьшения пассивации электродов, образования хлорного железа добавляли в раствор хлористый натрий (NaCl) из расчёта 0,5–1,5 г/л.

Исследование электрохимических способов очистки сточных вод проводилось на экспериментальной установке (рис. 2). В её составе резервуары со сточной и очищенной водой, насос, устройства для регулирования скорости движения обрабатываемой жидкости, проточного электрокоагулятора, электромагнитного гидроциклона, кондуктомера, источника питания, измерительных приборов. В электрокоагуляторе электроды выполнены из стали 3 толщиной 2 мм. На пластины подавалось постоянное напряжение, при этом величина тока составляла 6–10 А. Для преобразования напряжения использовался трёхфазный выпрямитель. Степень очистки контролировалась по показаниям кондуктомера, с последующей оценкой в аналитической лаборатории университета. Процесс электрокоагуляции исследовался в однородном и неоднородном электрическом поле. Для создания неоднородного электрического поля катод разместили под углом к аноду, образовав расширение камеры электрокоагуляции по высо-

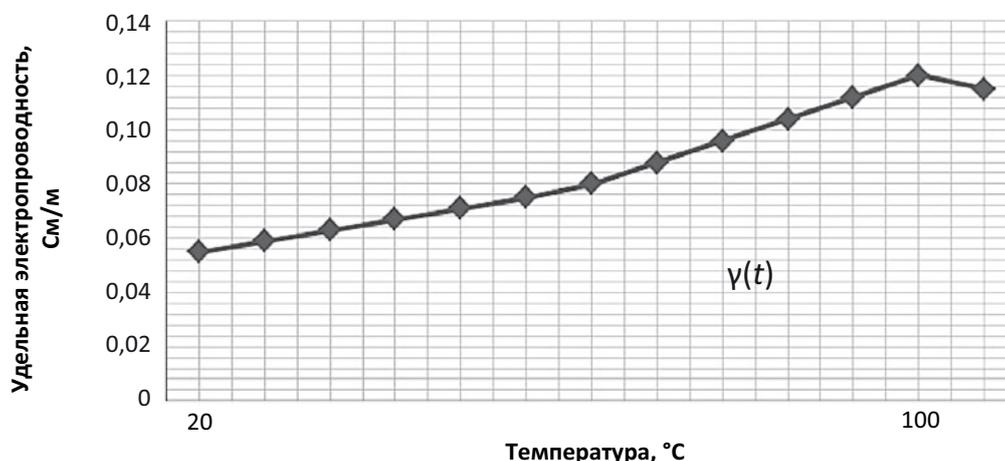


Рис. 1 – Зависимость удельной электропроводности стоков от их температуры

те. При проведении экспериментов объём камер электрокоагуляции при воздействии однородного и неоднородного электрического поля был одинаковым (1,4 л).

**Результаты и обсуждение.** Исследования показали, что при напряжённости электрического поля 160–170 кВ/м и плотности тока 120–150 А/м происходит электрокоагуляция нефтепродуктов. В процессе электрокоагуляции при напряжённости однородного электрического поля из-за роста температуры возрастает ток электролиза. Требовалось снижать напряжённость электрического поля, чтобы стабилизировать ток и его плотность. Нагрев стоков сопряжён со значительными энергозатратами, даже при хороших результатах очистки (до 99,0–99,8 %). Благодаря изменению геометрии размещения катода и анода (под углом, образовав расширение камеры электрокоагуляции по высоте) в ней создаётся неоднородное электрическое поле, уменьшающееся с увеличением расстояния между электродами. Тёплые слои стоков, поднимаясь вверх, попадают в зону уменьшающейся напряжённости электрического поля. Ток, его плотность стабилизируются. В основном электроэнергия затрачивается на разложение электродов. Известно, что на получение 1 г металлического железа теоретически требуется 3400 Кл электричества. Растворение 1 г металлического железа эквивалентно введению в воду 4,8 г хлорного железа [6]. Опыты показали, что необходимая доза хлорного железа для коагуляции нефтепродуктов образуется, а температура нагре-

ва в камере снижается при одинаковом объёме очищаемых стоков. Зависимость температуры от количества электричества при однородном и неоднородном электрическом поле показана на рисунке 3. В однородном электрическом поле очищаемые стоки закипали при количестве электричества 3160 Кл. Продолжительность очистки практически не увеличилась, а энергозатраты уменьшились более чем в 1,4 раза. Было также установлено, что степень очистки и энергозатраты зависят от скорости движения обрабатываемой среды в электрокоагуляторе. Наилучшие результаты по эффективности очистки и энергозатратам получены при скорости подачи стоков 0,5 м/с.

Электрохимический способ очистки показал высокие результаты. Отстоявшаяся вода после электрообработки в течение 12 час. стала прозрачной, характеризовалась отсутствием нефтяных плёнок на поверхности, взвешенных частиц. Скоагулировавшие частицы осели на дно. Концентрация нефтесодержащих примесей в очищенных стоках снизилась до 0,8–0,2 %, что позволяет очищенную воду повторно использовать для мойки.

Так как при электролизе происходит разложение электродов, скоагулировавшие частицы обладают магнитными свойствами. Для подтверждения этого был проведён опыт. К ёмкости с очищенными стоками был приставлен постоянный магнит (рис. 4). При этом весь осадок сконцентрировался вдоль стенки, у которой находился магнит.

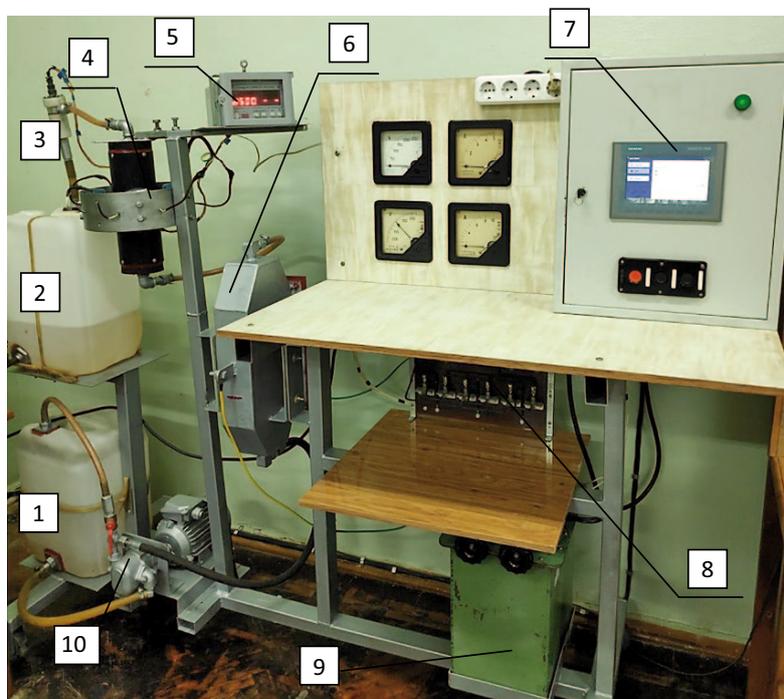


Рис. 2 – Экспериментальная установка:

- 1, 2 – резервуары исходной и очищенной воды; 3 – датчик кондуктомера; 4 – электромагнитный гидроциклон; 5 – кондуктомер; 6 – электрокоагулятор; 7 – панель управления; 8 – выпрямитель; 9 – силовой трансформатор; 10 – насос и его электропривод

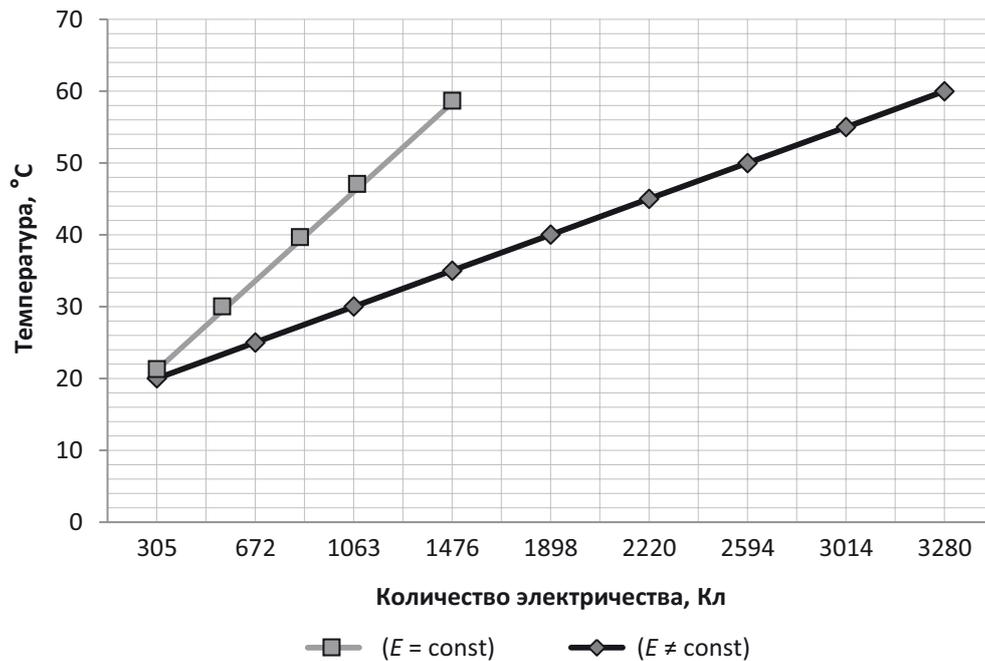


Рис. 3 – Изменение температуры стоков от количества электричества при напряжённости однородного ( $E = \text{const}$ ) и неоднородного ( $E \neq \text{const}$ ) электрического поля



Рис. 4 – Иллюстрация опыта с постоянным магнитом

По результатам проведённых исследований предложено устройство очистки сточных вод, содержащих нефтепродукты, и получен патент Республики Беларусь на изобретение № 21229 «Трёхпродуктовый гидроциклон для очистки сточных вод» (зарегистрировано в Государственном реестре изобретений 18.04.2017).

Производительность электрокоагулятора по выходу железа (в г) рассчитывается по формуле:

$$G_M = A_M I \tau K_M \eta, \quad (1)$$

где  $\eta$  – коэффициент использования тока, принимается 0,7–0,9 [3, 7];

$A_M$  – электрохимический эквивалент двухвалентного железа, г/(А·ч);

$K_M$  – коэффициент, учитывающий повышенный реальный выход металла, по сравнению с расчётным ( $K_M = 1,2 \dots 2,0$ ).

На основании (1) величина тока, необходимая для генерации расчётного количества металла:

$$I = \frac{D q_w \eta}{A_M K_M},$$

или количество электричества:

$$I \tau = \frac{D V \eta}{A_M K_M},$$

где  $q_w$  – расчётная производительность электрокоагулятора, м<sup>3</sup>/ч;

$\tau$  – продолжительность коагуляции, ч;

$V$  – объём очистки сточных вод, м<sup>3</sup>;

$D$  – доза металла, г/м<sup>3</sup>.

При электрохимическом получении хлорного железа его потребность на 15–20 % меньше, чем при реагентной очистке [4, 8], так как процесс электрокоагуляции проходит интенсивнее, чем при реагентной коагуляции, сточная вода перемешивается пузырьками газов, выделяемых на электродах. Средняя доза металла при загрязнённости сточных вод нефтепродуктами до 0,35 г/л рекомендуется 60 г/м<sup>3</sup>.

**Выводы.** При содержании нефтепродуктов в сточных водах автохозяйств до 0,35 г/л электрохимическая обработка стоков в неоднородных электромагнитных полях уменьшает энергетические затраты на очистку в 1,4 раза по сравнению с воздействием однородным электрическим полем. Высокая степень очистки

стоков позволяет использовать очищенную воду в системе оборотного водоснабжения моек. По экспериментальным данным установлено значение температурного коэффициента удельной электропроводности для стоков постов мойки  $\alpha = 0,013 \dots 0,017 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . Оптимальная скорость их движения в электрокоагуляторе составляет 0,5 м/с. Скоагулировавшиеся загрязнения обладают магнитными свойствами.

#### Список источников

1. Крутов А.В., Бойко М.А. Обеззараживание сточных вод машинных дворов продуктами электрохимической активации // Перспективы и направления развития энергетики АПК: матер. междунар. науч.-технич. конф. Минск: БГАТУ, 2007. С. 246–249.
2. Мосин О.В. Актуальные проблемы очистки нефтесодержащих сточных вод // С.О.К. 2007. № 6. С. 15–19
3. Воловников Г.И., Коробко М.И. Электрохимическая очистка воды. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2002. 66 с.
4. Мосин О.В. Технологический расчёт установок электрокоагуляции воды // С.О.К. 2014. № 4. С. 24–28.
5. Справочник химика 21. Химия и химическая технология [Электронный ресурс]. URL: <http://chem21/info/info/149584> (Дата обрац.: 21.02.2022).
6. Очистка сточных вод промышленных предприятий: учеб.-методич. пособ. / сост. Т.И. Халтурина. Электрон. дан. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2014 [Электронный ресурс]. URL: <http://elibrary.stu-kras.ru/handle/2311/61478> (Дата обрац.: 12.05.2022).

7. Грановский М.Г., Лавров И.С., Смирнов О.В. Электрообработка жидкостей / под ред. докт. техн. наук И.С. Лаврова. Л.: 1976. 216 с.

8. Ильин В.И., Колесников В.А. Электрохимическая очистка промышленных сточных вод с оборотным циклом // Химическая технология. 2002. № 1. С. 31–35.

#### References

1. Krutov A.V., Boyko M.A. Disinfection of sewage from machine yards by products of electrochemical activation. Intl. scientific and technical conf. Minsk: BGATU, 2007. P. 246-249.
2. Mosin O.V. Actual problems of oil-containing wastewater treatment. *S.O.K.* 2007; 6: 15-19.
3. Volovnikov G.I., Korobko M.I. Electrochemical water purification. Khabarovsk: Publishing House of the Far East State University of Transportation, 2002. 66 p.
4. Mosin O.V. Technological calculation of water electrocoagulation installations. *S.O.K.* 2014; 4: 24-28.
5. Handbook of a chemist 21. Chemistry and chemical technology [Electronic resource]. URL: <http://chem21/info/info/149584> (Accessed: 21.02.2022).
6. Wastewater treatment of industrial enterprises: study guide. allowance / comp. T.I. Khalturin. Electron. Dan. Krasnoyarsk: Sib. feder. un-t, 2014 [Electronic resource]. URL: <http://elibrary.stu-kras.ru/handle/2311/61478> (Accessed: 05/12/2022).
7. Granovsky M.G., Lavrov I.S., Smirnov O.V. Electroprocessing of liquids / ed. D-r. Tech. Sci. I.S. Lavrov. L.: 1976. 216 p.
8. Ilyin V.I., Kolesnikov V.A. Electrochemical treatment of industrial waste water with a reverse cycle. *Chemical technology.* 2002; 1: 31-35.

**Анатолий Викторович Крутов**, кандидат технических наук, доцент. An8737@yandex.ru  
**Михаил Анатольевич Бойко**, старший преподаватель

**Anatoli V. Krutau**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, An8737@yandex.ru  
**Michail A. Boyko**, Senior lecturer

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests. Статья поступила в редакцию 28.07.2022; одобрена после рецензирования 19.08.2022; принята к публикации 05.09.2022.

The article was submitted 28.07.2022; approved after reviewing 19.08.2022; accepted for publication 05.09.2022.

Научная статья

УДК 631.2: 628.1

doi: 10.37670/2073-0853-2022-97-5-158-165

## Повышение эффективности водоснабжения защитных культивационных сооружений

**Наталья Васильевна Белоусова, Евгений Михайлович Асманкин, Юрий Андреевич Ушаков, Елена Викторовна Нейфельд, Максим Борисович Фомин**  
Оренбургский государственный аграрный университет, Оренбург, Россия

**Аннотация.** Представлены результаты анализа проблемы водоснабжения закрытых культивационных сооружений и возможные методы её решения. в том числе посредством реализации реактивной силы, возникающей при равномерном, по окружности, разбрызгивании воды, нагнетаемой из скважины насосом, внутри герметичной водонапорной ёмкости. Для увеличения периода контакта воздуха и воды рассматривается эжектирование и получение водовоздушной эмульсии в совмещении с гравитационным ступенчатым перемещением жидкости. Это интенсифицирует насыщение воды кислородом, способствуя