

# ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

УДК 628.31:628.35

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-3-143-154

*Л.В. БЕЛОВА<sup>1</sup>, Е.И. ВЯЛКОВА<sup>1</sup>, Е.С. ГЛУЩЕНКО<sup>1</sup>, Е.Ю. ОСИПОВА<sup>2</sup>,*

*<sup>1</sup>Тюменский индустриальный университет,*

*<sup>2</sup>Томский государственный архитектурно-строительный университет*

## ТЕХНОЛОГИЯ ОЧИСТКИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ЦЕХА

Сточные воды гальванических предприятий характеризуются повышенными концентрациями металлов, взвешенных веществ, кислот, щелочей и других загрязнений. Неравномерность поступления, низкие значения pH и специфический состав усложняют обработку таких стоков.

К основным методам очистки относят химическое осаждение, ионный обмен, химическое и электрохимическое окисление, флотацию, фильтрацию и мембранные установки. В статье рассмотрен возможный вариант очистки сточных вод небольшого гальванического цеха, на основании проведенного исследования предложена технологическая схема, включающая осаждение загрязняющих веществ гидроксидом натрия и окисление анолитом на втором этапе.

Эффекты снижения загрязнений составили по ХПК 88,9 %, взвешенных веществ – 99,5 %, железа – 99,8 %, АПАВ – 95,7 %, ионов меди – 99,9 %. Показатель pH очищенной воды составлял 7,8 и соответствовал значению слабощелочной среды.

**Ключевые слова:** гальваническое производство; сточные воды; химическое осаждение; окисление анолитом; показатели качества; технологическая схема.

**Для цитирования:** Белова Л.В., Вялкова Е.И., Глущенко Е.С., Осипова Е.Ю. Технология очистки производственных сточных вод гальванического цеха // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 3. С. 143–154.

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-3-143-154

*L.V. BELOVA<sup>1</sup>, E.I. VYALKOVA<sup>1</sup>, E.S. GLUSHCHENKO<sup>1</sup>, E.Yu. OSIPOVA<sup>2</sup>,*

*<sup>1</sup>Industrial University of Tyumen,*

*<sup>2</sup>Tomsk State University of Architecture and Building*

## ELECTROPLATING PLANT SEWAGE TECHNOLOGY

Electroplating plant sewage is characterized by high concentration of metals, suspended solids, acids, alkalis and other contaminants. The irregular inflows, low pH values and specific

sewage composition complicate its treatment. The main treatment methods include chemical precipitation, ion exchange, chemical and electrochemical oxidation, flotation, filtration and membrane separation. The paper proposes a possible variant of wastewater treatment in a small electroplating plant. The proposed flow diagram includes sedimentation of polluting substances with sodium hydroxide and oxidation with anolyte. The method results in a 88.9 % reduction in chemical oxygen demand, 99.5 % reduction in suspended solids, 99.8 % reduction in iron, 95.7 % reduction in surfactants, and 99.9 % reduction in copper ions. The pH value of the treated water is 7.8 and matches the value of a slightly alkaline environment.

**Keywords:** electroplating plant; wastewater; chemical deposition; anolyte oxidation; quality indicators; flow diagram.

**For citation:** Belova L.V., Vyalkova E.I., Glushchenko E.S., Osipova E.Yu. Tekhnologiya ochistki proizvodstvennykh stochnykh vod gal'vanicheskogo tsekha [Electroplating plant sewage technology]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2021. V. 23. No. 3. Pp. 143–154.

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-3-143-154

### Введение

В процессе работы различных промышленных предприятий образуется значительное количество специфических производственных сточных вод, отличающихся по составу от хозяйственно-бытовых. Сброс таких стоков без надлежащей очистки в водные объекты или системы хозяйственно-бытовой канализации населенного пункта приводит к нарушению работы очистных сооружений, загрязнению водоемов, гибели водной флоры и фауны, а также подвергает угрозе здоровье человека.

Быстрые темпы роста промышленной индустрии, в том числе металлургических и аккумуляторных заводов, горнодобывающих предприятий, сопровождаются увеличением количества образующихся на этих предприятиях техногенных загрязнений, попадающих в окружающую среду.

Сточные воды гальванических производств характеризуются повышенными концентрациями тяжелых металлов (медь, никель, кадмий, цинк, свинец, железо, хром), сульфат-ионов, кислот, щелочей, поверхностно-активных веществ, органических соединений. Кроме того, pH таких стоков может варьироваться от сильнокислых до сильнощелочных [1].

Типы и концентрации загрязняющих веществ в стоках гальванических производств варьируются в широких пределах в зависимости от применяемых технологических операций, а также характера производства [2]. Загрязнения, присутствующие в этих стоках, невозможно удалить традиционными методами. В связи с необходимостью удаления большого количества разнообразных тяжелых металлов, а также стабилизации pH, возникает необходимость разработки оптимальной технологической схемы очистки производственных сточных вод, которая может включать химическое осаждение, ионный обмен, электрохимическое окисление, сорбционные и мембранные технологии [3]. Основным критерием при выборе технологии и определении оптимальных доз реагентов является достижение остаточных концентраций загрязняющих веществ, не превышающих предельно допустимых концентраций для сброса в городские канализационные сети.

### Обзор исследований

Сточные воды гальванических цехов промышленных предприятий подразделяются на отработанные и промывные. Отработанные сточные воды образуются периодически, при смене отработанных технологических растворов на свежие. Промывные стоки появляются при промывке заготовок и изделий. Диапазон возможных количественных значений некоторых показателей загрязняющих веществ для промывных вод и отработанных растворов приведен в табл. 1 [4].

Таблица 1

#### Характеристика сточных вод цехов гальванопокрытий

Показатели	Промывные воды	Отработанные растворы
рН	3–11	3–11
Механические примеси, мг/л	До 50	До 300
Нефтепродукты, мг/л	До 2	До 50
Общее солесодержание, мг/л	500–1000	10 000–300 000
Железо, мг/л	20–200	40 000–89 000
Хром шестивалентный, мг/л	10–80	50 000–250 000
Цианиды, мг/л	10–60	10 000–150 000
Медь, мг/л	10–50	10 000–150 000
Никель, мг/л	10–50	50 000–200 000
Цинк, мг/л	10–60	10 000–100 000
Кадмий, мг/л	5–30	5000–50 000

В связи с тем, что отработанные растворы содержат очень высокие концентрации загрязняющих веществ по сравнению с промывными водами, количественные показатели загрязнений смешанных сточных вод будут напрямую зависеть от того, в каких пропорциях смешиваются данные стоки.

Наиболее распространенным и эффективным методом очистки сточных вод от ионов металлов является химическое осаждение [5–9]. В процессе осаждения химические реагенты, как правило гидроксиды кальция и натрия, переводят ионы тяжелых металлов в нерастворимые формы гидроксидов, которые удаляются из воды путем отстаивания и фильтрования. Также благодаря использованию щелочей для осаждения металлов удастся одновременно корректировать рН стоков до требуемых значений. Дополнительное введение на этой ступени очистки в воду коагулянтов и флокулянтов позволяет интенсифицировать процесс осаждения и значительно снизить концентрации продуктов химических реакций.

Ионный обмен является еще одним широко применяемым способом удаления тяжелых металлов из сточных вод гальванических производств [10–12]. Наиболее часто для извлечения растворенных примесей применяются синтетические катионообменные смолы с кислотными группами  $-\text{SO}_3\text{H}$  или  $-\text{COOH}$ . Ион водорода в данном случае замещается ионами металлов или дру-

гими катионами, присутствующими в воде. Помимо синтетических ионообменных смол, могут применяться природные материалы, например цеолиты, клиноптилолиты и др. [13–15].

Электрохимические методы очистки сточных вод позволяют удалить из воды ионы  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Cr}^{6+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  и другие в результате возникающих химических превращений под действием электрического тока [16–19]. В качестве анода и катода могут быть использованы железные, алюминиевые или графитовые электроды. Авторами отмечается влияние pH на процесс осаждения металлов из воды. Оптимальным значением pH для удаления металлов из воды является диапазон от 4 до 8, при этом во всех случаях удается достичь практически полного удаления металлов из воды.

Для извлечения остаточных продуктов реакции после реагентной обработки гальванических сточных вод, а также снижения концентрации нефтепродуктов, масел и АПАВ в схему очистки, как правило, дополнительно входят отстойники, флотаторы и фильтрующие сооружения [20–22].

В настоящее время для удаления из воды остаточных загрязняющих веществ молекулярного и ионного размера широко применяются мембранные технологии (ультра- и наномембраны, обратный осмос, электродиализ) [23–28]. Для улучшения селективной способности мембран применяются различные полиэлектролиты, которые изменяют плотность поверхности заряда мембраны, сопротивление ее к зарастанию, гидрофильность мембраны.

#### **Объект, материалы и методы исследований**

С целью изучения качественного состава производственных сточных вод гальванического цеха и выбора технологии их эффективной очистки авторами статьи проводилось исследование на реальной воде действующего предприятия в Тюменской области. Результаты научно-исследовательской работы позволили выявить особенности химического состава воды, закономерности поступления стоков, подобрать оптимальные параметры обработки воды и предложить технологическую схему локальных очистных сооружений.

Во время исследования выяснилось, что в результате процесса омеднения стальной проволоки поступают три основных вида технологических сточных вод:

- 1) отработанный мыльный раствор (М), образующийся после предварительной обезжиривающей промывки стальной проволоки;
- 2) отработанный раствор омеднения (К), образующийся после основного цикла нанесения защитного покрытия на поверхность проволоки в растворе медного купороса;
- 3) промывные сточные воды (П), образующиеся после промывки готовой продукции.

Все эти типы стоков, значительно отличающиеся по химическому составу, образуются в разное время и в разном количестве в зависимости от технологического процесса на предприятии. Максимальный объем притока не превышал  $10 \text{ м}^3/\text{сут}$ . Постоянный режим поступления наблюдался только у промывных сточных вод. Залповые сбросы отработанных мыльных растворов происходили 1 раз в неделю, а отработанных растворов медного купоро-

са – 1 раз в месяц. Следовательно, для выбора технологической схемы очистки рассматривался самый неблагоприятный случай при поступлении одновременно всех трех типов стоков на очистку. В связи с тем, что отработанные растворы являются наиболее загрязненными и высококонцентрированными, данные стоки необходимо дозировать для получения смеси сточных вод, отводимых на очистку приблизительно одинакового количественного и качественного состава.

Исследования проводились на смесях производственных сточных вод (модельных растворах) в химической лаборатории Тюменского индустриального университета. В качестве контрольных показателей по осаждению металлов выбраны ионы железа и меди.

В исходной воде и после ее очистки измерялись следующие показатели качества: pH, взвешенные вещества, химическое потребление кислорода, анионные поверхностно-активные вещества, общее железо и концентрация ионов меди (согласно стандартным методикам).

Показатель среды pH в воде измерялся с помощью pH-метра pH150MI потенциометрическим методом (ПНД Ф 14.1:2.3:4.121-97).

Взвешенные вещества определялись гравиметрическим методом по разнице массы бумажных фильтров до и после фильтрования (ПНД Ф 14.1:2.3.110-97).

Значение ХПК определялось фотометрическим методом на анализаторе жидкости «Флюорат-0,2М» после нагревания в течение 2 ч до температуры 150 °С смеси стоков, бихромата калия, сульфата ртути, сернокислого серебра в серной кислоте (ПНД Ф 14.1:2.4.190-2003).

Содержание в воде АПАВ определялось флуориметрическим методом на анализаторе жидкости «Флюорат-0,2М» путем их экстрагирования хлороформом в присутствии красителя акридинового желтого (ПНД Ф 14.1:2.4.158-2000).

Общее железо также определялось фотометрически на спектрофотометре ПЭ-5400ВИ (ПНД Ф 14.1:2.50-96). Пробу воды упаривали с 0,5 см<sup>3</sup> концентрированной азотной кислоты, затем добавляли по 2 см<sup>3</sup> хлористого аммония, сульфосалициловой кислоты и раствора аммиака. Остывший раствор, доведенный до 100 см<sup>3</sup> в мерной колбе, фотометрировали.

Концентрация ионов меди определялась методом атомной абсорбции на атомно-абсорбционном спектрометре МГА-915МД (ПНД Ф 14.1:2.253-09).

### **Результаты исследований**

Результаты лабораторных исследований по определению качественного состава сточной воды, представляющей собой смесь трех видов стоков, представлены в табл. 2.

При этом соотношение объемов стоков в смеси по расходу составляло П:К:М = 85:12:3.

В связи с высоким содержанием железа и низким значением pH в смеси сточных вод первым этапом очистки была выбрана щелочная обработка стоков следующими реагентами:

- 1) 10%-й раствор гидроксида натрия NaOH – основной реагент;
- 2) 0,1%-й раствор флокулянта Суперфлок А-100 – вспомогательный реагент для улучшения осаждения образовавшихся гидроксидов.

Таблица 2

**Качественный состав исходной сточной воды**

Показатель	Проба		
	П	П + К	П + К + М
рН	1,58	0,9	1,18
Взвешенные вещества, мг/дм <sup>3</sup>	382	1256	2120
ХПК, мгО/дм <sup>3</sup>	220	1937	2150
Железо общее, мг/дм <sup>3</sup>	512	400	522
АПАВ, мг/дм <sup>3</sup>	–	1228	220
Медь, мг/дм <sup>3</sup>	–	–	121

Так как перевод ионов тяжелых металлов в нерастворимые формы происходит в щелочной среде, то доза 10%-го раствора NaOH была экспериментально подобрана для доведения рН стоков до значения 9–10 и составила по сухому веществу 20 г/дм<sup>3</sup>. Доза флокулянта была принята 0,005 г/дм<sup>3</sup>.

Исходные стоки, отобранные после различных технологических процессов, смешивались в необходимом соотношении и разливались по цилиндрам, в которые добавляли требуемые количества растворов реагентов. После перемешивания сточная вода отстаивалась в течение 60 мин, а затем фильтровалась. По прошествии часа в профильтрованной воде измерялись требуемые показатели качества.

Результаты исследования качественного состава профильтрованной воды приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Результаты исследования качественного состава профильтрованной воды**

Показатель	Результат измерений	Требования по сбросу в хозяйственно-бытовую сеть канализации по РФ
рН	9,56	6–9
Взвешенные вещества, мг/дм <sup>3</sup>	25	300
ХПК, мгО/дм <sup>3</sup>	301	500
Железо общее, мг/дм <sup>3</sup>	1,31	3
АПАВ, мг/дм <sup>3</sup>	46	10
Медь, мг/дм <sup>3</sup>	0,2	0,5

Согласно данным табл. 3, сточная вода не соответствует нормативным требованиям сброса в хозяйственно-бытовую сеть по показателям рН и АПАВ, поэтому в качестве второго этапа очистки было выбрано окисление загрязнений реагентом анолитом.

Доза анолита была подобрана экспериментально до достижения требуемого значения рН (в интервале от 6 до 9) и составила по сухому веществу 0,13 г/дм<sup>3</sup>. Одновременно для снижения АПАВ осуществлялся барботаж сжатым воздухом в течение 20 мин. Результаты исследования состава сточных вод после окисления приведены в табл. 4.

После двух ступеней очистки удалось добиться снижения концентраций: ХПК – на 88,9 %, взвешенных веществ – на 99,5 %, общего железа – на 99,8 %, АПАВ – на 95,7 %, ионов меди – на 99,9 %, при этом  $pH = 7,8$ . Данная технология очистки воды позволила получить сточные воды с концентрациями загрязнений, соответствующими нормативным требованиям ПДК по сбросу сточных вод в сеть городской канализации.

Таблица 4

**Исследование качественного состава сточных вод после окисления**

Показатель	Результат измерений	Требования по сбросу в хозяйственно-бытовую сеть канализации по РФ
$pH$	7,80	6–9
Взвешенные вещества, $мг/дм^3$	10	300
ХПК, $мгО/дм^3$	237	500
Железо общее, $мг/дм^3$	0,8	3
АПАВ, $мг/дм^3$	9,5	10
Медь, $мг/дм^3$	0,1	0,5

На основании полученных результатов построен график снижения концентрации загрязнений на предлагаемых этапах обработки сточных вод (рис. 1, 2).

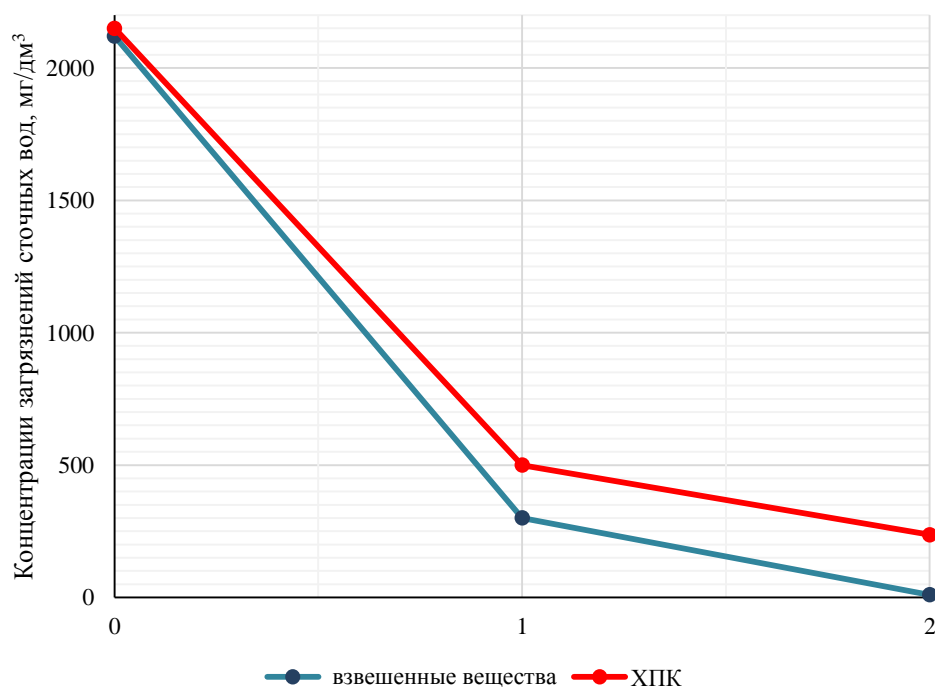


Рис. 1. График снижения концентрации взвешенных веществ и ХПК на предлагаемых этапах обработки сточных вод. Стадии очистки: 1 – химическое осаждение; 2 – окисление

Согласно проведенным исследованиям предложена технологическая схема очистки производственных сточных вод гальванического производства, представленная на рис. 3.

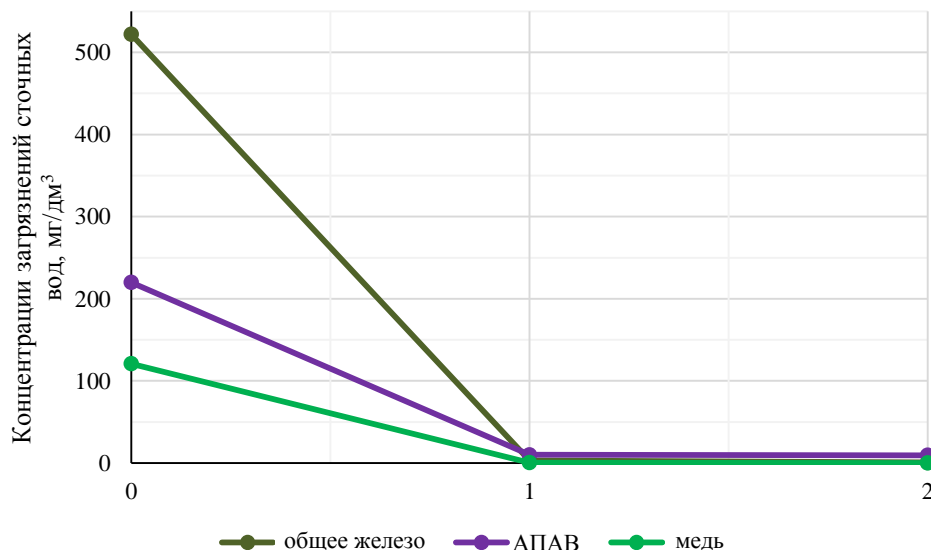


Рис. 2. График снижения концентрации общего железа, меди и АПАВ на предлагаемых этапах обработки сточных вод. Стадии очистки: 1 – химическое осаждение; 2 – окисление

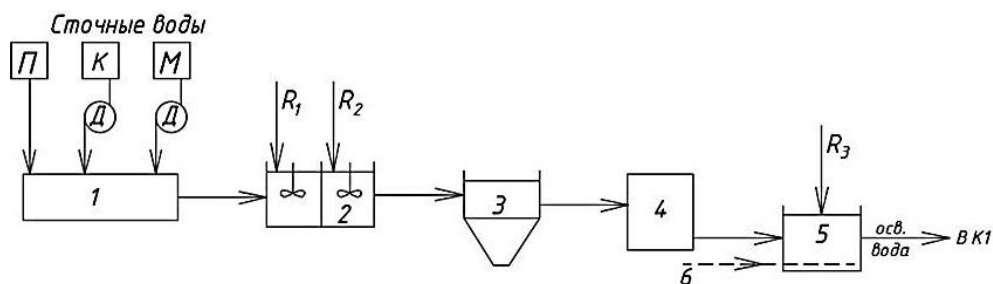


Рис. 3. Технологическая схема очистки сточных вод гальванического производства: П, К, М – потоки сточных вод, образующихся на предприятии; Д – насосы-дозаторы;  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  – реагенты для обработки сточных вод (NaOH, флокулянт, анолит); 1 – усреднитель; 2 – смеситель; 3 – отстойник; 4 – фильтр; 5 – контактная камера; б – подача сжатого воздуха

### Заключение

На основании проведенных исследований по определению оптимальной технологии очистки сточных вод гальванического производства можно сделать следующие выводы:

1. Для сточных вод гальванического производства омеднения проволоки характерны повышенные концентрации металлов, органических соединений,

поверхностно-активных веществ, а также низкие значения pH (не более 2). Кроме того, сточные воды характеризуются высокой степенью неравномерности поступления на очистку.

2. Экспериментально определена оптимальная доза 10%-го раствора гидроксида натрия, которая составила по сухому веществу 20 г/дм<sup>3</sup>. При совместной реагентной обработке стоков растворами щелочи и флокулянта получена высокая эффективность по снижению концентрации: общего железа – на 99,8 %, взвешенных веществ – на 99,5 %, ХПК – на 88,9 %, ионов меди – на 99,9 %.

3. Для стабилизации pH, окисления органических веществ и снижения концентрации АПАВ сточная вода на втором этапе подвергалась окислению анолитом дозой по сухому веществу 0,13 г/дм<sup>3</sup> совместно с постоянным барботажем сжатым воздухом в течение 20 мин. Это позволило снизить АПАВ на 95,7 %, pH стоков составила 7,8.

4. Предложена технологическая схема очистки производственных сточных вод гальванического производства для сброса стоков в систему хозяйственно-бытовой канализации города, включающая на первом этапе химическое осаждение тяжелых металлов, на втором – окисление и фильтрование стоков.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Barkan M., Kornev A. Development of new technological solutions for recovery of heavy non-ferrous metals from technogenic waste of electroplating plants and sludge of water treatment systems // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. V. 2. P. 17–24.
2. Panayotova T., Dimova-Todorova M., Dobrevsky I. Purification and reuse of heavy metals containing wastewaters from electroplating plants // Desalination. 2007. V. 206. P. 135–140.
3. Fu F., Wang Q. Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review // Journal of Environmental Management. 2011. V. 92. P. 407–418.
4. Характеристика гальванического производства : [сайт]. URL: [https://studbooks.net/1000239/ekologiya/harakteristika\\_galvanicheskogo\\_proizvodstva](https://studbooks.net/1000239/ekologiya/harakteristika_galvanicheskogo_proizvodstva) (дата обращения: 20.03.2020).
5. Azimi A., Azari A., Rezakazemi M., Ansarpour M. Removal of Heavy Metals from Industrial Wastewaters: A Review // ChemBioEng Rev. 2017. V. 4. P. 1–24.
6. Kurniawan T.A., Chan G.Y.S., Lo W.-H., Babel S. Physico-chemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals // Chemical Engineering Journal. 2006. V. 118. P. 83–98.
7. Charentanyarak L. Heavy metals removal by chemical coagulation and precipitation // Water Science and Technology. 1999. V. 39. P. 135–138.
8. Chen Q., Luo Z., Hills C., Xue G., Tyrer M. Precipitation of heavy metals from wastewater using simulated flue gas: Sequent additions of fly ash, lime and carbon dioxide // Water Research. 2009. V. 43. P. 2605–2614.
9. Gunatilake S.K. Methods of Removing Heavy Metals from Industrial Wastewaters // Journal of Multidisciplinary Engineering Science Studies. 2015. V. 1. P. 8–12.
10. Alyüz B., Veli S. Kinetics and equilibrium studies for the removal of nickel and zinc from aqueous solutions by ion exchange resins // J. Hazard. Mater. 2009. V. 167. P. 482–488.
11. Kang S.Y., Lee J.U., Moon S.H., Kim K.W. Competitive adsorption characteristics of Co<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup>, and Cr<sup>3+</sup> by IRN-77 cation exchange resin in synthesized wastewater // Chemosphere. 2004. V. 56. P. 141–147.
12. Dąbrowski A., Hubicki Z., Podkościelny P., Robens E. Selective removal of the heavy metal ions from waters and industrial wastewaters by ion-exchange method // Chemosphere. 2004. V. 56. P. 91–106.
13. Motsi T., Rowson N.A., Simmons M.J.H. Adsorption of heavy metals from acid mine drainage by natural zeolite // Int. J. Miner. Process. 2009. V. 92. P. 42–48.

14. Ostroski I.C., Barros M.A.S.D., Silvab E.A., Dantas J.H., Arroyo P.A., Lima O.C.M. A comparative study for the ion exchange of Fe(III) and Zn(II) on zeolite NaY // *J. Hazard. Mater.* 2009. V. 161. P. 1404–1412.
15. Taffarel S.R., Rubio J. On the removal of  $Mn^{2+}$  ions by adsorption onto natural and activated Chilean zeolites // *Miner. Eng.* 2009. V. 22. P. 336–343.
16. Adhoum N., Monser L., Bellakhal N., Belgaied J.-E. Treatment of electroplating wastewater containing  $Cu^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$  and Cr(VI) by electrocoagulation // *Journal of Hazardous Materials.* 2004. V. 112. P. 207–213.
17. Al-Shannag M., Al-Qodah Z., Bani-Melhem K., Qtaishat M.R., Alkasrawi M. Heavy metal ions removal from metal plating wastewater using electrocoagulation: Kinetic study and process performance // *Chemical Engineering Journal.* 2015, V. 260. P. 749–756.
18. Chen G. Electrochemical technologies in wastewater treatment // *Separation and Purification Technology.* 2004. V. 38. P. 11–41.
19. Akbal F., Camci S. Copper, chromium and nickel removal from metal plating wastewater by electrocoagulation // *Desalination.* 2011. V. 269. P. 214–222.
20. Кузнецов В.В., Ефремова Е.Н., Колесников А.В., Ачкасов М.Г. Очистка сточных вод от поверхностно-активных веществ методами электроокисления и электрофлотации. Роль природы поверхностно-активного вещества // *Гальванотехника и обработка поверхностей.* 2016. Т. 24. С. 48–55.
21. Watcharasing S., Kongkowitz W., Chavadej S. Motor oil removal from water by continuous froth flotation using extended surfactant: Effects of air bubble parameters and surfactant concentration // *Separation and Purification Technology.* 2009. V. 70. P. 179–189.
22. Колесников В.А., Ильин В.И. Экология и ресурсосбережение в электрохимических производствах. Механические и физико-химические методы очистки промывных и сточных вод. Москва : РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2004. 220 с.
23. Al-Rashdi B.A.M., Johnson D.J., Hilal N. Removal of heavy metal ions by nanofiltration // *Desalination.* 2013. V. 315. P. 2–17.
24. Mohammad A.W., Teow Y.H., Ang W.L., Chung Y.T., Oatley-Radcliffe D.L., Hilal N. Nanofiltration membranes review: Recent advances and future prospects // *Desalination.* 2015. V. 356. P. 226–254.
25. Ng L.Y., Mohammad A.W., Ng C.Y. A review on nanofiltration membrane fabrication and modification using polyelectrolytes: Effective ways to develop membrane selective barriers and rejection capability // *Advances in Colloid and Interface Science.* 2013. V. 197–198. P. 85–107.
26. Shenvi S.S., Isloor A.M., Ismail A.F. A review on RO membrane technology: Developments and challenges // *Desalination.* 2015. V. 368. P. 10–26.
27. Joo S.H., Tansel B. Novel technologies for reverse osmosis concentrate treatment: A review // *Journal of Environmental Management.* 2015. V. 150. P. 322–335.
28. Gode F., Pehlivan E. Removal of chromium(III) from aqueous solutions using Lewatit S 100: The effect of pH, time, metal concentration and temperature // *Journal of Hazardous Materials.* 2006. V. 136. P. 330–337.

## REFERENCES

1. Barkan M., Kornev A. Development of new technological solutions for recovery of heavy non-ferrous metals from technogenic waste of electroplating plants and sludge of water treatment systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2018. V. 2. Pp. 17–24.
2. Panayotova T., Dimova-Todorova M., Dobrevsky I. Purification and reuse of heavy metals containing wastewaters from electroplating plants. *Desalination.* 2007. V. 206. Pp. 135–140.
3. Fu F., Wang Q. Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. *Journal of Environmental Management.* 2011. V. 92. Pp. 407–418.
4. Kharakteristika gal'vanicheskogo proizvodstva [Electroplating plant characterization]. Available: [https://studbooks.net/1000239/ekologiya/harakteristika\\_galvanicheskogo\\_proizvodstva](https://studbooks.net/1000239/ekologiya/harakteristika_galvanicheskogo_proizvodstva) (accessed March 20, 2020).
5. Azimi A., Azari A., Rezakazemi M., Ansarpour M. Removal of heavy metals from industrial wastewaters: A review. *ChemBioEng Reviews.* 2017. V. 4. Pp. 1–24.

6. Kurniawan T.A., Chan G.Y.S., Lo W.-H., Babel S. Physicochemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals. *Chemical Engineering Journal*. 2006. V. 118. Pp. 83–98.
7. Charemtanyarak L. Heavy metals removal by chemical coagulation and precipitation. *Water Science and Technology*. 1999. V. 39. Pp. 135–138.
8. Chen Q., Luo Z., Hills C., Xue G., Tyrer M. Precipitation of heavy metals from wastewater using simulated flue gas: Sequent additions of fly ash, lime and carbon dioxide. *Water Research*. 2009. V. 43. Pp. 2605–2614.
9. Gunatilake S.K. Methods of Removing heavy metals from industrial wastewaters. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science Studies*. 2015. V. 1. Pp. 8–12.
10. Alyüz B., Veli S. Kinetics and equilibrium studies for the removal of nickel and zinc from aqueous solutions by ion exchange resins. *Journal of Hazardous Materials*. 2009. V. 167. Pp. 482–488.
11. Kang S.Y., Lee J.U., Moon S.H., Kim K.W. Competitive adsorption characteristics of  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ , and  $\text{Cr}^{3+}$  by IRN-77 cation exchange resin in synthesized wastewater. *Chemosphere*. 2004. V. 56. Pp. 141–147.
12. Dąbrowski A., Hubicki Z., Podkościelny P., Robens E. Selective removal of the heavy metal ions from waters and industrial wastewaters by ion-exchange method. *Chemosphere*. 2004. V. 56. Pp. 91–106.
13. Motsi T., Rowson N.A., Simmons M.J.H. Adsorption of heavy metals from acid mine drainage by natural zeolite. *International Journal of Mineral Processing*. 2009. V. 92. Pp. 42–48.
14. Ostroski I.C., Barros M.A.S.D., Silvab E.A., Dantas J.H., Arroyo P.A., Lima O.C.M. A comparative study for the ion exchange of Fe(III) and Zn(II) on zeolite NaY. *Journal of Hazardous Materials*. 2009. V. 161. Pp. 1404–1412.
15. Taffarel S.R., Rubio J. On the removal of  $\text{Mn}^{2+}$  ions by adsorption onto natural and activated Chilean zeolites. *Minerals Engineering*. 2009. V. 22. Pp. 336–343.
16. Adhoum N., Monser L., Bellakhal N., Belgaied J.-E. Treatment of electroplating wastewater containing  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  and  $\text{Cr(VI)}$  by electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*. 2004. V. 112. Pp. 207–213.
17. Al-Shannag M., Al-Qodah Z., Bani-Melhem K., Qtaishat M.R., Alkasrawi M. Heavy metal ions removal from metal plating wastewater using electrocoagulation: Kinetic study and process performance. *Chemical Engineering Journal*. 2015, V. 260. Pp. 749–756.
18. Chen G. Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*. 2004. V. 38. Pp. 11–41.
19. Akbal F., Camcı S. Copper, chromium and nickel removal from metal plating wastewater by electrocoagulation. *Desalination*. 2011. V. 269. Pp. 214–222.
20. Kuznetsov V.V., Efremova E.N., Kolesnikov A.V., Achkasov M.G. Oчистка стоchnыkh vod ot poverkhnostno-aktivnykh veshchestv metodami elektrokisleniya i elektroflotatsii. Rol' prirody poverkhnostno-aktivnogo veshchestva [Wastewater treatment of surfactants by electro-oxidation and electro-flotation. The role of the surfactant nature]. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverkhnosti*. 2016. V. 24. Pp. 48–55. (rus)
21. Watcharasing S., Kongkowitz W., Chavadej S. Motor oil removal from water by continuous froth flotation using extended surfactant: Effects of air bubble parameters and surfactant concentration. *Separation and Purification Technology*. 2009. V. 70. Pp. 179–189.
22. Kolesnikov V.A., Il'in V.I. Ekologiya i resursoberezhenie v elektrokhimicheskikh proizvodstvakh. Mekhanicheskie i fiziko-khimicheskie metody oчistki promyvnykh i stochnykh vod [Ecology and resource conservation in electrochemical production. Mechanical and physico-chemical methods for wastewater and effluent treatment]. Moscow, 2004. 220 p. (rus)
23. Al-Rashdi B.A.M., Johnson D.J., Hilal N. Removal of heavy metal ions by nanofiltration. *Desalination*. 2013. V. 315. Pp. 2–17.
24. Mohammad A.W., Teow Y.H., Ang W.L., Chung Y.T., Oatley-Radcliffe D.L., Hilal N. Nanofiltration membranes review: Recent advances and future prospects. *Desalination*. 2015. V. 356. Pp. 226–254.
25. Ng L.Y., Mohammad A.W., Ng C.Y. A review on nanofiltration membrane fabrication and modification using polyelectrolytes: Effective ways to develop membrane selective barriers and rejection capability. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2013. V. 197–198. Pp. 85–107.

26. Shenvi S.S., Isloor A.M., Ismail A.F. A review on RO membrane technology: Developments and challenges. *Desalination*. 2015. V. 368. Pp. 10–26.
27. Joo S.H., Tansel B. Novel technologies for reverse osmosis concentrate treatment: A review. *Journal of Environmental Management*. 2015. V. 150. Pp. 322–335.
28. Gode F., Pehlivan E. Removal of chromium(III) from aqueous solutions using Lewatit S 100: The effect of pH, time, metal concentration and temperature. *Journal of Hazardous Materials*. 2006. V. 136. Pp. 330–337.

#### Сведения об авторах

Белова Лариса Владимировна, канд. техн. наук, доцент, Тюменский индустриальный университет, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38, beloalv@tyuiu.ru

Вялкова Елена Игоревна, канд. техн. наук, доцент, Тюменский индустриальный университет, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38, vyalkova-e@yandex.ru

Глущенко Екатерина Сергеевна, ассистент, Тюменский индустриальный университет, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38, ekaterina.gluschenko.1997@mail.ru

Осипова Елена Юрьевна, канд. геол.-минерал. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, kyky60@bk.ru

#### Authors Details

Larisa V. Belova, PhD, A/Professor, Industrial University of Tyumen, 38, Volodarskii Str., 625000, Tyumen, Russia, beloalv@tyuiu.ru

Elena I. Vialkova, PhD, A/Professor, Industrial University of Tyumen, 38, Volodarskii Str., 625000, Tyumen, Russia, vyalkova-e@yandex.ru

Ekaterina S. Glushchenko, Assistant Lecturer, Industrial University of Tyumen, 38, Volodarskii Str., 625000, Tyumen, Russia, ekaterina.gluschenko.1997@mail.ru

Elena Y. Osipova, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, kyky60@bk.ru