

УДК 66.081.6
DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-1-290-296

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕМБРАННЫХ МЕТОДОВ В ПРОЦЕССЕ ОЧИСТКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД ПРОИЗВОДСТВА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

© К.В. Шестаков, С.И. Лазарев, И.В. Хорохорина, Д.С. Лазарев

Представлен обзор наиболее распространенных методов промышленной очистки сточных вод и промышленных растворов производства печатных плат. Приведены экспериментальные данные по обратнoосмотическому разделению натрийсодержащих растворов. Указаны достоинства, недостатки методов очистки, а также тенденции развития мембранной очистки сточных вод.

Ключевые слова: печатные платы; промышленные растворы; сточные воды; очистка; мембрана; электромембранные процессы.

Очистка сточных вод и промышленных растворов занимает одну из ведущих ролей в производственном процессе каждого предприятия, использующего технологические воды, например, в области производства печатных плат или гальванопроизводств. Для них существуют различные способы очистки загрязненных сточных вод. К данным способам можно отнести мембранные методы, реагентный, биохимический, биологический, физико-химические и т. д. [1].

Воды рек, морей и океанов интенсивно загрязняются промышленными выбросами сточных вод из-за неотработанной технологии очистки стоков предприятий, которые экономически не заинтересованы в переоборудовании старых очистных станций и сооружений. Бесконтрольный сброс производственных сточных вод с территории таких предприятий превращает поверхностную воду в источник повышенной опасности, что в свою очередь приводит человека к оправданной заботе о собственном здоровье, которая выражается в применении для обработки воды и стоков традиционных и перспективных технологий ее очистки [2].

Внедрение ресурсосберегающих и безотходных технологий во всех сферах производственной деятельности относится к основным направлениям государственной политики в области экологии. Так, например, федеральным законом «Об охране окружающей среды» введены новые принципы охраны окружающей среды, в т. ч. обязанность использования наилучших существующих технологий, имеющих природоохранный эффект [3].

В последние годы в нашей стране после затяжного спада наблюдается ощутимый подъем электронной промышленности, развитие производства и появление новых технологий. Расширяется деятельность НИИ и КБ, в которых идет работа над новыми проектами – инженерные разработки, связанные как с государственными программами развития, так и с коммерческими планами частных фирм [4]. Например, в Тамбовской области в настоящее время располагаются два крупных предприятия, занимающихся производством и выпуском печатных плат – АО «Тамбовский завод

«Октябрь», ПАО «Электроприбор». Продукция вышеуказанных предприятий охватывает широкий спектр товаров, начиная от товаров народного потребления и заканчивая радиоэлектроникой для оборонно-промышленного комплекса.

В процессе производства печатных плат происходит множество химико-технологических процессов, в ходе которых образуются промышленные растворы и сточные воды с содержанием различных загрязняющих и вредных веществ, таких как ионы тяжелых металлов (ИТМ), органические загрязнители и т. д.

Наибольшей экологической опасностью обладают рабочие растворы для металлизации отверстий печатных плат, которые содержат ионы меди, формальдегид и комплексообразователи. Высокой экологической опасностью обладают также растворы для гальванических покрытий медью, никелем, золотом, сплавом олово-свинец, сильные кислоты и сложные органические добавки для придания металлическим покрытиям специальных свойств.

Очень важный для производства многослойных печатных плат процесс окислирования внутренних слоев выполняется также с использованием токсичных и опасных химических веществ, таких как сильные кислоты и щелочи, хлорид натрия, диметиламиноборан [5].

В табл. 1 представлены токсикологические характеристики и удельные показатели выделения основных загрязняющих веществ на 1 м² изготовленных печатных плат [6].

Наиболее распространенным методом очистки сточных вод является реагентный метод. Суть этого метода заключается в том, что при добавлении реагентов в промышленные растворы находящиеся в них растворенные вещества переводятся в нерастворимое состояние и затем выводятся в виде осадков [7].

В качестве реагентов используют гидроксиды кальция и натрия, сульфиды натрия, феррохромовый шлак и др. Наиболее широкое распространение для осаждения металлов получил гидроксид кальция, который осаждает ионы металла в виде гидроксидов.

Таблица 1

Концентрация загрязняющих веществ в сточных водах производства печатных плат

Наименование загрязняющих веществ	Класс опасности по ГОСТ 12.1.007-76	Предельно допустимая концентрация в воде в зонах населенных мест, мг/л	Количество выделяющихся веществ, г/м ²
Аммиак водный	4	2	60
Аммония соли	1	1	75
Ангидрид хромовый	1	0,1	5
Перекись водорода	2	–	15
Кислота муравьиная	2	3,5	8
Кислота серная	2	300	500
Кислота соляная	2	500	700
Натрий углекислый	3	120	5
Нагр едкий	2	120	50
Олово	3	2	14
Соли углекислые	3	120	20
Свинец	1	0,1	10
Соли никеля	1	0,1	1
Соли меди	2	0,001	100

Достоинствами данного метода являются универсальность, широкий интервал начальных концентраций ИТМ, отсутствие необходимости разделения промывных вод и концентратов, простота эксплуатации.

Недостатками метода будут значительный расход реагентов, дополнительное загрязнение сточных вод, громоздкость оборудования, повышенное содержание, из-за которого очищенную воду нельзя вернуть в оборотный цикл, значительное затруднение вызывает извлечение тяжелых металлов из шлама [8].

Определенный интерес в области очистки сточных вод в последнее время вызывает технология выделения из стоков различных гальванопроизводств тяжелых цветных металлов при помощи биохимического метода, основанного на использовании сульфатовосстанавливающих бактерий.

Метод обладает рядом достоинств, таких как простота технологического оформления процесса и высокая эффективность, но есть и недостатки. Так, снижение концентраций ионов тяжелых металлов, в частности таких, как хром, составило 100 мг/л. Данный факт говорит о том, что данный метод нельзя признать оптимальным, учитывая реальную концентрацию ионов шестивалентного хрома, которая составляет 200–300 мг/л [9].

Еще одной категорией очистных методов очистки являются сорбционные способы. Первым способом является адсорбционный метод, где в качестве сорбентов используются различные активированные угли, синтетические сорбенты, отходы производства (зола, шлаки, опилки и др.).

К положительным качествам адсорбционного метода можно отнести очистку сточных вод до предельно допустимых концентраций (ПДК), возможность совместного удаления различных по природе примесей, регенерацию сорбированных веществ и возврат очищенной воды после корректировки pH.

Недостатками данного метода являются дороговизна и дефицитность сорбентов, громоздкость оборудования и большой расход реагентов для регенерации сорбентов. Помимо этого происходит образование вторичных отходов, требующих дополнительной очистки [9].

Другим методом ионообменного извлечения металлов из сточных вод является способ, основанный на взаимодействии очищаемого раствора с некоторой твердой фазой, состоящей из веществ, которые позволяют обменивать содержащиеся в фазе ионы с теми, которые присутствуют в очищаемом растворе. Иониты делятся на 2 типа – катиониты и аниониты. В процессе фильтрования обменные катионы и анионы заменяются катионами и анионами, извлекаемыми из сточных вод. Это требует с некоторой периодичностью восстанавливать изначальное количество ионитов, что приводит к истощению обменной способности [10].

Достоинства метода заключаются в возможности очистки сточных вод до требований ПДК, утилизации тяжелых металлов, а также возврате до 95 % очищенной воды в оборот.

К недостаткам относятся необходимость предварительной очистки сточных вод от масел, ПАВ, растворителей и т. д., большой расход реагентов для регенерации ионитов и обработки смол.

В настоящее время активно используются электрохимические методы выделения тяжелых цветных металлов из сточных вод, например, катодное восстановление, анодное окисление, электрокоагуляция, электродиализ и электрофлуктуляция. Данные процессы протекают на электродах при пропускании через раствор постоянного электрического тока [7–9].

Метод электрокоагуляции основан на протекании постоянного электрического тока через хромсодержащие растворы гальваношламов. При этом анод подвергается электролитическому растворению, что влечет за собой образование ионов железа, выполняющих роль коагулянтов и восстановителей для ионов хрома [7–9].

Достоинствами метода являются высокая производительность, простота эксплуатации, очистка до требований ПДК, а также малые занимаемые площади и малая чувствительность к изменениям параметров процесса.

Недостатки метода – значительный расход электроэнергии и металлических анодов, повышенное содержание воды, которое влечет за собой невозможность возврата воды в оборотный цикл, пассивация

анодов. Также сюда можно отнести необходимость предварительного разбавления стоков [7–9].

Процессы очистки сточных вод методом электрофлотации основаны на использовании пузырьков газа, образующихся в результате электролиза воды и растворения электродов. Пузырьки кислорода или водорода поднимаются и флотируют взвешенные частицы, находящиеся в сточных водах.

Метод обладает достоинствами – низкий расход реагентов, простота эксплуатации, отсутствие вторичного загрязнения и высокая сочетаемость с другими методами. К недостаткам можно отнести малое снижение количества солей в стоках, значительные энергозатраты.

Электрохимическое окисление характеризуется процессами, в ходе которых ионы тяжелых металлов отдают аноду электроны. Все вещества, содержащиеся в сточных водах, во время электрохимического окисления распадаются, в результате чего образуются неокисленные и более простые вещества.

Преимуществами вышеуказанного метода выступают низкий расход реагентов, возможность извлечения металлов из концентрированных стоков, а также простота эксплуатации. К отказу от применения электрохимического окисления могут подтолкнуть неэкономичность очистки разбавленных сточных вод и дефицит анодного материала.

Значительная часть исследований в области очистки сточных вод посвящена методам мембранной очистки. Существуют различные методы мембранного разделения, но основными из них считаются следующие: обратный осмос, ультрафильтрация, микрофильтрация, диализ, электродиализ, испарение через мембраны.

Обратный осмос и ультрафильтрация представляют собой процессы, в ходе которых растворы фильтруются под давлением через полупроницаемые мембраны, причем превышающем осмотическое давление. Главное их различие заключается в размере выделяемых частиц. При обратном осмосе выделяемые частицы не превышают размеров молекул растворителя, в то время как при ультрафильтрации размер частиц на порядок больше [7].

Обратный осмос и ультрафильтрация привлекательны тем, что позволяют утилизировать тяжелые металлы, возвращать в оборотный цикл до 60 % очищенной воды. К недостаткам метода можно отнести высокие эксплуатационные требования, чувствительность мембран к изменению параметров, а также необходимость предварительной очистки сточных вод от масел, растворителей, органики и т. д. [11].

Одним из самых распространенных методов помимо обратного осмоса и ультрафильтрации является электродиализ. Данный метод основан на избирательном переносе ионов под действием электрического тока мембраны. Ионообменные мембраны проницаемы только для ионов, имеющих заряд того же знака, что и у подвижных ионов [7]. Достоинства метода – утилизация ценных металлов, повторное использование до 60 % очищенной воды, отсутствие фазовых переходов в процессе разделения. Недостатки данного метода аналогичны недостаткам обратного осмоса и ультрафильтрации, но помимо них наблюдаются высокие энергозатраты.

Помимо этого необходимо рассмотреть применимость различных методов очистки в зависимости от

типа загрязняющих веществ, образованных в промышленных растворах после процесса производства печатных плат.

В табл. 2 представлено соответствие различных методов очистки сточных вод возможным типам загрязнения при производстве печатных плат [12].

В процессе изготовления печатных плат на этапе травления используются или образуются в результате химических реакций различные неорганические соединения на основе Na и Cl [13], например, хлорид натрия (NaCl), сульфат натрия (Na_2SO_4), соляная (HCl) и серная (H_2SO_4) кислоты. В данной работе исследовалось влияние концентрации NaCl и Na_2SO_4 в исходном растворе на коэффициент задержания мембран МГА-100 и ОПМ-К в процессе электробаромембранной очистки.

Исследования были проведены по следующей методике. После того, как была произведена предварительная отмывка мембран от различных примесей сорбционного характера, происходила сборка разделительной ячейки с исследуемыми мембранами и ее подсоединение к экспериментальной установке. После этого происходила проверка герметичности отдельных узлов и ввод установки в рабочий режим. В заполненном раствором состоянии установка находилась до 18 часов.

Следующим этапом был предварительный опыт для установления постоянной производительности с коэффициентом задержания мембран. После этого была выполнена серия основных экспериментов, в которых отбирали пробы исходного раствора и пермеата, измеряли объемный расход пермеата, давление, температуру и контролировали расход разделяемого раствора. Анализ растворенных веществ в водной массе осуществляли по бихроматной окисляемости (ХПК) [14].

Экспериментальное исследование было проведено при следующих параметрах: давление – 4 МПа; температура – 20 °С; объем исходного раствора – $6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$.

Коэффициент задержания для каждого неорганического раствора определялся с учетом полученных концентраций NaCl, Na_2SO_4 в исходном растворе и в пермеате по формуле [15]:

$$R = 1 - \frac{C_{\text{пер}}}{C_{\text{исх}}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $C_{\text{исх}}$ – концентрация неорганических соединений в исходном растворе, кг/м^3 ; $C_{\text{пер}}$ – концентрация неорганических соединений в пермеате, кг/м^3 .

Результаты экспериментальных исследований влияния концентрации NaCl, Na_2SO_4 в исходном растворе на коэффициент задержания мембран МГА-100 и ОПМ-К приведены в графиках на рис. 1.

Проанализировав коэффициент задержания мембран МГА-100 и ОПМ-К при очистке неорганических растворов, применяемых при производстве печатных плат, установлено, что при увеличении концентрации хлорида натрия и сульфата натрия происходит снижение коэффициента задержания мембран МГА-100 и ОПМ-К, что ведет в свою очередь к снижению удельной производительности мембран.

Для полноты картины требуется анализ направления развития рынка очистного оборудования за последнее время. Сейчас основные тенденции развития в изучаемой области связаны с разработкой новых спо-

сособ электромембранного разделения и новых типов

мембран, усовершенствованием или разработкой электро-

Таблица 2

Соответствие методов очистки сточных вод производства печатных плат

Метод очистки \ Тип загрязнения	Тип загрязнения												
	Коллоидные частицы	Агрессивность среды	Масла	Фенолы	Высокое содержание органических примесей	Ионы тяжелых металлов	Цианиды	Хром (VI)	Хром (III)	Сульфаты	Хлориды	Общее солесодержание	Поверхностно-активные вещества
Биологическая очистка													
Вакуумное выпаривание													
Гравитационная сепарация													
Ионный обмен													
Коагуляция													
Микрофильтрация													
Наночистка													
Нейтрализация													
Обратный осмос													
Озонирование													
Осаждение													
Отстаивание													
Реагентный													
Сорбция на активированном угле													
Ультрафильтрация													
Фильтрация													
Флотация													
Химическое окисление													
Химическое восстановление													
Электродиализ													
Электрокоагуляция													
Электрофильтрация													
Электрофлотация													
Электрохимическое восстановление													
Электрохимическое окисление													

мембранных аппаратов и устройств. Этому свидетельствует проведенное патентное исследование, которое выявило большое количество патентов, зарегистрированных за последние 10 лет в данной области [16–18].

Основные тенденции развития мембранных технологий в очистке сточных вод в производстве гальваноплат:

1) разработка новых методик электромембранного разделения промышленных растворов;

2) усовершенствование или разработка новых электромембранных аппаратов и устройств по ряду направлений:

– увеличение площади соприкосновения мембраны и промышленного раствора в единице объема аппарата или устройства;

– повышение качества и эффективности разделения;

– снижение энергопотребления;

– снижение стоимости изготовления;

– разработка нового устройства или технологической схемы;

3) разработка новых типов мембран.

Проанализировав рынок очистного оборудования, можно сделать вывод, что сейчас помимо традиционных методов разделения растворов большое внимание уделяется перспективным электромембранным методам разделения, очистки и выделения веществ.

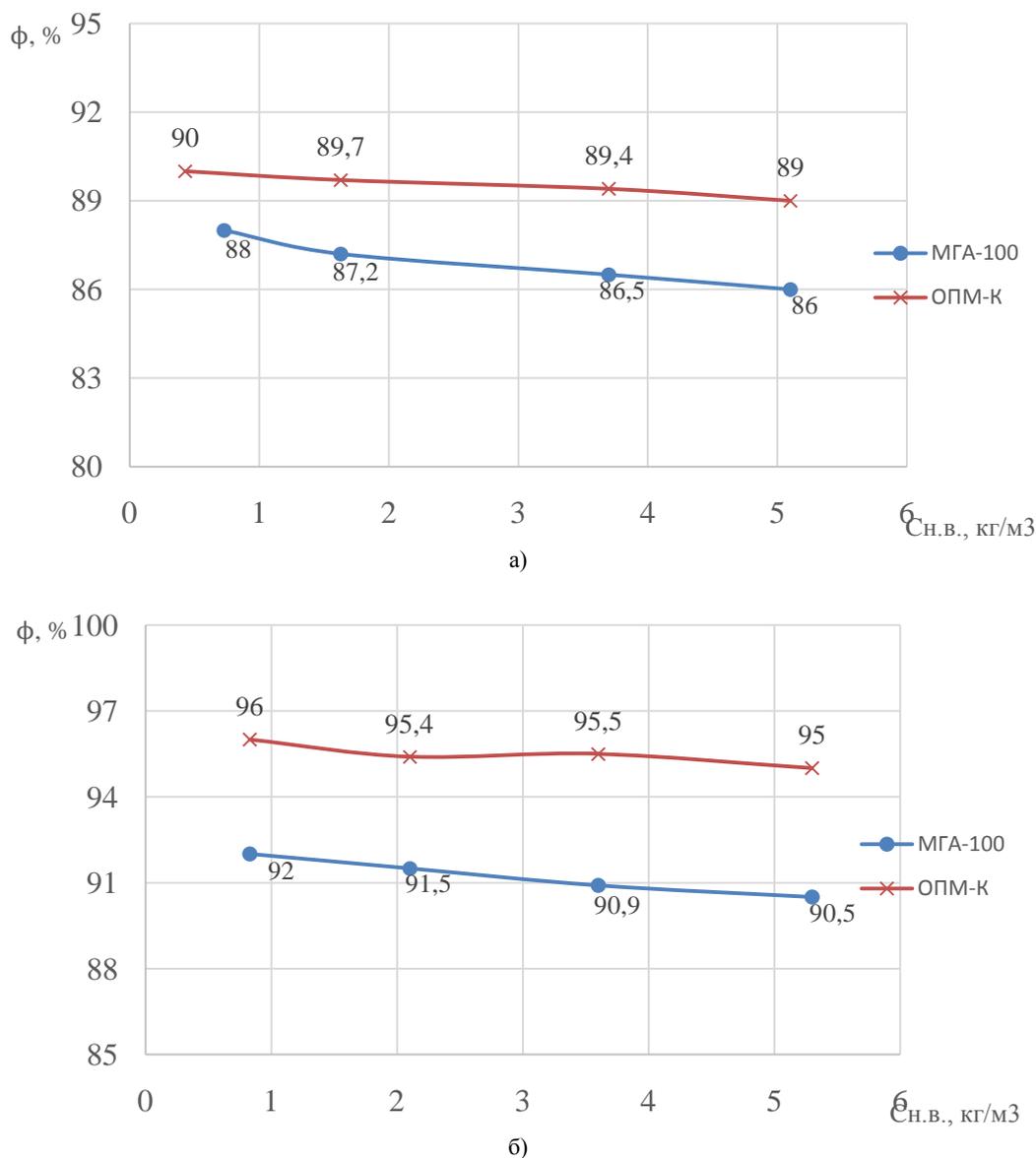


Рис. 1. Влияние концентрации неорганических веществ в исходном растворе на коэффициент задержания мембран МГА-100 и ОПМ-К: а – NaCl; б – Na₂SO₄

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Солдатенкова Е.А., Доросинский А.Ю. Проблемы очистки сточных вод на предприятиях г. Пензы // Надежность и качество: труды Междунар. симпозиума. 2008. Т. 2. С. 15-17.
2. Ковалев С.В. Научные основы разработки и интенсификации электробаромембранных процессов очистки технологических растворов и стоков производств электрохимического синтеза и гальванопокрытий: дис. ... д-ра тех. наук. Тамбов, 2015. 510 с.
3. Милешко Л.П., Сакевич О.В. Способы повышения экологической безопасности производства печатных плат // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2004. Т. 40. № 5. С. 117-118.
4. Акулин А. Рынок печатных плат России как показатель роста отечественной электроники // Производство электроники: технологии, оборудование, материалы. 2007. № 1. С. 11-14.
5. Озеров Г.Л. Экологические аспекты производства печатных плат: автореф. дис. ... канд. тех. наук. М., 2000.
6. ОСТ 107.460092.004-01-86. Платы печатные. Типовые технологические процессы. Часть первая. М., 1986.
7. Аксенов В.И., Ладыгичев М.Г. и др. Водное хозяйство промышленных предприятий: книга 1 / под ред. В.И. Аксенова. М.: Тепло-техник, 2005. 640 с.
8. Виноградов С.С. Экологически безопасное гальваническое. М.: Глобус, 2002. 208 с.
9. Будилковский Ю. и др. Применение ферроферригидрозоля для очистки промышленных стоков // Технологии в электронной промышленности. 2011. № 1. С. 15-17.
10. Шапошник В.А. Чистая вода // Соросовский образовательный журнал. 1998. № 9. С. 61-65.
11. Sowrirajan S. // Pure and Applied Chemistry. 1978. V. 50. P. 593-615.
12. Волокитина Ю.О., Френкель Е.Э., Кучер М.И. Методы очистки воды // Студенческий научный форум: материалы 7 Междунар. студенческой электрон. науч. конф. 2015. С. 10-12.
13. Крылов В.П. Технологии и подготовка производства печатных плат: учеб. пособие. Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2006. 64 с.
14. Membrane Systems for Wastewater Treatment. N. Y., 2005. 264 p.
15. Лазарев К.С., Ковалев С.В., Арзамасцев А.А. Исследования кинетических коэффициентов обратноосмотического разделения растворов на мембранах МГА-95, МГА-100 и ОПМ-К // Вестник ТГТУ. 2011. Т. 17. № 3. С. 726-734.
16. ФИПС. URL: www.fips.ru (дата обращения: 10.01.2016).
17. FREEPATENT. Патенты на изобретения РФ. URL: www.freepatent.ru (дата обращения: 10.01.2016).
18. Google Patents. URL: <https://patents.google.com/> (дата обращения: 10.01.2016).

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках государственного задания.

Поступила в редакцию 9 февраля 2016 г.

Шестаков Константин Валерьевич, Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Российская Федерация, аспирант, кафедра прикладной геометрии и компьютерной графики, e-mail: geometry@mail.nnn.tstu.ru

Лазарев Сергей Иванович, Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Российская Федерация, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой прикладной геометрии и компьютерной графики, e-mail: geometry@mail.nnn.tstu.ru

Хорохорина Ирина Владимировна, Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Российская Федерация, кандидат технических наук, младший научный сотрудник, кафедра прикладной геометрии и компьютерной графики, e-mail: geometry@mail.nnn.tstu.ru

Лазарев Дмитрий Сергеевич, Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Российская Федерация, студент, кафедра прикладной геометрии и компьютерной графики, e-mail: geometry@mail.nnn.tstu.ru

UDC 66.081.6
DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-1-290-296

THE POSSIBILITY OF USING MEMBRANE TECHNIQUES IN THE TREATMENT OF INDUSTRIAL WASTEWATER FROM THE PRODUCTION OF PRINTED CIRCUIT BOARDS

© K.V. Shestakov, S.I. Lazarev, I.V. Khorokhorina, D.S. Lazarev

An overview of the most common methods of industrial wastewater treatment and industrial solutions manufacture of printed circuit boards is presented. Experimental data on reverse osmosis separation of solutions of sodium are given. Advantages, disadvantages, methods of purification, as well as trends in the development of membrane wastewater treatment are specified.

Key words: printed circuit boards; industrial solutions; waste water; purification; membrane processes; electromembrane processes.

REFERENCES

1. Soldatenkova E.A., Dorosinskiy A.Yu. Problemy ochistki stochnykh vod na predpriyatiyakh g. Penzy. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma "Nadezhnost i kachestvo"*, 2008, vol. 2, pp. 15-17.
2. Kovalev S.V. *Nauchnye osnovy razrabotki i intensivifikatsii elektrobaromembrannykh protsessov ochistki tekhnologicheskikh rastvorov i stokov proizvodstv elektrokhimicheskogo sinteza i galvanopokrytiy*. Dissertatsiya ... doktora tehnikeskikh nauk. Tambov, 2015. 510 p.
3. Milesenko L.P., Sakevich O.V. Sposoby povysheniya ekologicheskoy bezopasnosti proizvodstva pechatnykh plat. *Izvestiya Yuzhnogo federalnogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2004, vol. 40, no. 5, pp. 117-118.
4. Akulin A. Rynok pechatnykh plat Rossii kak pokazatel rosta otechestvennoy elektroniki. *Proizvodstvo elektroniki: tekhnologii, oborudovanie, materialy*, 2007, no. 1, pp. 11-14.
5. Ozerov G.L. *Ekologicheskyye aspekty proizvodstva pechatnykh plat*. Avtoreferat dissertatsii ... kandidata tehnikeskikh nauk. Moscow, 2000.
6. OST 107.460092.004-01-86. *Platy pechatnyye. Tipovyye tekhnologicheskyye protsessy. Chast pervaya*. Moscow, 1986.
7. Aksenov V.I., Ladygichev M.G. et al. *Vodnoye khozyaystvo promyshlennykh predpriyatiy: kniga 1*. Moscow, Research-and-production publishing firm "Teplotekhnika", 2005. 640 p.
8. Vinogradov S.S. *Ekologicheskyye bezopasnoye galvanicheskoye*. Moscow, Globus Publ., 2002. 208 p.
9. Budilovskiy Yu. et al. Primeneniye ferroferridrozolya dlya ochistki promyshlennykh stokov. *Tekhnologii v elektronnoy promyshlennosti*, 2011, no. 1, pp. 15-17.
10. Shaposhnik V.A. Chistaya voda. *Sorosovskiy obrazovatelnyy zhurnal*, 1998, no. 9, pp. 61-65.
11. Sourirajan S. *Pure and Applied Chemistry*, 1978, vol. 50, pp. 593-615.
12. Volokitina Y.O., Frenkel E.E., Kucher M.I. Metody ochistki vody. *Materialy 7 Mezhdunarodnoy studencheskoy elektronnoy nauchnoy konferentsii "Studencheskiy nauchnyy forum"*, 2015, pp. 10-12.
13. Krylov V.P. *Tekhnologii i podgotovka proizvodstva pechatnykh plat*. Vladimir, Vladimir State University Publ., 2006. 64 p.
14. *Membrane Systems for Wastewater Treatment*. New York, 2005. 264 p.
15. Lazarev K.S., Kovalev S.V., Arzamastsev A.A. Issledovaniya kineticheskikh koeffitsientov obratnoosmoticheskogo razdeleniya rastvorov na membranakh MGA-95, MGA-100 i OPM-K. *Vestnik Tambovskogo tekhnicheskogo universiteta*, 2011, vol. 17, no. 3, pp. 726-734.
16. FIPS. Available at: www.fips.ru (accessed 10.01.2016).
17. FREEPATENT. Patenty na izobreteniya RF. Available at: www.freepatent.ru (accessed 10.01.2016).
18. Google Patents. Available at: <https://patents.google.com/> (accessed 10.01.2016).

Received 9 February 2016

Shestakov Konstantin Valeryevich, Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation, Post-graduate Student, Applied Geometry and Computer Graphics Department, e-mail: geometry@mail.nnn.tstu.ru

Lazarev Sergey Ivanovich, Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation, Doctor of Technics, Professor, Head of Applied Geometry and Computer Graphics Department, e-mail: geometry@mail.nnn.tstu.ru

Khorokhorina Irina Vladimirovna, Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation, Candidate of Technics, Junior Research Worker, Applied Geometry and Computer Graphics Department, e-mail: geometry@mail.nnn.tstu.ru

Lazarev Dmitriy Sergeevich, Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation, Student, Applied Geometry and Computer Graphics Department, e-mail: geometry@mail.nnn.tstu.ru