

УДК 669

**А. А. Нестер**

Хмельницкий национальный университет (Украина)

**РЕШЕНИЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ  
ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ МЕДИ ИЗ СТОЧНЫХ ВОД**

В данной работе изучены отдельные процессы регенерации медноаммиачных травильных растворов с получением плотных осадков меди. Сбрасывание отработанных травильных растворов приводит к загрязнению окружающей среды, требует значительных затрат на его обезвреживание на предприятии и на очистных сооружениях в местах расположения производств. Отмечено, что химическое корректирование травильных растворов приводит к образованию значительного количества сточных вод, в составе которых присутствуют тяжелые металлы, которые отрицательно влияют на грунты, подземные воды, растительный мир и человека, как вершину пищевой цепи. Представлена современная линия травления печатных плат с местами выхода сточных вод и предложена разработанная схема линии травления с отводом использованного раствора травления на регенерацию для восстановления рабочих показателей. Линия предусматривает повторное использование в технологическом процессе промывных вод для пополнения выведенного травильного раствора или после их восстановления и использования для промывки печатных плат. Для регенерации меднощелочного раствора на основе  $\text{CuCl}_2$  предложена установка непрерывного действия с использованием катода из нержавеющей стали или титана толщиной 3 мм и графитового анода толщиной 30 мм. Использование процесса с выделением меди плотными осадками позволяет облегчить снятие металла простыми механическими операциями и избежать сложной конструкции для изъятия меди в виде металлических порошков. Приведены отдельные размеры конструктивных элементов для обеспечения работы регенератора использованного травильного раствора.

**Ключевые слова:** регенерация, грунты, травильный раствор, титан, катод, промывные воды.

**A. A. Nester**

Khmelnytsky National University (Ukraine)

**ELECTROCHEMICAL SOLUTIONS  
TECHNOLOGIES TO REMOVE COPPER FROM WASTEWATER**

This scientific research presents some processes of regeneration of cuprammonium etching solutions with obtain dense precipitates of copper. Dumping of spent etching solutions leads to environmental pollution, requires significant costs for its neutralization at the enterprise and at the sewage treatment plants at the locations of production facilities. It is noted that the chemical correction of etching solutions leads to the formation of a big amount of wastewater, in the composition of which there are heavy metals that adversely affect the soil, groundwater, flora and man, as the top of the food chain. A modern etching line for printed circuit boards with wastewater discharge points and a scheme of etching line with removal of the used etching solution to recovery. The line provides for reuse wastewater to replenish the extracted etching solution or after their recovery it can be used for washing printed circuit boards. For the regeneration of  $\text{CuCl}_2$ -based on copper alkaline solution can be used continuous action using a cathode of stainless steel or titanium with a thickness of 3 mm and a graphite anode with a thickness of 30 mm. The process with the release of copper by dense sediments allows to facilitate the removal of metal by simple mechanical operations and to avoid a complex structure for the removal of copper in the form of powder. There are individual dimensions of the structural elements for the operation of the regenerator of the used pickling solution.

**Key words:** regeneration, soil, etching solution, titan, cathode, rinse water.

**Введение.** Гальваническое производство является одним из опаснейших источников загрязнения окружающей среды, главным образом поверхностных и подземных вод, вследствие образования большого объема сточных вод, а также большого количества твердых отходов, особенно от реагентного способа обезвреживания сточных вод [1]. Соединения ме-

таллов, которые выносятся сточными водами гальванического производства, достаточно вредно влияют на экосистему грунт – растение – животный мир – человек. Это обуславливает необходимость создания такой системы защиты окружающей среды, при которой исключалась бы возможность попадания медных соединений за пределы предприятия. Другими

словами, организация производства должна строиться таким образом, чтобы все растворы использовались длительное время (2–3 месяца), а вода была бы оборотной [2].

**Основная часть.** В настоящее время в связи с заменой серебра на более дешевый резист все чаще для защиты проводников применяются разнообразные сплавы олова (Sn-Ni, Sn-Co, Sn-Pb) [1, 2]. Однако эти сплавы нестойкие в кислых травильных растворах на основе  $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{CuCl}_2$ , которые в настоящее время являются главными в производстве печатных плат. Схемы печатных плат, защищенные металлическим резистом, можно травить в растворах на основе персульфата аммония, хлорида натрия, хромового ангидрата, в щелочных растворах, в которых окислителем является соединение двухвалентной меди. Использование этих растворов возможно благодаря образованию тех или других (в зависимости от состава раствора и марки резиста) тонких пленок слаборастворимых соединений на поверхности резиста [1, 2].

Травильные характеристики растворов, в том числе и медноаммиачных, снижаются по мере накопления в них стравленной меди, которая ведет к ухудшению характеристик изготовленных печатных плат. При высокой концентрации стравленной меди скорость травления становится настолько низкой, что последующее использование данного раствора становится невозможным [2].

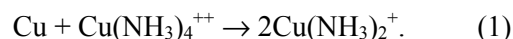
Сброс «истощенных» травильных растворов служит источником загрязнения окружающей среды; возникает необходимость в расходах достаточно больших средств на нейтрализацию сточных вод. Кроме того, медь, которая перешла в раствор в процессе травления, теряется бесповоротно, а на изготовление свежего травильного раствора нужно большое количество ценных химикатов. Все это ведет к ухудшению эффективности производства печатных плат.

Одним из наиболее желаемых путей решения проблемы восстановления травильных свойств растворов является поддержка их постоянных составляющих в течение всего процесса травления, ликвидации сточных вод и удаление стравленной меди, проведение электрохимической регенерации травильных растворов. Возможность электрохимически регенерировать свойства растворов на основе хлорного железа и хлорной меди доказана работами зарубежных и отечественных исследователей [3].

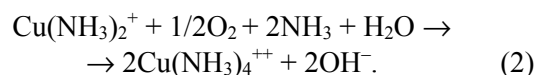
В наше время сконструированы и внедрены в производство установки электрохимической регенерации данных растворов, которые исключают вредные сбросы и удаляют медь в виде порошка [3, 4]. В настоящее время актуаль-

ным является вопрос о проведении электрохимической регенерации медноаммиачных травильных растворов с выделением меди в виде плотного осадка, что позволяет упростить конструкцию электролизера-регенератора: отпадает необходимость в блоке съема порошка, который имеет сложную конструкцию.

В патентной литературе описано множество средств регенерации травильных растворов, которые позволяют снизить расходы химикатов и провести утилизацию отходов. Методы регенерации, то есть возобновление рабочих характеристик травильных растворов, условно можно разделить на два: химический и электрохимический. Возможность и эффективность того или другого метода зависит от раствора, который применяется. Растворы на основе хлорной меди и медного купороса (щелочные) имеют возможность регенерации. Процесс травления в них можно выразить следующим уравнением:



Химическая регенерация может быть определена следующим уравнением:



Здесь ионы одновалентной меди окисляются кислородом воздуха или другим окислителем до двухвалентного состояния. Для поддержки постоянного состава раствора по компонентам, которые входят в его состав, кроме соли двухвалентной меди, их вводят в раствор в расчетном количестве, а затем раствор разбавляют. Для поддержки pH в раствор добавляют  $\text{NH}_4\text{OH}$ .

При химическом способе регенерации, хотя раствор и возобновляет свои травильные характеристики, необходимо постоянное удаление раствора из процесса, который ведет к затратам на нейтрализацию сточных вод и к потере меди. Кроме того, корректировка раствора по всем компонентам связана с его постоянным анализом и не всегда возвращает раствору его начальные свойства. При таком виде химической регенерации хотя и снижаются расходы ценных химикатов на приготовление раствора, стравленная медь все же теряется.

Наиболее экономически выгодным методом регенерации истощенных травильных растворов является электрохимический метод, при котором происходит одновременно выделение стравленной меди в чистом виде и возобновление травильных характеристик раствора. При этом способе экономическая эффективность обусловлена значительным снижением расходов на химикаты, уменьшением расходов на утилизацию отходов и возвращение меди в производство.

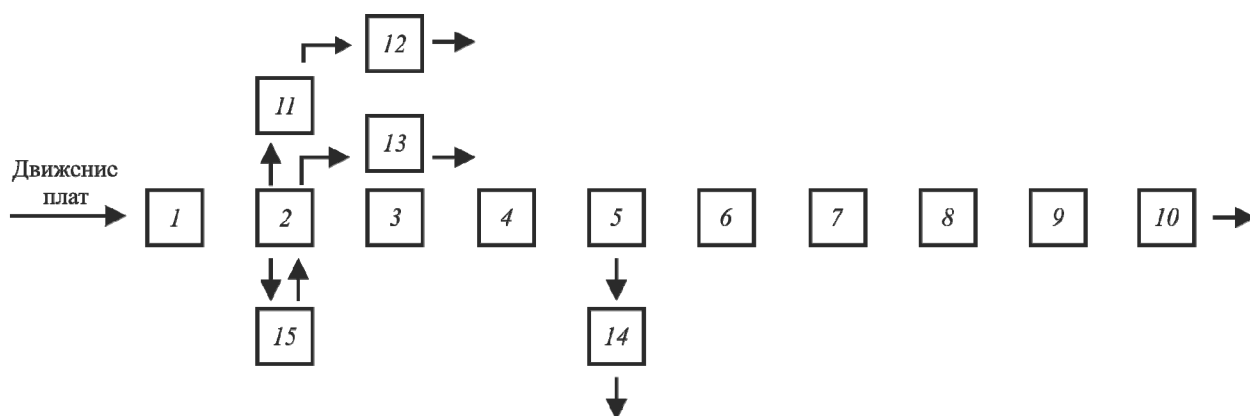


Рис. 1. Современная линия травления печатных плат с местами выхода сточных вод:

1 – модуль загрузки; 2 – травильный модуль; 3 – модуль освещения; 4 – обзорный модуль; 5 – 3-й модуль каскадной промывки; 6 – 2-й модуль каскадной промывки; 7 – 1-й модуль каскадной промывки; 8 – модуль горячей сушки; 9 – модуль холодной сушки; 10 – модуль выгрузки; 11 – очистные сооружения предприятия; 12 – очистные сооружения города; 13 – очистные сооружения (разведение); 14 – очистные сооружения предприятия; 15 – фильтрационные сооружения

Процесс электролиза может происходить с выделением и без выделения газов на аноде. Процесс без газовой выделением более желателен, потому что при этом из травильного раствора выделяется только медь и нет необходимости в корректировке раствора. На рис. 1 представлена типичная схема линии, которая используется в процессах производства плат. На схеме показаны отдельные направления выхода сточных вод, которые выделяются при работе оборудования.

В представленной схеме после операции травления и насыщения раствора соединениями меди в травильном модуле (поз. 2) уменьшается скорость травления и должна состояться замена травильного раствора свежим, способным проводить травление с достаточной скоростью. Отработанный раствор направляется на заводские очистные сооружения для предыдущей очистки, при которой остаток может быть сброшен в городскую канализацию (после достижения показателей, установленных городским водоканалом). После прохождения сточными водами очистных сооружений предприятия на его территории остаются шламы, которые наносят вред окружающей среде государства, предприятия, населению [4, 5, 6, 7, 8].

Для предложенной схемы регенерации отработанного травильного раствора в качестве рабочих электродов использовались только твердые электроды. Наиболее широко применяются для подобных целей платина и графит. Поэтому в данной работе они были взяты за основу. С целью замены дорогой платины была исследована возможность использования для анализа титанового электрода. Предварительно был проведен опыт коррозионного поведения титана в травильном растворе. Масса образца титанового электрода длиной 100 мм и диаметром 0,7 мм (0,2104 г) после 115-часовой

выдержки в травильном растворе вовсе не изменилась при взвешивании на аналитических весах. Это позволило использовать титановый электрод в травильном растворе как рабочий.

Автором предложена и исследована схема регенерации сточных вод от операций травления, промывки, с выделением металла – меди в листовом виде для возможной переплавки на металлургическом предприятии. Схема линии травления с отводом на регенерацию части отработанного раствора и промывных вод представлена на рис. 2.

Разработанная схема позволяет проводить регенерацию растворов в процессе травления и постоянной поддержки концентрации элементов, а значит, постоянную скорость травления плат. Одновременно схема такой линии позволяет использовать выделенную медь в процессах металлизации без сбросов сточных вод, не допуская загрязнения окружающей среды. Возможно также выделение меди на титановых катодах для использования в качестве вторичного металла при переплавке [2].

Исследование опытно-промышленной установки (состоит из выпускаемого комплекса модулей для щелочного травления печатных плат КМ-1 и присоединенного регенератора с устройством корректировки величины рН раствора) электрохимической регенерации травильных растворов проводили поиском рабочих режимов для разных концентраций. При постоянных скоростях протока (1–2 см/с) и температуре раствора +40°C определяли выход по току плотного осадка меди в зависимости от плотности тока и предусматривали следующие требования:

- 1) стабильность травильных характеристик в процессе эксплуатации;
- 2) возможность электрохимической регенерации.

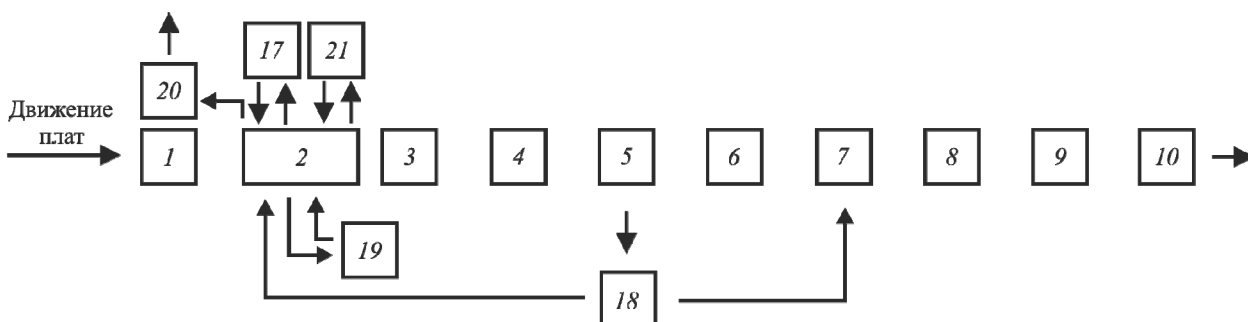


Рис. 2. Схема линии травления с отводом на регенерацию:

1 – модуль загрузки; 2 – травильный модуль; 3 – модуль освещения; 4 – обзорный модуль; 5 – 3-й модуль каскадной промывки; 6 – 2-й модуль каскадной промывки; 7 – 1-й модуль каскадной промывки; 8 – модуль горячей сушки; 9 – модуль холодной сушки; 10 – модуль выгрузки; 17 – регенератор травильного раствора; 18 – регенератор промывных вод; 19 – фильтрационная установка; 20 – очистные сооружения предприятия; 21 – установка нанесения покрытий (при необходимости)

Целью данной работы стало всестороннее испытание опытно-промышленного образца установки, выявление ее возможностей и определение технологических режимов ее работы. Испытания установки начинали с испытаний элементов ее конструкции: насосов, эжекторов, датчика травильной способности.

На основании исследований установки и математической модели процесса электрохимической регенерации определены технологические режимы работы установки с медноаммиачным раствором следующего состава, моль/л (табл. 1). Определены также отдельные конструктивные и технологические элементы установки регенерации, которые можно представить следующими данными:

- 1) скорость протока раствора 2 см/с;
- 2) температура раствора: 40°C;
- 3) выход по току для меди за 3,5 ч не менее 64%;
- 4) межэлектродное расстояние  $d = 20$  мм.

Для наиболее широко представленной линии травления производительностью 12 м<sup>2</sup>/ч проведены исследования и ниже представлена таблица соотношения влияния ширины катода  $A$  и их числа  $k$  к высоте (табл. 2).

Изложенное выше свидетельствует о возможном выделении меди из сточных вод и пополнении возможностей для переплавки. В Украине есть острая потребность в меди, которая используется очень широко в электротехнической промышленности и других отраслях. В то же время в Украине неизвестны разведанные месторождения медных руд. Перспективные и прогнозные ресурсы медных руд оценены: в Волынском регионе, на Донбассе и в Днепровско-Донецкой впадине в пределах Украинского щита в Средне-Приднепровском и Волынском регионах. Общие ресурсы руд Волынского района со средним содержанием меди 1,0% оцениваются в 28 млн т металла.

Таблица 1

Состав компонентов после внедрения схем регенерации

Компонент	Показатель
Аммиачный комплекс двухлористой меди (по металлу)	40–60
Аммоний хлористый	50–100
Аммиак водный (25%-ный) или жидкий синтетический	5–40
Кислота ортофосфорная	20–30
pH раствора	8,2–8,4

Таблица 2

Влияние ширины  $A$  и числа катодов на их высоту

$A$ , дм	Высота катода, $V_k$							
	число катодов, $n$							
	6	7	8	9	10	11	12	13
2,5	8,6	7,4	6,7	5,8	5,2	4,7	4,3	4,0
3,0	7,2	6,2	5,4	4,8	4,3	3,9	3,6	3,3
3,5	6,2	5,3	4,6	4,1	3,7	3,4	3,1	2,8

Примечание.  $A$  – ширина катода;  $V_k$  – высота катода, дм;  $n$  – число катодов.

Все изложенное свидетельствует о недостатке залежей медных руд в Украине. Ежегодные потребности Украины в этом металле составляют приблизительно 120–140 тыс. т, двадцать процентов из которых обеспечиваются собственным медным утилем, а остальные потребности в виде черновой меди приходится завозить из соседних России и Польши.

В Украине минерально-сырьевая база цветной металлургии недостаточна, и многие предприятия этой отрасли работают на привозном сырье или переплавляют утиль цветных металлов. При этом, по некоторым оценкам, общие расходы производства меди из вторичного сырья на 35–40% ниже, чем из первичного.

При размещении этих предприятий также учитываются потребительский, транспортный и экологический факторы. Цветная металлургия является загрязнителем окружающей среды и главным источником поступления тяжелых металлов.

Специфика твердых отходов производства заключается в том, что в малых количествах они не оказывают заметного влияния на окружающую среду, а в больших сосредоточениях становятся экологическим бедствием. Проблема утилизации отходов промышленного и бытового происхождения приобретает в данное время все более острый характер в связи с тем, что объемы генерирования отходов постоянно возрастают, тогда как темпы их переработки несравненно малы. В результате к настоящему времени накоплены сотни миллионов тонн разных твердых отходов, которые необходимо перерабатывать и обезвреживать. Масштабы ежегодного продуцирования и накопления твердых отходов требуют создания мощных перерабатывающих установок производительностью, измеренной миллионами тонн в год с их промышленным освоением. Это целесообразно осуществлять на базе уже имеющихся проектов, освоенных передовыми странами. Специфика твердых отходов производства заключается в том, что в малых количествах они не оказывают заметного влияния на окружающую среду, а в больших сосредоточениях становятся экологическим бедствием.

В то же время источником пополнения ресурсов утиля цветных металлов частично может стать производство плат и гальваники, где медь используется в качестве проводникового материала и стравливается в процессе подготовки поверхности к использованию (нанесение рисунка и стравливание).

Обследования показали, что предприятия, которые занимаются изготовлением печатных плат, сбрасывается в сточные воды целый спектр металлов: медь, железо, никель,

хром и т. д. Так, при годовой односменной работе линии травления печатных плат производительностью  $14 \text{ м}^2/\text{ч}$  будет изготовлено почти  $28\,000 \text{ м}^2$  заготовок, а количество выделенного металла (меди) составит приблизительно 14 т, что при цене 85 грн/кг составит  $14\,000 \text{ кг} \times 85 \text{ грн/кг} = 1\,190\,000 \text{ грн}$ . Или в долларовом эквиваленте \$44 000.

Этот металл может быть повторно использован при использовании решений электрохимической регенерации травильных растворов одновременно с основным процессом. Так, количество металла, которое будет стравливаться при возобновлении промышленного производства плат, может составить (при односменной работе и количестве линий в работе 350 шт.)  $14\,000 \text{ кг} \cdot 350 = 4\,900\,000 \text{ кг} = 4900 \text{ т}$ .

Негативной стороной производства печатных плат может стать образование шламов. Для примера рассмотрим состояние с образованием шламов при работе линий травления печатных плат. При производительности линии травления  $14 \text{ м}^2/\text{ч}$  количество шламов за 8 ч работы достигнет величины более 110 кг, что при месячной односменной работе составит 2400–2500 кг.

Современные предприятия, которые в последнее время производства время вырабатывали приблизительно  $4 \cdot 10^3 \text{ м}^2$  плат, накопили на своей территории по 1000–3000 т и более отходов в виде шламов, которые сохраняются в емкостях, полиэтиленовых мешках и попадают под действие атмосферных осадков. В процессе действия на них атмосферных осадков соли вымываются и переходят в грунт, поверхностные воды, загрязняя окружающую среду и повышая уровень экологической опасности. Поэтому электрохимическая регенерация растворов является основой для получения медного сырья и повышения экологической безопасности территорий производства плат.

Учитывая факт создания оборудования, которое представляется экологически безопасным и энергосберегающим, мы имеем возможность оценить, как обеспечиваются экономические показатели созданного на основе данного исследования оборудования. При этом мы должны учитывать конкретные параметры установок, которые создают возможность повторного использования водных растворов без сброса на очистные сооружения как предприятия, так и города.

При определении экономической целесообразности мы должны исходить из критерия уменьшения нанесения вреда окружающей среде. Расчет экономической эффективности от внедрения нового оборудования проводился на годовую программу производства заготовок и в долларовом эквиваленте составил \$63 000.

Таблица 3

## Результаты расчета суммарного индекса опасности шлама

Группа веществ	ПДК <sub>i</sub> , мг/кг	(S + C <sub>B</sub> ) <sub>i</sub> , мг/кг	K <sub>i</sub>	K
Соединения меди	3	73,98	0,0405	0,7575
		21,15	0,141	

Таблица 4

## Результаты расчета суммарного индекса опасности шлама производства плат и гальваники после внедрения мероприятий удаления меди

Группа веществ	ПДК <sub>i</sub> , мг/кг	(S + C <sub>B</sub> ) <sub>i</sub> , мг/кг	K <sub>i</sub>	K
Соединения меди	3	0,01	300,0	100
		0,03	100,0	

Внедрение новой технологии очистки сточных вод только одной установкой, кроме экономического эффекта, улучшит состояние окружающей среды и даст возможность реализации экологически безопасного процесса утилизации меди.

При оценке опасности для окружающей среды шлама-отходов производства плат и гальваники учитывают миграционную способность химических веществ в поверхностные и подземные воды, накопление в почве и растениях, которые выражаются через растворимость химических соединений в воде. Токсичность отходов характеризуется предельно допустимой концентрацией (ПДК) веществ в почве и их содержанием в общей массе шлама. Индекс опасности отдельного химического вещества определяется по формуле

$$K_i = \frac{\text{ПДК}_i}{(S + C_B)_i}, \quad (1)$$

где  $K_i$  – индекс опасности; ПДК<sub>i</sub> – предельно допустимая концентрация в почве опасного химического вещества, которое содержится в отходах, мг/кг почвы;  $S$  – коэффициент растворимости химического вещества в воде;  $C_B$  – содержание химического вещества в общей массе отходов, мг/кг;  $i$  – порядковый номер данного вещества.

Суммарный индекс опасности, определялся по формуле

$$K = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n K_i, \quad (2)$$

где  $n$  – количество опасных химических веществ, удерживающихся в шламе.

Результаты расчета суммарного индекса опасности шлама до удаления медных соединений на одном из предприятий Украины представлены в табл. 3.

После удаления медных соединений из сточных вод (не преобразованных в шламы) суммарный индекс опасности становится практически таким, который не несет опасности (табл. 4).

**Заключение.** Из всего вышеописанного можно сделать несколько выводов.

1. Созданное оборудование улучшает экологическую обстановку в районе расположения предприятия, о чем свидетельствуют результаты расчета суммарного индекса опасности шлама.

2. Установка легко может быть подсоединена к действующему оборудованию или работать автономно.

3. Регенерация травильного раствора позволит получать медь для последующей переплавки на металлургических предприятиях, металлизации плат.

## Список литературы

1. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні. URL: <http://old.menr.gov.ua/index.php/dopovid> (дата обращения: 08.01.2020).
2. Нестер А. А. Очистка стічних вод виробництва друкованих плат. Хмельницький, 2016. 219 с.
3. Нестер А. А., Евграшкина Г. П. Прогноз загрязнения машиностроительного предприятия шламами при производстве плат и гальваники // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. Вып. 6. С. 193–200.
4. Клячкин В. Н., Ширкунова К. С., Барт А. Д. Анализ стабильности химического состава сточных вод при производстве печатных плат. 2019. Т. 23, № 5. С. 47–51. URL: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-5-47-51> (дата обращения: 08.01.2020).
5. Пашаян А. А., Карманов Д. А. Утилизация гальванических стоков без образования гальваношламов. 2018. Т. 22, № 12. С. 19–21. URL: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2018-12-19-21> (дата обращения: 8.01.2020).

6. Пролейчик А. Ю., Гапоненков И. А., Федорова О. А. Извлечение ионов тяжелых металлов из неорганических сточных вод. 2018. Т. 22, № 3. С. 35–39. URL: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2018-3-35-39> (дата обращения: 20.12.2019).

7. Дорохина Е. Ю., Харченко С. Г. Экономика замкнутых циклов: проблемы и пути развития. 2017. Т. 21, № 3. С. 50–55. URL: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2017-3-50-55> (дата обращения: 19.12.2019).

8. Вершинина И. А., Мартыненко Т. С. Проблемы утилизации отходов и социально-экологическое неравенство. 2019. Т. 23, № 5. С. 52–55. URL: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-5-52-55> (дата обращения: 08.01.2020).

### References

1. *Natsional'na dopovid' pro stan navkolishn'ogo prirodного seredovishcha v Ukraini* [National pre-war about the camp of the large natural middle in Ukraine]. Available at: <http://old.menr.gov.ua/index.php/dopovidi> (accessed 08.01.2020) (In Ukrainian).

2. Nester A. A. *Ochistka stichnykh vod virobnitsva drukovanikh plat* [Cleaning of water of virobnittva druckovanich boards]. Khmelnytsky, 2016. 219 p. (In Ukrainian).

3. Nester A. A., Evgrashkina G. P. Forecast of contamination of the machine-building enterprise with slimes in the production of boards and electroplating. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki* [News of the TulState University. Technical science], 2017, issue 6, pp. 193–200 (In Russian).

4. Klachkin V. N., Shirkunova K. S., Bart A. D. *Analiz stabil'nosti khimicheskogo sostava stochnykh vod pri proizvodstve pechatnykh plat*. [Analysis of Stability of Chemical Composition of Waste Water in the Production of Printed Circuit Boards], 2019, vol. 23, no. 5, pp. 47–51 (In Russian). Available at: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-5-47-51> (accessed 08.01.2020).

5. Pashayan A. A., Karmanov D. A. *Utilizatsiya gal'vanicheskikh stokov bez obrazovaniya galvanoshlamov* [Disposal of galvanic effluents without formation of galvanic slums], 2018, vol. 22, no. 12, pp. 19–21 (In Russian). Available at: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2018-12-19-21> (accessed 08.01.2020).

6. Leutchik A. Y., Gaponenkov I. A., Fedorov O. A. *Izvlecheniye ionov tyazhelykh metallov iz neorganicheskikh stochnykh vod* [Extraction of heavy metal ions from inorganic waste water], 2018, vol. 22, no. 3, pp. 35–39 (In Russian). Available at: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2018-3-35-39> (accessed 20.12.2019).

7. Dorokhina E. Yu., Kharchenko S. G. *Ekonomika zamknutykh tsiklov: problemy i puti razvitiya* [Economics of closed cycles: problems and ways of development], 2017, vol. 21, no. 3, pp. 50–55 (In Russian). Available at: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2017-3-50-55> (accessed 19.12.2019).

8. Vershinina I. A., Martynenko T. S. *Problemy utilizatsii otkhodov i sotsial'no-ekologicheskoye neravenstvo* [Waste management problems and socio-ecological inequality], 2019, vol. 23, no. 5, pp. 52–55 (In Russian). Available at: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-5-52-55> (accessed 08.01.2020).

### Информация об авторе

**Нестер Анатолий Антонович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры охраны труда и безопасности жизнедеятельности. Хмельницкий национальный университет (29016, г. Хмельницкий, ул. Институтская, 11, Украина). E-mail: [nesteranatol111@gmail.com](mailto:nesteranatol111@gmail.com)

### Information about the author

**Nester Anatoliy Antonovich** – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor of Labor Protection. Khmelnytsky National University (11, Institutskaya str., 29015, Khmelnytskyi, Ukraine). E-mail: [nesteranatol111@gmail.com](mailto:nesteranatol111@gmail.com)

Поступила 11.01.2020