

УДК 54.057: 546.742

А.Ю. ДЖУЖА, студент гр.ТБ-41 (НИУ МИЭТ)

А.Д. КИРЬЯНОВА, студент гр. ТБ-11М (НИУ МИЭТ)

Научный руководитель В.И. КАРАКЕЯН, д.т.н., профессор (НИУ МИЭТ)  
г. Москва

## ОЦЕНКА ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЦИКЛИРОВАНИЯ НИКЕЛЯ ИЗ СТОКОВ ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Предприятия микроэлектроники, представляя собой неотъемлемую часть системы «человек-производство-окружающая среда (ЧПС)», является не только потребителем, но и загрязнителем ресурсов этой системы [1,2]. Сточные воды гальванических процессов на таких производствах содержат в своем составе различные примеси, зачастую потенциально опасные для человека и водной среды. Вместе с тем при очистке стоков безвозвратно теряется до 30% ценного исходного сырья (никеля, хрома, меди и др.). Возврат этих потерь в технологический процесс не только имеет эколого-экономический смысл, но и способствует повышению безопасности всего производства.

Эффективность любого природоохранного мероприятия, как правило, содержит три аспекта, определяющие безопасность системы ЧПС: социально-гигиенический (снижение заболеваемости населения и сокращение текучки кадров), экологический (сокращение сбросов загрязняющих веществ в воду; уменьшение потребления чистой воды) и экономический (предотвращение экологического ущерба водной среде, сокращение платы за сбросы и за воду (как следствие возврата последней в производство), получение прибыли от сбыта извлеченных из стоков полезных веществ).

В связи с трудностью формализации некоторых аспектов проблемы безопасности, обратимся к структурно-целевой модели – ««дереву» причин и последствий», позволяющему установить взаимосвязи между ними.

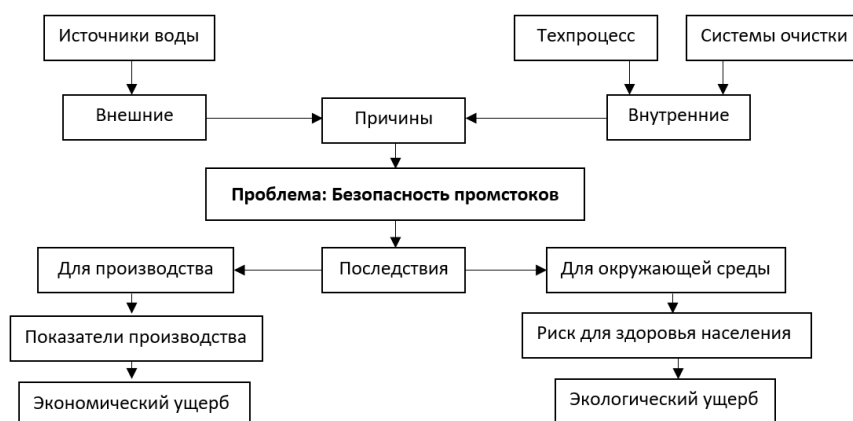


Рисунок 1. «Дерево» причин и последствий проблемы безопасности  
промстоков

В результате экспертной оценки причин и последствий установлено, что наиболее важными факторами, влияющими на безопасность промстоков, являются:

- технологический процесс с участвующими в нём веществами, определяющими качество продукции и затраты на ее получение;
- качество очистки промстоков от загрязнений, потенциально опасных для здоровья населения и приводящих к экологическому ущербу водной среде.

Иерархия задач для достижения главной цели, каковой является предотвращение загрязнения водной среды, может быть представлена в виде «дерева» целей и подцелей (см. рисунок 2)

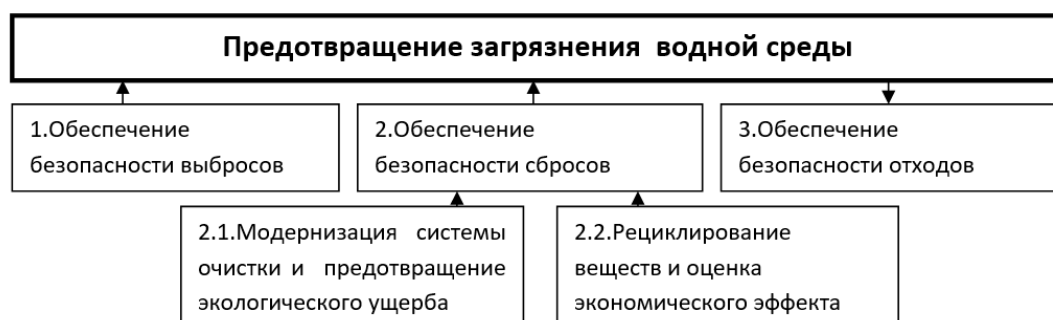


Рисунок 2. «Дерево целей» для решения проблемы повышения безопасности промстоков

Анализ результатов обработки экспертных заключений показал относительную незначительность целей 1 и 3, что вполне отражает реальную картину в техносфере. Хотя загрязненная атмосфера и твердые отходы могут оказывать влияние на состояние водной среды, оно представляется незначительным по сравнению с воздействием промстоков предприятия.

Достижение цели 2 возможно при решении двух взаимосвязанных задач: повышения эффективности системы очистки (за счет ее модернизации) и извлечения полезных веществ из стоков в процессе очистки последних. Экономическая эффективность модернизации в нашем случае определяется соотношением между её результатами в виде предотвращенного ущерба водной среде и затратами на её осуществление. Модернизация рассматривается в контексте предположения, что в её результате концентрации примесей в сбросах не превысят ПДК [3,4].

Предлагаемая нами инновация представляет собой многоцелевое природоохранное мероприятие в виде введения в производственную систему электролитической и ионообменной ступеней очистки стоков. Данное решение позволяет как снижать воздействие на окружающую среду, так и выполнять задачи ресурсосбережения посредством замкнутого водооборота и рекуперации никеля, содержащегося в сбросах [5].

Потребление воды гальваническим производством  $Q$  составляет  $10000 \text{ м}^3/\text{год}$  ( $10000000 \text{ л/год}$ ), из которых в результате мероприятия в

производство возвращается до 93% очищенной воды — это снижает затраты на свежую воду. Концентрация никеля  $C_{Ni}$  в стоках, равная 44 мг/л, позволяет при имеющемся годовом объеме оборотных вод извлекать данное вещество в количестве  $M_{Ni} = 10000000 \cdot 44 \text{ мг/л} = 440 \text{ кг/год}$ . Норматив сброса  $Ni_n = C_{Ni} \cdot Q = 0,01 \text{ мг/л} \cdot 10000000 = 100 \text{ кг/год}$ .

Предотвращенный экологический ущерб водным ресурсам  $\Delta U_{в}$ , планируемый в результате сбрасывания сточных вод, содержащих никель, рассчитывается на основании формулы:

$$\Delta U_{вр} = \rho \cdot \beta \cdot J_d \cdot (M_{баз} - M_m), \text{ руб.}, (1)$$

где  $\rho$  — показатель удельного ущерба водным ресурсам, наносимого единицей (условной тонной) приведённой массы загрязняющих веществ (руб./усл. т (в Зеленограде  $U_{уд}^в = 9480,1 \text{ руб./уст. т}$ ));  $\beta$  — коэффициент экологической ситуации и экологической значимости состояния водных объектов по бассейнам основных рек ( $\beta = 1,41$ );  $J_d$  — индекс-дефлятор по отраслям промышленности, устанавливаемый Минэкономикой России до территориальных природоохранных органов (принимается равным 1,04);  $M_{баз}$  — приведенная масса загрязняющих веществ базового варианта до модернизации, тыс. усл. т.;  $M_m$  — приведённая масса загрязняющих веществ после модернизации, тыс. усл. т. [6]

Приведенная масса загрязняющих веществ рассчитывается по формуле:

$$M_i = m_i \cdot D_i, (2)$$

где  $m_i$  — масса фактического сброса  $i$ -го загрязняющего вещества;  $D_i$  — коэффициент относительной эколого-экономической опасности для  $i$ -го загрязняющего вещества (для никеля  $D_i = 90$ ).

Предотвращенный экологический ущерб представляет собой разность ущербов после и до модернизации, выраженную через снижение приведенной массы сбросов. Вследствие этого рассматривается два этапа модернизации: электролиз и ионообменная очистка воды. Получим:  $M_i = 0,44 \cdot 90 = 39,6 \text{ усл. т}$ ;  $M_z = 0,264 \cdot 90 = 22,14 \text{ усл. т}$ ;  $\Delta U_{вз} = 9,4801 \cdot (39,6 - 22,14) \cdot 1,41 \cdot 1,04 = 242,8 \text{ тыс. руб/год}$ . При эффективности электролизера 94% получаем 26,4 кг никеля, идущего на ионный обмен.

Предотвращённый ущерб при использовании ионообменной очистки с эффективностью 99% рассчитывается по аналогичному алгоритму. При указанной эффективности в процессе ионообмена задерживается 26,14 кг никеля. Тогда, при приведенной массе сбросов после ионообмена  $M_{ио} = 26,14 \cdot 90 = 2352,6 \text{ тыс. усл. т.}$ , предотвращенный экологический ущерб водным ресурсам составит:  $\Delta U_{вио} = 9,4801 \cdot (2376 - 2352,6) \cdot 1,41 \cdot 1,04 = 325,3 \text{ тыс. руб/год}$ .

Суммарный предотвращённый экологический ущерб  $\sum \Delta U$  после электролизера и ионообменной очистки стоков составит:  $\sum \Delta U = \Delta U_{вз} + \Delta U_{вио} = 517473,9 + 325300 = 842774 \text{ руб.}$

Экономия на очищенной воде, возвращенной в оборот с эффективностью 93% (при стоимости  $1 \text{ м}^3$  воды 38 руб.), составит  $10000 \cdot 0,93 \cdot 38 = 353400 \text{ руб.}$

Никель, извлеченный из электролизера, представляет собой товар, стоимость которого необходимо учесть в доходах предприятия. При цене за 1 тонну никеля 1387415 руб. 440 кг будет стоить 609143 руб. С учетом того, что никель уже был в употреблении, устанавливается цена на 10% ниже биржевой стоимости, то есть прибыль  $\Pi$  составит 548229 руб./год. Необходимо учесть также экономию на плате за сброс никеля в пределах установленного допустимого норматива сброса; её размер —  $\mathcal{E}_{Ni} = 0,44 \cdot 27548 = 12121$  руб./год.

Коэффициент абсолютной экономической эффективности  $\mathcal{E}$  природоохранных капитальных вложений  $K$  определяется соотношением

$$\mathcal{E} = (\sum \Delta U + \Pi + \mathcal{E}_{ов} + \mathcal{E}_{Ni} - C_э) / K, \quad (3)$$

где  $\sum \Delta U$  — суммарный предотвращенный экологический ущерб;  $\Pi$  — прибыль от продажи никеля;  $\mathcal{E}_{ов}$  — экономия на оборотном водоснабжении;  $\mathcal{E}_{Ni}$  — экономия на плате за сброс никеля;  $C_э$  — эксплуатационные затраты.

Капитальные затраты определяются суммой:  $K = C_э + C_{оч}$ , где  $C_э = 300000$  руб. — стоимость электролизера, а  $C_{оч} = 260000$  руб. — ионообменной аппаратуры.

Таким образом, получаем:  $K = 300000 + 260000 = 560000$  руб.

Эксплуатационные затраты  $C_э$  включают:  $C_э = C_{эл} + C_p + Z_p$ , где  $C_{эл}$  — стоимость электроэнергии (при тарифе 5 руб. за 1 кВт и расходе 5 000 кВт составит 25000 руб./год);  $C_p$  — стоимость реагентов (составляет 24000 руб./год);  $Z_p$  — зарплата рабочего (720000 руб./год). Тогда эксплуатационные затраты составят:  $C_э = 25000 + 24000 + 720000 = 769000$  руб./год.

Составляющие экономического эффекта представлены на рисунке 3. При суммировании доходов и расходов получаем экономическую эффективность модернизации:  $\mathcal{E} = (842774 + 243936 + 353400 + 12121 - 769000) / 560000 = 1,22 \geq 1$ .

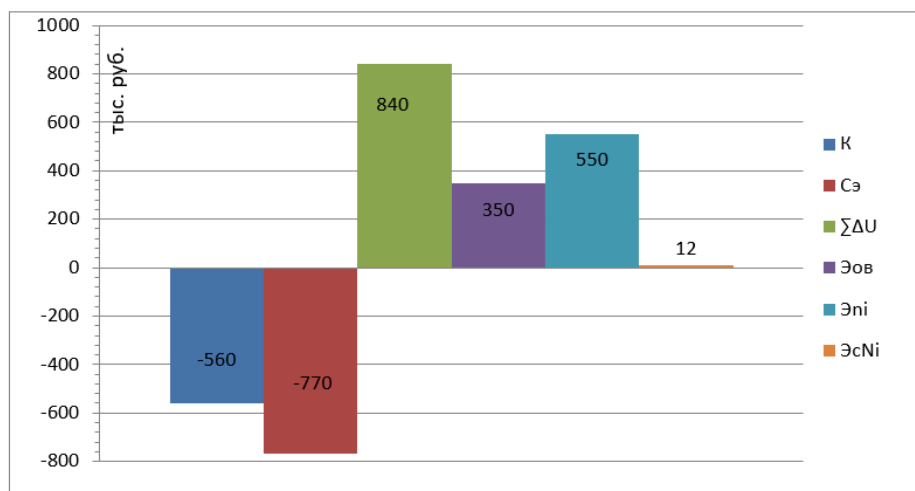


Рисунок 3. Диаграмма составляющих экономического эффекта

Срок окупаемости (см. рисунок 4)  $T_{ок}$  определяется из выражения:  
 $T_{ок} = 1/\mathcal{E} = 1/1,22 = 0,8$  года.

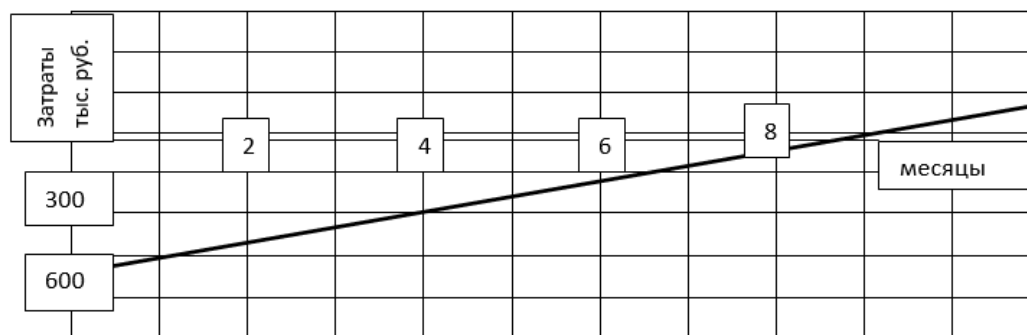


Рисунок 4. График окупаемости мероприятий по модернизации системы очистки ПС

Поскольку  $\mathcal{E} \geq 1$ , первоначальные капитальные вложения в модернизацию системы очистки ПС можно считать обоснованными.

Таким образом, модернизация системы очистки промышленных стоков предприятия в виде многоцелевого природоохранного мероприятия способствует выполнению ряда важных задач. Наряду со снижением воздействия на окружающую среду происходит также ресурсосбережение благодаря замкнутому водообороту и рекуперации никеля, содержащегося в загрязненных водах. По результатам расчётов, модернизация системы очистки сточных вод экономически эффективна со сроком окупаемости 0,8 года.

#### Список литературы:

1. Каракеян В.И., Чернявский С.А. Оценка риска здоровью взрослого населения от загрязнения атмосферы химическими соединениями // «Экология урбанизированных территорий». – М.: ИД Камертон, 2015. – С. 59 – 63.
2. Каракеян В.И., Рябышенков А.С., Харламов Н.Р., Оценка профессиональных рисков в технологических помещениях на предприятии микроэлектроники. Известия вузов. Электроника. 2021. Т. 26. №3–4. С. 265–272.
3. ГОСТ 17.1.1.01-77 . Охрана природы. Гидросфера. Использование и охрана вод. Основные термины и определения.
4. Водный кодекс РФ (с изменениями на 2 июля 2021 года).
5. Ноздратенко С.А., Акулыпин А.А., Акулыпин А.А. Исследование процесса очистки сточных вод обратным осмосом. Прогрессивные технологии и процессы. Сборник научных статей 2-й Международной молодежной научно-практической конференции в 3-х томах. 2015. С. 265-268.

6. В.И. Каракеян. Экономика природопользования: учебник / В.И. Каракеян. – М.: Издательство Юрайт; ИД Юрайт, 2017. – 478с. - (Основы наук).