

*Багаева Т.В.,*

*студент*

*2 курс магистратуры, кафедра «Экология и промышленная безопасность»*

*МГТУ им. Н.Э. Баумана*

*Россия, г. Москва*

*Научный руководитель: Виноградов М.С.,*

*старший преподаватель кафедры «Экология и промышленная*

*безопасность» МГТУ им. Н.Э. Баумана*

**КОМПЛЕКСНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОЧИСТКИ И УТИЛИЗАЦИИ  
ШЛАМОВ ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА: ОТ  
РЕАГЕНТНОГО КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ДО РЕГЕНЕРАЦИИ  
МЕТАЛЛОВ**

*Аннотация:* В статье рассмотрена комплексная очистка гальванических стоков от тяжёлых металлов и эмульгированных примесей. Экспериментально установлены оптимальные параметры флокуляции: доза коагулянта 1,5 мг/л, рН 8,0–8,5. Показано, что напорная флотация с камерой кондиционирования обеспечивает степень очистки 95–98%. Проанализированы методы утилизации флотошамов (кислотное выщелачивание, пирометаллургия, химическая иммобилизация). Экономический расчёт подтвердил целесообразность переработки осадков вместо захоронения с потенциальной выгодой до 41 500 руб./т.

*Ключевые слова:* гальванические стоки, коагуляция, флокуляция, напорная флотация, флотошам, кислотное выщелачивание, циркулярная экономика, тяжёлые металлы.

*Annotation:* This article examines the comprehensive treatment of galvanic wastewater to remove heavy metals and emulsified impurities. Optimal flocculation

*parameters were experimentally established: coagulant dosage of 1.5 mg/L, pH 8.0–8.5. Pressure flotation with a conditioning chamber was shown to provide a purification rate of 95–98%. Methods for flotation sludge disposal (acid leaching, pyrometallurgy, chemical immobilization) were analyzed. An economic analysis confirmed the feasibility of sludge recycling instead of landfilling, with a potential benefit of up to RUB 41,500/t.*

**Key words:** *electroplating waste, coagulation, flocculation, pressure flotation, flotation sludge, acid leaching, circular economy, heavy metals.*

## 1. Введение

Сточные воды гальванических предприятий содержат широкий спектр токсичных компонентов: ионы  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}/\text{Cr}^{6+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ , цианиды, поверхностно-активные вещества (ПАВ) и эмульгированные масла [1]. Превышение предельно допустимых концентраций (ПДК) по данным компонентам достигает 25–42 раз, что требует внедрения многоступенчатых систем очистки [2]. Ключевым этапом является перевод гидрофильных ионов в гидрофобные агрегаты с последующим извлечением флотацией. Однако традиционное захоронение образующихся осадков экономически невыгодно и экологически неприемлемо [3]. В работе исследуется интегрированный подход: реагентное кондиционирование → напорная флотация → рациональная утилизация шламов, соответствующий принципам наилучших доступных технологий (НДТ) и циркулярной экономики [4].

## 2. Реагентное кондиционирование и оптимизация дозирования

Эффективность флотации определяется качеством предварительной коагуляции и флокуляции. Коагулянты на основе солей алюминия и железа нейтрализуют отрицательный заряд коллоидных частиц гидроксидов металлов, снижая дзета-потенциал до изоэлектрической точки ( $\zeta \rightarrow 0$ ). Последующее введение высокомолекулярных флокулянтов (ПАА)

обеспечивает образование «мостиков» между микроагрегатами, формируя крупные аэрофлокулы [5].

Для определения оптимальных параметров проведены лабораторные исследования пробного коагулирования на модельном. Методика включала дозирование коагулянта (0–2,0 мг/л), быстрое перемешивание (2 мин, 200 об/мин), медленное перемешивание (12 мин, 50 об/мин) и отстаивание (20 мин). Установлено, что при дозе 1,5 мг/л достигается максимальная эффективность очистки (92–94%) и минимальная остаточная мутность. Превышение дозы приводит к перекоагуляции (дестабилизации) из-за перезарядки поверхности частиц и восстановления электростатического отталкивания. Оптимальный диапазон pH: 8,0–8,5, что соответствует зоне минимальной растворимости гидроксидов меди и алюминия [4].

### 3. Флотационное разделение и характеристика шламов

Интеграция камеры кондиционирования с напорным флотатором позволяет достичь степени удаления взвешенных веществ и эмульгированных примесей 95–98%. В отличие от гравитационного отстаивания, флотация формирует концентрированный пенный продукт с низкой влажностью (~95%) и пористой структурой. Флотационные шламы характеризуются содержанием металлов в 2–5 раз выше, чем у осадков простого отстаивания, стабильным гранулометрическим составом (10–100 мкм) и высокой обезвоживаемостью. Эти свойства делают их технологичным сырьём для последующей переработки [5].

### 4. Методы рациональной утилизации и экономическое обоснование

В России 85–90% гальваношламов направляются на захоронение, что противоречит современным экологическим стандартам. Рассмотрены следующие направления переработки:

Кислотное выщелачивание. Обработка  $H_2SO_4$  (10–20%, 60–90°C) с последующей фильтрацией и кристаллизацией. Степень извлечения Cr, Ni, Cu

достигает 85–95%. Продукт (сульфаты металлов) возвращается в гальванические электролиты [3].

Пирометаллургия. Высокотемпературная обработка (800–1500°C) с восстановителем. Органические примеси окисляются, металлы восстанавливаются до сплава («матта»), направляемого на аффинаж [3].

Химическая иммобилизация. Связывание металлов в малорастворимые сульфиды/фосфаты или фиксация в цементной/полимерной матрице для использования в дорожном строительстве (класс опасности IV) [2,3].

Экономический расчёт (кислотное выщелачивание хрома):

Исходные данные: 1 т шлама, 15% Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, степень извлечения 85%, рыночная цена Cr<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)·18H<sub>2</sub>O (в среднем) = 40 000 руб./т, затраты на переработку (минимальные) = 2 000 руб., стоимость захоронения (в среднем) = 18 000 руб.

Расчёт:  $m(\text{Cr}_2\text{O}_3) = 150 \text{ кг} \rightarrow m(\text{извл.}) = 127,5 \text{ кг} \rightarrow m(\text{продукта}) = 637,5 \text{ кг}$ . Выручка = 25 500 руб. Чистый доход = 23 500 руб. Экономия на захоронении = 18 000 руб. Совокупная выгода = 41 500 руб./т. Анализ чувствительности подтверждает рентабельность даже при колебаниях содержания металла ( $\pm 5\%$ ) и рыночных цен ( $\pm 20\%$ ).

## 5. Заключение

Комплексная технология, объединяющая реагентное кондиционирование, напорную флотацию и переработку шламов, обеспечивает не только соответствие жёстким нормативам СанПиН 1.2.3685 21, но и экономическую выгоду за счёт возврата вторичных ресурсов. Оптимальная доза коагулянта 1,5 мг/л и pH 8,0–8,5 гарантируют максимальную эффективность флокуляции. Кислотное выщелачивание и пирометаллургические методы позволяют трансформировать опасные отходы I–II класса в коммерческие продукты или строительные материалы. Внедрение данных решений способствует переходу гальванической промышленности к замкнутому циклу водопользования и снижению экологической нагрузки [2].

### **Использованные источники:**

1. ИТС 42-2021. Производство гальванических покрытий и обработка поверхности металлов. – М.: Бюро НДТ, 2021.
2. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности факторов среды обитания. – М., 2021.
3. Lehmann L., Scherer G.W. Use of stabilized heavy metal sludges in cement production // Waste Management. – 2019. – Vol. 85. – P. 398–407.
4. Виноградов М.С. Интенсификация флотационной очистки сточных вод с использованием кондиционирующих камер. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019.
5. Ксенофонтов Б.С., Буйлов Г.В. Флотационные методы очистки воды. – М.: Химия, 1990.