

Флотационные технологии очистки фильтрационных вод полигонов твёрдых бытовых отходов

© 2021. В. П. Мешалкин^{1,2,3}, академик РАН, д. т. н., профессор,
В. С. Коваленко⁴, д. т. н., профессор, Г. А. Щербак ова², аспирант,
А. В. Колесников², к. т. н., доцент,

¹Санкт-Петербургский государственный

технологический институт (технический университет),

190013, Россия, г. Санкт-Петербург, Московский проспект, д. 26,

²Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева,

125047, Россия, г. Москва, Миусская площадь, д. 9,

³Институт общей и неорганической химии имени Н. С. Курнакова РАН,

119991, Россия, г. Москва, Ленинский проспект, д. 31,

⁴Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,

119049, Россия, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4,

e-mail: artkoles@list.ru

Проведён анализ технологий, применяемых для очистки фильтрационных вод полигонов твёрдых бытовых отходов. Представлены результаты электрофлотационного извлечения коагулянта UltraPAC в присутствии поверхностно активных веществ (ПАВ), флокулянтов, различных реагентов Ca, Mg, Ba в водных растворах NaCl, Na₂SO₄.

Приведены результаты исследования коагулянта UltraPAC на предмет определения размера частиц, заряда поверхности дисперсной фазы. Установлено, что ζ-потенциал Al(OH)₃Cl в растворах NaCl в широком диапазоне pH 5–9 положителен (+5–+33 мВ). В растворах Na₂SO₄ при pH 7 наблюдается перезарядка поверхности, что объясняется специфической адсорбцией анионов SO₄²⁻ на поверхности дисперсной фазы Al(OH)₃Cl. Размер частиц изменяется от 38 мкм (pH 5) до 12 мкм (pH 9) – в растворах Na₂SO₄ и от 16 мкм (pH 5) до 19 мкм (pH 9) – в растворах NaCl. Установлено, что добавление в раствор реактивов для корректировки pH на основе Ca²⁺, Mg²⁺ приводит к подавлению электрофлотационного процесса. Введение анионного ПАВ стабилизирует процесс электрофлотации и повышает степени извлечения коагулянта до 75% (MgCl₂ – 0,1 г/л) и 99% (CaCl₂ – 0,1 г/л).

Ключевые слова: фильтрат полигонов твёрдых бытовых отходов, флотация, электрофлотация, коагулянт, поверхностно-активные вещества, флокулянт.

Flotation technologies for purification of filtration waters of solid waste landfills

© 2021. V. P. Meshalkin^{1,2,3} ORCID: 0000-0001-6956-6705, V. S. Kovalenko⁴ ORCID: 0000-0001-5675-3288,

G. A. Shcherbakova² ORCID: 0000-0002-0478-2252, A. V. Kolesnikov² ORCID: 0000-0002-4586-6612,

¹St. Petersburg State Technological Institute (Technical University),

26, Moskovsky Prospekt, St. Petersburg, Russia, 190013,

²D. I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology,

9, Miusskaya Square, Moscow, Russia, 125047,

³N. S. Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry

of the Russian Academy of Sciences,

31, Leninsky Prospekt, Moscow, Russia, 119991,

⁴National Research Technological University "MISIS",

4, Leninsky Prospekt, Moscow, Russia, 119049,

e-mail: artkoles@list.ru

Comparison of leachate water treatment methods for solid household waste (MSW) landfills is carried out. The experiments were carried out on model solutions and real filtrate from the MSW landfill of the Moscow region. It has been established that electroflotation treatment is an effective method due to high recovery rates, low energy consumption,

as well as the possibility of automation and the absence of secondary water pollution. The effect of surfactants (surface-active substances, SAS), flocculants, Ca, Mg, Ba reagents on electroflotation extraction of UltraPAC coagulant in aqueous solutions of NaCl, Na₂SO₄ is described. It was found that the addition of an anionic surfactant to the system promotes the adsorption of the surfactant on its surface, which makes it more hydrophobic, increasing the degree of electroflotation extraction to 95–99% in some cases.

The results of measurements of the particle size, surface charge of the dispersed phase of the UltraPAC coagulant are presented. It was found that the ζ-potential of Al(OH)₃Cl in NaCl solutions in a wide range of pH 5–9 is positive, (+5–+33 mV). In Na₂SO₄ solutions at pH 7 surface recharge is observed, which is explained by the specific adsorption of SO₄²⁻ anions on the surface of the dispersed phase of Al(OH)₃Cl. The particle size varies from 38 μm (pH 5) to 12 μm (pH 9) – in Na₂SO₄ solutions and from 16 μm (pH 5) to 19 μm (pH 9) – in NaCl solutions. It was found that the addition of Ca²⁺, Mg²⁺ reagents to the solution for pH adjustment leads to suppression of the electroflotation process. The introduction of an anionic surfactant stabilizes the electroflotation process and increases the degree of extraction of the coagulant to 75% (MgCl₂ – 0.1 g/L) and 99% (CaCl₂ – 0.1 g/L).

Keywords: solid waste landfill filtrate, flotation, electroflotation, coagulant, surfactant, flocculant.

Возрастающие требования к обеспечению санитарного состояния населённых пунктов и охране водных объектов приводят к необходимости разработки эффективных технологий по очистке фильтрационных вод полигонов твёрдых бытовых отходов (ТБО). Выбор технологического решения и технологий очистки фильтрационных вод определяется химическим и микробиологическим составом сточных вод, этапом жизненного цикла полигонов ТБО, мощностью объекта, количеством выпадающих осадков [1–7].

Проведённый анализ информации в открытых источниках о характеристиках фильтратов полигонов ТБО показывает, что состав фильтрата сложный и насчитывает до 40 компонентов. Количество загрязнений зависит в первую очередь от срока хранения: 1–3 года, 3–10 лет, 10–30 лет, более 30 лет, а также сезонного периода (снег, дожди, засуха и т. д.). Концентрация наиболее значимых

компонентов в фильтратах полигона представлена в таблице 1.

Согласно литературным данным, состав фильтратов, поступающих на очистные сооружения, будет изменяться в зависимости от расположения полигона, сезона выпадения осадков (климатических условий). Для глубокой очистки фильтрационных вод необходим комплекс технологий, составленный на основе анализа литературных источников, основные из которых представлены в таблице 2 [8–14].

Анализ методов показывает, что технология обезвреживания фильтрационных вод будет включать две стадии:

I стадия – удаление взвешенных веществ (ВВ) и снижение концентрации органических загрязнений (ХПК, БПК), удаление гуминовых и фульвокислот;

II стадия – удаление солевых компонентов ионов тяжёлых металлов, обезвреживание концентратов.

Таблица 1 / Table 1

Состав и концентрация наиболее значимых компонентов в фильтратах полигона ТБО (срок эксплуатации до 20 лет) / Composition and concentration of the most significant components in the leachate of the solid waste landfill (service life up to 20 years)

Показатель / Indicator	Минимальное значение min	Максимальное значение max
pH	6,0±0,5	8,0±0,5
Взвешенные вещества, мг/л / Suspended substances, mg/L	1000	4000–6000
ХПК, мгО/л / COD, mgO/L	2000	15000–20000
БПК, мгО ₂ /л / BOD, mgO ₂ /L	1000	10000
Солесодержание (Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻), мг/л Salinity content (Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻), mg/L	1000	5000
Содержание тяжёлых металлов Σ(Zn ²⁺ , Cu ²⁺ , Ni ²⁺ , Pb ²⁺), мг/л Heavy metal ions Σ(Zn ²⁺ , Cu ²⁺ , Ni ²⁺ , Pb ²⁺), mg/L	50	200
Fe ²⁺ +Fe ³⁺ , мг/л / mg/L	10	100
Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , мг/л / mg/L	200	1000
NH ₄ ⁺ , мг/л / mg/L	150	1000
CO ₃ ²⁻ , мг/л / mg/L	500	1000

Таблица 2 / Table 2

Базовые методы и решаемые ими задачи при очистке фильтрационных вод
Basic methods and the tasks they solve when treating filtration water

Задачи Tasks	Методы Methods	Стадия Stage
Извлечение взвешенных веществ (ВВ) Extraction of suspended solids (SS)	Флотация, электрофлотация, седиментация, фильтрация, центрифугирование [15–19] Flotation, electroflotation, sedimentation, filtration, centrifugation [15–19]	I стадия Stage I
Снижение ХПК, БПК (органические загрязнения) Decrease in COD, BOD (organic pollution)	Флотация, электрофлотация, коагуляция, электрокоагуляция, сорбция на углях (БАУ) [12, 20, 21] Flotation, electroflotation, coagulation, electrocoagulation, sorption on coals (BAU) [12, 20, 21]	
Удаление солей хлоридов и сульфатов (концентрирование 1 : 5) Removal of chloride and sulfate salts (concentrating 1 : 5)	Обратный осмос, нанофильтрация [10–12, 20, 21] Reverse osmosis, nanofiltration [10–12, 20, 21]	II стадия Stage II

Публикуется большое количество экспериментальных материалов, связанных с проблемами защиты окружающей среды, мониторингом водных ресурсов и воздушных загрязнений в местах расположения объектов ТБО [22–24], однако отсутствуют данные по высокоэффективным методам переработки и утилизации жидких фильтратов, имеющих в своём составе органические загрязнения растворимой и нерастворимой природы, ВВ, ионы тяжёлых и цветных металлов, а также солевые компоненты большой производительности (до 1000 м³/сут.).

В данной статье рассмотрены результаты экспериментальных исследований по использованию флотационных процессов для извлечения ВВ из фильтрационных вод, включающих органические и неорганические загрязнения, а также направления интенсификации флотационных и электрофлотационных процессов за счёт применения коагулянтов, флокулянтов и поверхностно активных веществ (ПАВ).

Цель работы – исследование влияния ПАВ и флокулянтов на электрофлотационное извлечение коагулянтов на основе алюминия в процессах обезвреживания фильтратов полигонов ТБО и поиск направлений повышения эффективности электрофлотационного процесса.

Объекты и методы исследования

Объект исследования – процесс электрофлотационного извлечения труднорастворимых соединений алюминия в присутствии ПАВ и флокулянтов.

Эксперименты проводили на модельных растворах и реальном фильтрате с полигона ТБО Московской области с использованием лабораторных электрофлотационных установок. Эффективность электрофлотационного (ЭФ) процесса оценивается степенью извлечения α (%), рассчитываемой по формуле (1):

$$\alpha = (C_{исх.} - C_{кон.}) / C_{кон.} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $C_{исх.}$, $C_{кон.}$ – соответственно исходная и конечная концентрации дисперсной фазы в водной среде, мг/л. Подробно методика исследования ЭФ процессов приведена в работах [18, 25].

В качестве коагулянта использовали коагулянт UltraPAC. В исследовании применяли флокулянты Praestol A2530, Superfloc A131, Superfloc A100, M345 A, а также ПАВ – хвойный СТМл, Септапав, NaDDS. В опубликованных ранее работах сообщалось, что коагулянты на основе Al^{3+} , Fe^{3+} , Ti^{+4} в присутствии ПАВ различной природы используются как флокулирующая композиция для интенсификации и повышения эффективности флотационных процессов [17, 25].

Результаты и обсуждение

На эффективность извлечения коагулянтов, например, UltraPAC, влияет большое количество факторов таких как: pH водного раствора, электрокинетический потенциал (ζ) дисперсной фазы, состав фонового электролита ($NaCl$, Na_2SO_4 , Na_3PO_4 и др.), наличие в растворе солей Ca , Mg , ионов тяжёлых металлов, а также присутствие ПАВ, флоку-

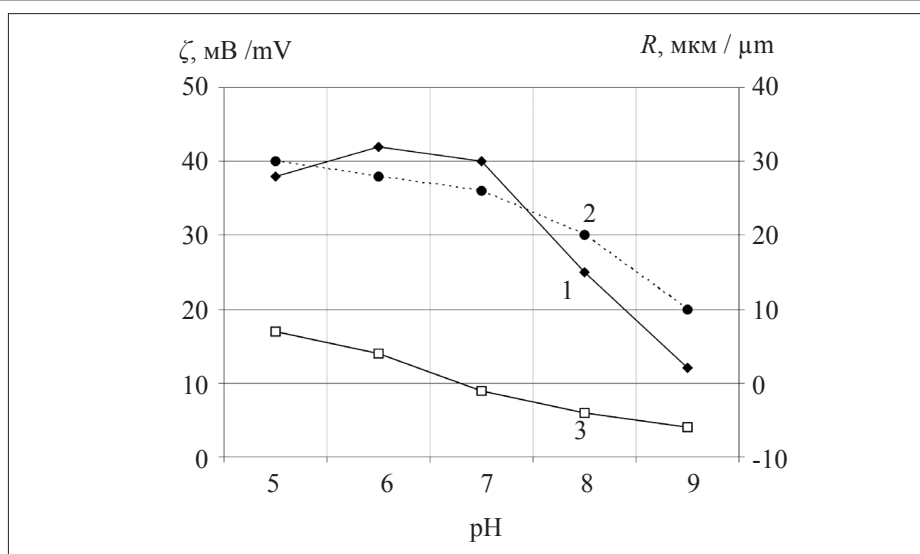


Рис. 1. Влияние pH на величину электрокинетического потенциала и размер частиц коагулянта $Al(OH)_2Cl$ в водных растворах $NaCl$, Na_2SO_4 . Условия эксперимента: $c(Al) = 50$ мг/л, $c(NaCl/Na_2SO_4) = 1$ г/л; 1) R_{cp} ($H_2O - NaCl - Al(OH)_2Cl$); 2) ζ_{cp} ($H_2O - NaCl - Al(OH)_2Cl$); 3) ζ_{cp} ($H_2O - Na_2SO_4 - Al(OH)_2Cl$)

Fig. 1. Effect of pH on the value of the electrokinetic potential and the particle size of the coagulant $Al(OH)_2Cl$ in aqueous solutions of $NaCl$, Na_2SO_4 . Experimental conditions: $c(Al) = 50$ mg/L, $c(NaCl/Na_2SO_4) = 1$ g/L; 1) R_{cp} ($H_2O - NaCl - Al(OH)_2Cl$); 2) ζ_{cp} ($H_2O - NaCl - Al(OH)_2Cl$); 3) ζ_{cp} ($H_2O - Na_2SO_4 - Al(OH)_2Cl$)

лянтов и других компонентов. Рассмотрим экспериментальные результаты по электрофлотационному процессу извлечения коагулянта UltraPAC. Важной характеристикой коагулянта является заряд и средний размер частиц дисперсной фазы. На рисунке 1 показано влияние pH и природы электролита на величину ζ -потенциала и средний размер частиц.

Приведённые результаты показывают, что в растворах $NaCl$ заряд частиц дисперсной фазы при pH 5–9 положительный, однако с увеличением $pH > 7$ наблюдается снижение величины ζ -потенциала, что связано с ионизацией поверхностных групп гидроксида алюминия [16]. В растворах Na_2SO_4 при pH 5–6 заряд поверхности гидроксида алюминия положительный. При $pH > 7$ ζ -потенциал отрицательный. Полученные значения ζ -потенциала определяются адсорбцией ионов SO_4^{2-} на поверхности гидроксидов [16]. Разные значения величин ζ -потенциала $Al(OH)_2Cl$ при pH 7, в $NaCl$ $\zeta = \pm 27$ мВ, в Na_2SO_4 $\zeta = 0$ мВ влияют на флотационное извлечение коагулянта.

Приведены результаты исследования коагулянта UltraPAC на предмет определения размера частиц, заряда поверхности дисперсной фазы. Установлено, что ζ -потенциал $Al(OH)_2Cl$ в растворах $NaCl$ в широком диапазоне pH 5–9 положителен (+5–+33 мВ).

В растворах Na_2SO_4 при pH 5–9 наблюдается перезарядка поверхности при pH 7 ($\zeta = 0$). Размер частиц изменяется от 38 мкм (pH 5) до 12 мкм (pH 9) – в Na_2SO_4 и от 16 мкм (pH 5) до 19 мкм (pH 9) – в $NaCl$. Установлено, что добавление в раствор реактивов для корректировки pH на основе Ca^{2+} , Mg^{2+} приводит к подавлению ЭФ процесса. В присутствии анионного ПАВ процесс электрофлотации стабилизируется, степени извлечения составляют 75% ($MgCl_2 - 0,1$ г/л) и 99% ($CaCl_2 - 0,1$ г/л).

На лабораторной ЭФ установке исследовано влияние природы электролита ($NaCl$, Na_2SO_4), а также добавок анионного ПАВ и анионного флокулянта на кинетику процесса извлечения дисперсной фазы коагулянта $Al(OH)_2Cl$. Экспериментальные данные представлены в таблице 3.

Анализ показывает, что анионный ПАВ и флокулянт интенсифицируют флотационный процесс и повышают степень извлечения до 99%.

В сточных водах присутствует большое количество солей жёсткости (Ca^{2+} , Mg^{2+}). Кроме того, при обработке фильтрационных вод часто используют $Ca(OH)_2$, $Mg(OH)_2$, что ведёт к повышению содержания солей жёсткости в воде. Ранее было установлено [27], что ионы Ca^{2+} снижают эффективность электрофлотационного процесса на примере $Fe(OH)_3$, $Cr(OH)_3$, $Al(OH)_3$.

Таблица 3 / Table 3

Влияние ПАВ и флокулянта на степень извлечения коагулянта $Al(OH)_2Cl$ из растворов $NaCl$, Na_2SO_4
Influence of surfactant and flocculant on the degree of extraction of coagulant $Al(OH)_2Cl$
from solutions of $NaCl$, Na_2SO_4

τ , мин/min	α , % ($NaCl$)			α , % (Na_2SO_4)		
	без добавок without additives	+ ПАВ + SAS	+ ПАВ + флок + SAS + flock	без добавок without additives	+ ПАВ + SAS	+ ПАВ + флок + SAS + flock
5	20	50	98	33	76	70
10	70	86	99	40	82	86
20	85	95	99	52	99	99

Примечание: Условия эксперимента: $c(Al^{3+}) = 50$ мг/л, $c(NaCl/Na_2SO_4) = 1$ г/л, $c(ПАВ(СТМx)) = 5$ мг/л, $c(флок(Superflock A100)) = 5$ мг/л, $J_v = 0,4$ А/л, pH 7.

Note: Experimental conditions: $c(Al^{3+}) = 50$ mg/L, $c(NaCl/Na_2SO_4) = 1$ g/L, $c(SAS(STMx)) = 5$ mg/L, $c(flock(Superflock A100)) = 5$ mg/L, $J_v = 0.4$ A/L, pH 7.

Таблица 4 / Table 4

Влияние солей жёсткости Ca^{2+} , Mg^{2+} на ЭФ процесс извлечения коагулянта $Al(OH)_2Cl$
Influence of Ca^{2+} , Mg^{2+} hardness salts on the electroflotation process of extracting the coagulant $Al(OH)_2Cl$

τ , мин min	α , % $CaCl_2$			α , % $MgCl_2$		
	$c(CaCl_2) =$ 0 г/л / g/L	$c(CaCl_2) =$ 0,1 г/л / g/L	$c(CaCl_2) =$ 0,1 г/л / g/L + ПАВ / SAS	$c(MgCl_2) =$ 0 г/л / g/L	$c(MgCl_2) =$ 0,1 г/л / g/L	$c(MgCl_2) =$ 0,1 г/л / g/L + ПАВ / SAS
5	20	5	14	20	2	8
10	70	7	70	70	4	30
20	82	35	99	82	13	75

Примечание: Условия эксперимента: $c(Al^{3+}) = 50$ мг/л, $c(Ca^{2+}, Mg^{2+}) = 100$ мг/л, $c(NaCl) = 1$ г/л, $c(aПАВ(СТМл)) = 5$ мг/л, $J_v = 0,4$ А/л, pH 7.

Note: Experimental conditions: $c(Al^{3+}) = 50$ mg/L, $c(Ca^{2+}, Mg^{2+}) = 100$ mg/L, $c(NaCl) = 1$ g/L, $c(aSAS(STMl)) = 5$ mg/L, $J_v = 0.4$ A/L, pH 7.

В таблице 4 приведены результаты отрицательного влияния солей $CaCl_2$, $MgCl_2$ на степень извлечения коагулянта, что связано с адсорбцией ионов Ca^{2+} , Mg^{2+} и ростом значения ζ -потенциала.

С другой стороны, добавление анионных ПАВ приводит к гидрофобизации поверхности, снижению ζ -потенциала и росту степени извлечения.

Проведены исследования электрофлотационного извлечения ВВ из реальных фильтрационных вод полигона ТБО, расположенного в Московской области.

Исследования показали, что при концентрации коагулянта $Al(OH)_2Cl$ до 100 мг/л степень извлечения ВВ составляет 40–50%. При добавлении флокулянта Praestol A2530 или Superfloc A131, Superfloc A100 степень извлечения ВВ возрастает до 60–70%. При добавлении в фильтрационные воды композиции (Al^{3+} + ПАВ + флок) степень извлечения возрастает до 90–95%.

Высокая эффективность процесса связана с увеличением скорости всплытия осадка вследствие гидрофобизации поверхности и торможения процессов седиментации коагу-

лянта. На рисунке 2 представлена принципиальная схема очистки фильтрационных вод ТБО от ВВ, плохо растворимых органических соединений, эмульсий, ПАВ, а также органических загрязнений, которые сорбируются на свежеформированном осадке $Al(OH)_3$. Указанная схема реально функционирует на одном из предприятий Московской области. Оборудование обеспечивает обработку фильтрационных вод до 50 м³/ч.

В качестве базового оборудования (п. 4) используется напорный флотатор с дополнительными камерами электрохимического газонасыщения (электрофлотация). Эффективность работы некоторых флотационных аппаратов представлена в таблице 5.

Для случая очистки фильтрата ТБО от ВВ в присутствии коагулянта $Al(OH)_2Cl$, дисперсная фаза будет гидрофильно-гидрофобной (при добавлении ПАВ). Максимальные степени извлечения составляют для напорной флотации 50–70%, электрофлотации 85–90%. Введение флокулянтов не приводит к повышению эффективности процесса. Добавление композиции флокулянт–ПАВ за счёт гидрофобизации поверх-

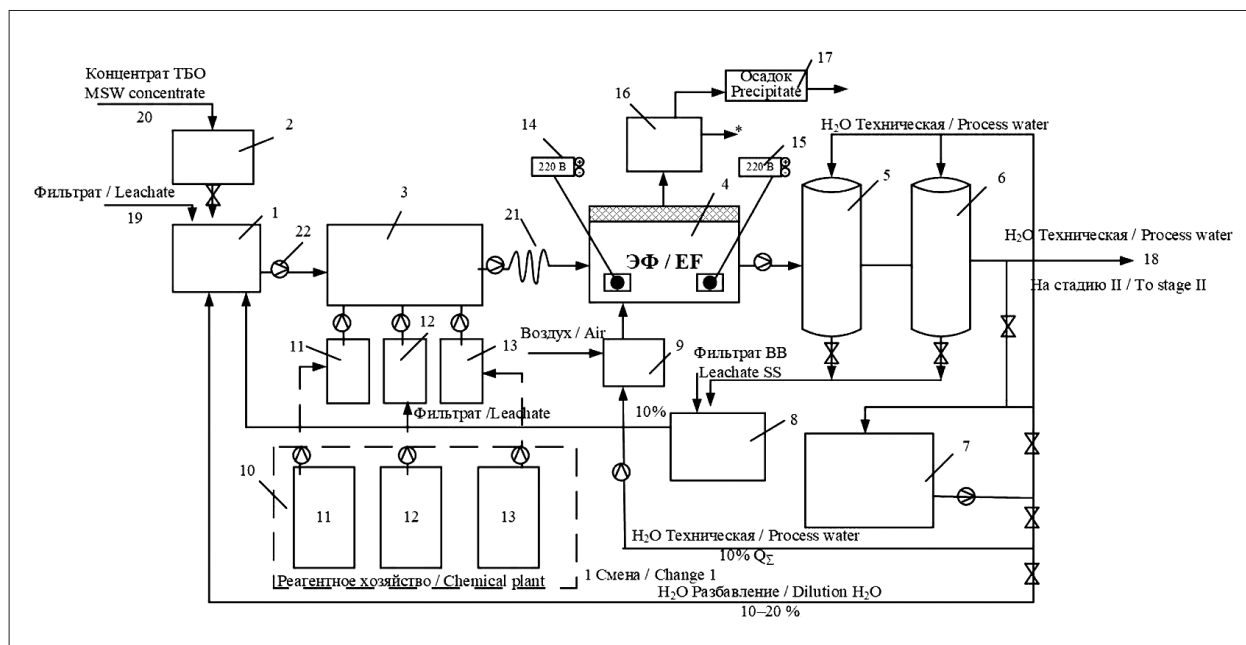


Рис. 2. Принципиальная схема очистки фильтрационных вод ТБО от взвешенных веществ (ВВ) и органических загрязнений (I стадия): 1 – накопитель фильтрата ТБО; 2 – накопитель концентрата ТБО; 3 – ёмкость-флокулятор; 4 – флотатор (электрофлотатор); 5, 6 – напорные фильтры; 7 – ёмкость технической воды; 8 – ёмкость для фильтрата промывки фильтров;

9 – компрессор; 10 – участок для приготовления реагентов; 11, 12, 13 – ёмкости коагулянта Al, флокулянта, ПАВ (пром.); 14, 15 – источники тока для модуля электрохимического газонасыщения – 2 блока, на выходе мощность 300 А; 16 – шнековый обезвоживатель флотошлама, приёмная ёмкость;

17 – осадок (Al(OH)₃ + ВВ); 18 – техническая вода (повышенное солесодержание на стадию II); 19 – фильтрат ТБО, исходная вода (концентрация 1); 20 – концентрат ТБО (5) ВВ, ХПП, Σ солей (5 : 1); 21 – блок перемешивания воды, коагулянтов, флокулянтов и ПАВ; 22 – насосы для перекачки жидкости

Fig. 2. Schematic diagram of the filtration water purification of solid waste from suspended solids and organic contaminants (Stage I): 1 – accumulator for solid waste filtrate; 2 – accumulator of solid waste concentrate; 3 – tank-flocculator; 4 – flotator (electroflotator); 5, 6 – pressure filters; 7 – capacity of technical water; 8 – tank for the filtrate of washing filters; 9 – compressor; 10 – area for preparation of reagents; 11, 12, 13 – capacities of coagulant Al, flocculant, surfactant (industrial); 14, 15 – current sources for the electrochemical gas saturation module – 2 blocks, output power 300 A; 16 – auger flotation sludge dehydrator, receiving tank; 17 – sediment (Al(OH)₃ + BB); 18 – industrial water (increased salinity at stage II); 19 – MSW filtrate, source water (concentration 1); 20 – concentrated solid waste (5) explosive, HPP, Σ salts (5 : 1); 21 – block for mixing water, coagulants, flocculants and surfactants; 22 – pumps for transferring liquid

Таблица 5 / Table 5

Примерная сравнительная эффективность извлечения гидрофобных и гидрофильно-гидрофобных загрязнений из сточных вод в различных флотационных машинах комбинированного типа и обычного исполнения [14] / Approximate comparative efficiency of the extraction of hydrophobic and hydrophilic-hydrophobic contaminants from wastewater in various flotation machines of the combined type and conventional design [14]

Тип флотационных машин и аппаратов Type of flotation machines and apparatus	Эффективность извлечения загрязнений, % Removal efficiency, %	
	гидрофобных hydrophobic	гидрофильно-гидрофобных hydrophilic-hydrophobic
Механические / Mechanical	60–70	10–15
Пневматические / Pneumatic	55–65	10–15
Напорные / Pressure	90–95	50–70
Электрофлотационные / Electroflotation	90–98	85–95
Флотационные механические машины обычного исполнения / Conventional mechanical flotation machines	45–55	5–10

ности дисперсной фазы повышает степень ЭФ извлечения коагулянта $Al(OH)_2Cl$ до 95–98%.

Заключение

Экспериментально полученные в ходе выполнения исследований степени извлечения взвешенных веществ важны для определения режима работы фильтров с механической загрузкой при использовании флотационных процессов в качестве предварительной очистки (I стадия).

При низкой эффективности работы ЭФ/Ф (60–70%) 30–40% неочищенного фильтрата направляется на стадию фильтрации, что приводит к необходимости частой замены рабочей загрузки, существенно усложняет работу всей системы и не позволяет реализовать высокоэффективную очистку.

При высокой эффективности ЭФ/Ф процессов (90–95%) за счёт введения подобранной в ходе выполнения работы композиции флокулянт–ПАВ на последующую стадию фильтрации направляется значительно меньше (5–10%) неочищенного фильтрата, что существенно облегчает режим работы модулей и продлевает срок службы фильтрующей загрузки.

Для удаления солевых компонентов (II стадия), получения твёрдых отходов солей (IV класса опасности) и обессоленной воды в дальнейшем предлагается использовать мембранные (обратный осмос) и выпарные технологии, а для обезвреживания очищаемых фильтратов – окисляющие реагенты (гипохлорит натрия, электрохимически генерируемый хлор, озон, пероксид водорода и др.).

Учитывая высокую эффективность удаления взвешенных веществ и частично органических загрязнений, флотационные технологии в сочетании с фильтрацией могут быть рекомендованы к использованию при обезвреживании фильтратов полигонов ТБО.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-79-30029).

References

1. Recommendations for the collection, treatment and disposal of wastewater from solid waste landfills. Moskva: Gosudarstvennyy komitet Rossiyskoy Federatsii po stroitel'stvu i zhilishchno-kommunal'nomu kompleksu, 2003. 47 p. (in Russian).
2. Kovaleva E.I., Yakovlev A.S., Yakovlev S.A., Duvalina E.A. Organization of monitoring of waste disposal

facilities (on the example of a solid waste landfill in the Moscow region) // Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN. 2012. V. 14. No. 1–9. P. 2418–2422 (in Russian).

3. Varnavskaya I.V. Analysis of the conditions for the formation and composition of wastewater from solid waste landfills // Ekologiya i promyshlennost. 2008. No. 1. P. 39–43 (in Russian).

4. Stepanenko E.E., Pospelova O.A., Zelenskaya T.G. Investigation of the chemical composition of filtration waters of the solid waste landfill // Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2009. V. 11. No. 1 (3). P. 525–527 (in Russian).

5. Stupina N.N. Impact of landfills and landfills on the state of water resources // Vestnik Voronezhskogo universiteta. Geologiya. 2003. No. 2. P. 239–240 (in Russian).

6. Shamsieva G.Sh., Nayman S.M., Tunakova Yu.A. Study of filtration waters of the Samosyrovskaya landfill in Kazan as a source of environmental pollution // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2015. No. 2. P. 450–453 (in Russian).

7. Povarov A.A., Selivanova N.V., Trifonova T.A., Pavlova V.F., Selivanov O.G., Ilyina M.E., Shirkin L.A., Torshin V.B. Purification of filtering water of solid waste lands // Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2014. V. 16. No. 1 (3). P. 661–664 (in Russian).

8. Konygin A.A. Integrated technology for cleaning the leachate of solid waste landfills // Stroitelnye nauki. 2011. No. 4. P. 105–109 (in Russian).

9. Potapov A.D., Konygin A.A. New possibilities of lightening intensely colored filtrates of solid waste landfills during their neutralization using milk of lime in the presence of calcium salts // Vestnik MGSU. Nauchno-tekhnicheskii zhurnal. 2013. No. 8. P. 116–122 (in Russian).

10. Pervov A.G., Shirkova T.N., Tikhonov K.V. Calculation of reverse osmosis and nanofiltration plants used for the treatment of filtrate of solid domestic waste // Membranes and membrane technologies. 2020. V. 10. No. 5. P. 309–324. doi: 10.1134/S2218117220050053

11. Skvortsov L.S., Sheptunov A.V., Shirkova T.N., Pervov A.G. Combined reagent-membrane technology for cleaning the filtrate of solid waste storage landfills with the utilization of concentrates // Sistemnye tekhnologii. 2020. No. 3 (36). P. 23–39 (in Russian).

12. Pervov A.G., Shirkova T.N. Determination of the main operating parameters of reverse osmosis plants when cleaning leachate of solid waste landfills // Construction and industrial safety. 2020. No. 18 (70). P. 83–96. doi: 10.37279/2413-1873-2020-18-83-96

13. Selivanova N.V., Trifonova T.A., Selivanov O.G., Chukhlanov V.Yu. Assessment and treatment of filtration waters of solid waste landfills // Tekhnicheskie nauki. 2014. No. 8. P. 99–102 (in Russian).

14. Satin I.V., Tryakina A.S. Comparative analysis of filtrate purification methods // Vestnik Donbasskoy

natsionalnoy akademii stroitelstva i arkhitektury. 2010. No. 3 (83). P. 270–275 (in Russian).

15. Ksenofontov B.S. Wastewater treatment: kinetics of flotation and flotation combines: monograph. Moskva: FORUM INFRA-M, 2020. 256 p. (in Russian).

16. Kolesnikov V.A., Ilin V.I., Brodskiy V.A., Kolesnikov A.V. Electroflotation in the processes of water treatment and extraction of valuable components from liquid industrial waste. Overview. Part 1 // Theoretical Foundations of Chemical Technology. 2017. V. 51. No. 4. P. 361–375. doi: 10.7868/S0040357117040054

17. Kolesnikov V.A., Kolesnikov A.V., Ilin V.I. Electroflotation in wastewater treatment from oil products, dyes, surfactants, ligands and biological contaminants. Overview. Part 2 // Theoretical Foundations of Chemical Technology. 2019. V. 53. No. 2. P. 205–228. doi: 10.1134/S0040579519010093

18. Kolesnikov A.V., Milyutina A.D., Ladygina Yu.Sh., Kolesnikov V.A. Development of an electroflotation technology for the extraction of anionic surfactants and non-ferrous metal ions from waste waters of electroplating industries // Journal of Applied Chemistry. 2018. V. 91. No. 7. P. 939–948. doi: 10.1134/S0044461818070046

19. Kolesnikov A.V., Milyutina A.D., Desyatov A.V., Kolesnikov V.A. Electroflotation recovery of highly dispersed carbon materials from aqueous solutions of electrolyte // Separation and Purification Technology. 2019. V. 209. P. 73–78. doi: 10.32014/2019.2518-1491.48

20. Shukhenina Z.M., Bagrov V.V., Desyatov A.V., Zubkov A.A., Kamrukov A.S., Kolesnikov V.A., Konstantinov V.E., Ksenofontov B.S., Novikov D.O. Technogenic water problems, technology, resource value. Moskva: MGTU im. N.E. Bauman, 2015. 401 p. (in Russian).

21. Kolesnikov V.A., Menshutina N.V., Desyatov A.V. Equipment, technologies and design of wastewater treatment systems. Moskva: DeLi plus, 2016. 216 p. (in Russian).

22. Ashikhmina T.Ya., Skugoreva S.G., Adamovich T.A., Tovstik E.V. Assessment of the state of surface water bodies in the area of the landfill for the disposal of pesticides // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 1. P. 104–111. doi: 10.25750/1995-4301-2021-1-104-111

23. Roeva N.N., Orlovskaya O.A., Voronich S.S., Zaytsev D.A. Development of a scheme for the separation of chemical forms of cadmium in surface waters // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 1. P. 166–171. doi: 10.25750/1995-4301-2021-1-166-171

24. Druzhakina O.P., Bukharina I.L., Kovalchuk A.G. Waste utilization in the Udmurt Republic: analysis of the raw material base and current trends // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 4. P. 123–128. doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-123-128

25. Kolesnikov A.V., Meshalkin V.P., Davydkova T.V., Kolesnikov V.A. Scientific and technological foundations of improvement of the resource efficiency of electroflotation recovery of poorly soluble inorganic compounds (oxides, carbides, hydroxides) from aqueous electrolyte solutions // Doklady Physical Chemistry. 2020. V. 494. No. 1. P. 133–138. doi: 10.1134/S001250162009002X

26. Goncharuk V.V., Shkavro Z.N., Badekha V.P., Kucheruk D.D., Sova A.M., Kochkodan V.M. Treatment of drainage water from municipal solid waste landfills using calcium oxide for pre-membrane treatment // Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodospabzhenie. 2008. No. 3. P. 39–44 (in Russian).

27. Kolesnikov A.V., Than Z.H., Kolesnikov V.A., Kovalenko V.S. Extraction by electroflotation of iron, chromium and aluminium hydroxides from aqueous solutions of sodium chlorides and sulphates in the presence of Mg²⁺, Ca²⁺ and surfactants of different types // CIS Iron and Steel Review. 2020. V. 20. P. 61–65. doi: 10.17580/cisr.2020.02.13