

*Л. А. Ильина, В. А. Смирнов, С. Ю. Яценко*

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ПОЛЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ  
ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА  
С ПРИМЕНЕНИЕМ ФЛОКУЛЯТИВНОГО МЕТОДА**

**Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия**

vgtupaph@gmail.com, avdkmi23er@gmail.com, dgain99@gmail.com

Автор, ответственный за переписку: Людмила Александровна Ильина, vgtupaph@gmail.com

В статье освещены вопросы эффективной очистки сточных вод гальванического производства в центробежном поле. Рассмотрена типовая технологическая схема участка очистки сточных вод гальванического производства. Проанализирована существующая математическая модель течения жидкой среды внутри ротора осадительной центрифуги и обоснована нецелесообразность ее использования для определения оптимальных технологических параметров процесса центробежного разделения неоднородной среды в центробежном поле. На основе анализа результатов экспериментальных исследований, полученных другими авторами, разработана стохастическая математическая модель для определения коэффициента очистки в осадительной центрифуге от расхода стоков гальванического производства на этапе их предварительной очистки как с применением флокулянта, так и без него. Получена интерполяционная формула, позволяющая установить косвенную связь между коэффициентом очистки и концентрацией флокулянта, использование которой

позволит значительно сократить количество опытов для определения оптимальной концентрации флокулянта на предварительном этапе очистки сточных вод гальванического производства. Предложен вариант модернизации аппаратного оформления типовой технологической схемы участка гальванического производства путем замены механической очистки на электрохимическую, что позволит повысить эффективность очистки сточных вод от ионов шестивалентного хрома  $\text{Cr}^{6+}$ , относящихся к I классу опасности, до 95 %.

**Ключевые слова:** гальваническое производство, сточные воды, флокулянт, центробежное поле, эффективность очистки, осадительная центрифуга, математическая модель

*L. A. Ilina, V. A. Smirnov, S. Y. Yashchenko*

# EVALUATION OF THE INFLUENCE OF CENTRIFUGAL FIELD ON TREATMENT EFFICIENCY OF GALVANIC PRODUCTION WASTEWATER USING THE FLOCCULATION METHOD

**Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia**

In the article the questions of effective treatment of the galvanic production wastewater in the centrifugal field are considered. A typical technological scheme of galvanic production wastewater treatment area is considered. The existing mathematical model of liquid medium flow inside the rotor of sedimentation centrifuge has been analyzed and its inexpediency of its use for determination of optimal technological parameters of the process of centrifugal separation of inhomogeneous medium in centrifugal field has been substantiated. On the basis of analysis of the results of experimental studies obtained by other authors, a stochastic mathematical model for determining the purification coefficient in the sedimentation centrifuge from the flow rate of galvanic production effluents at the stage of their preliminary purification, both with and without the use of flocculant is developed. An interpolation formula is obtained, which allows to establish an indirect relationship between the purification coefficient and flocculant concentration, the use of which will significantly reduce the number of experiments to determine the optimal concentration of flocculant at the preliminary stage of wastewater treatment of galvanic production. A variant of modernization of hardware design of a typical technological scheme of the galvanic production site by replacing mechanical treatment with electrochemical treatment is proposed, which will increase the efficiency of wastewater treatment from hexavalent chromium ions  $\text{Cr}^{6+}$ , belonging to the I class of danger, up to 95 %.

**Keywords:** galvanic production, wastewater, flocculant, centrifugal field, purification efficiency, sedimentation centrifuge, mathematical model

Гальваническое производство тесно связано с потреблением технической воды в качестве технологического сырья. Водоемкими являются промывочные операции, применяемые для снижения концентрации раствора на поверхности обрабатываемых деталей, выносимого из технологических ванн. Таким образом, гальваническое производство является источником формирования значительного объема опасных сточных вод [1; 2].

Отработанные электролиты гальванических участков характеризуются высоким содержанием металлов, поэтому практический интерес представляет выделение ценных компонентов из отработанных растворов и возврат их в производство [3]. Очистка стоков гальванического производства осуществляется в несколько этапов [1]:

- предварительный, позволяет уловить крупные частицы загрязняющих веществ, осуществляется механическими методами очистки (фильтрование, разделение в осадительных центрифугах);

- завершающий, позволяет повысить эффективность очистки до требуемого уровня ПДК сточных вод, осуществляется химическими и электрохимическими методами очистки.

На эффективность очистки сточных вод гальванического производства оказывает значительное влияние множество факторов на каждом из этапов.

Анализ гидродинамики процесса центрифугирования [4; 5] показывает, что существует три основных регулируемых параметра, определяющих качество очистки растворов: угловые частоты вращения ротора центрифуги и шнека выгрузки, а также расход суспензии.

В настоящее время авторами работ [4; 5] получена математическая модель течения среды внутри ротора центрифуги, базирующаяся на теории слоистого (ламинарного) течения жидкости.

В цилиндрической системе координат закономерности для определения тангенциальной  $v_\varphi$  и осевой  $v_z$  составляющих скорости потока жидкости в зависимости от текущего радиуса  $r$  находят путем интегрирования уравнений Навье – Стокса [4; 5]:

$$v_\varphi = v_{\varphi 0} \cdot \left( \frac{r_{pT} - r}{r_{pT} - r_0} \right); \quad (1)$$

$$v_z = v_{z 0} \cdot \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot t_{\text{ин}}}{r_{pT} - r} \right) \cdot \left( \frac{r_{pT}}{r_0} - 1 \right), \quad (2)$$

где  $v_{\varphi 0}$  – тангенциальная скорость потока жидкости на ее свободной поверхности;  $t_{\text{шн}}$  – длина захода шнека;  $r_{pT}$  – радиус обечайки ротора;  $r_0$  – радиус свободной поверхности жидкости внутри ротора.

Толщину подвижного слоя определяют по формуле:

Время осаждения частиц твердой фазы в роторе центрифуги находят с помощью формулы:

$$\tau_{\text{ц}} = 18 \cdot \frac{\rho \cdot v}{\omega^2 \cdot d^2 \cdot (\rho_T - \rho) \cdot \varepsilon^{4,75}} \cdot \ln \frac{r_{pT}}{r_0} + 1,18 \cdot \sqrt{\frac{r_{pT} \cdot \rho}{\omega^2 \cdot d^2 \cdot (\rho_T - \rho) \cdot \varepsilon^{4,75}}} - \left(1 - \frac{r_0}{r_{pT}}\right), \quad (4)$$

где  $\omega$  – угловая частота вращения ротора;  $d$  – диаметр частиц твердой фазы;  $\varepsilon$  – порозность твердой фазы;  $\rho_T$ ,  $\rho$  – плотность твердой фазы и жидкости соответственно;  $v$  – кинематическая вязкость жидкости.

Время выгрузки осадка из центрифуги определяют по формуле:

$$\tau_{\text{с}} = \frac{i_{\text{шн}} \cdot n}{v_{\text{тр}}}, \quad (5)$$

где  $i_{\text{шн}}$  – длина шага шнека;  $n$  – эффективное число витков шнека, участвующих в транспортировке осажденных частиц твердой фазы;  $v_{\text{тр}}$  – скорость транспортировки осадка.

Математическая модель, представленная выражениями (1)–(5), справедлива для ламинарного режима течения идеальной жидкости. Кроме того, в ней пренебрегают радиальной составляющей скорости потока жидкости  $v_r$ , в силу чего поправочный коэффициент  $k$  в формуле (3) определяется экспериментально. Поэтому использовать данную математическую модель для определения оптимального режима работы промышленной центрифуги с таким количеством допущений весьма затруднительно.

Таким образом, разработка достоверной математической модели для определения параметров эффективного разделения частиц твердой фазы в центробежном поле в процессе очистки сточных вод гальванического производства является актуальной задачей и представляет собой цель настоящей работы.

Рассмотрим типовую технологическую схему участка очистки сточных вод гальванического производства (рис. 1).

На данном участке предусмотрена двухступенчатая система очистки, состоящая из осадительной горизонтальной центрифуги со шнековой выгрузкой осадка (ОГШ) и двух отстойников. Для повышения эффективности очистки на предварительном этапе применяется флокулянт

$$\delta_{\text{н.сл}} = k \cdot \left( \frac{Q}{\omega_{\text{от}} \cdot \sqrt{F_r}} \right)^{1/3}, \quad (3)$$

где  $k$  – эмпирический поправочный коэффициент ( $k = 0,5-1,0$ );  $Q$  – расход суспензии;  $\omega_{\text{от}}$  – угловая частота отстаивания вращения шнека от вращения ротора;  $F_r$  – фактор разделения.

(например полиакриламид-гель технический марки «Аммиачный»), позволяющий укрупнить частицы загрязняющего вещества и повысить эффективность разделения сред. Необходимо отметить, что оптимальная концентрация флокулянта определяется в процессе пробного флокулирования при проведении пуско-наладочных работ на участке. После хромирования промывные воды содержат в среднем 10–100 мг/л ионов шестивалентного хрома  $\text{Cr}^{6+}$  и 1–15 мг/л ионов других металлов.

В работе [6] исследован процесс очистки пульпы в центробежном поле, состоящей из раствора солей тяжелых металлов и нерастворенных промышленных отходов, состоящих из песка ( $\text{SiO}_2$  с примесями соединений Ti, Al, Fe, Ca, Mn, Mg, Cr) и различных шламов. В качестве флокулянта использовались синтетические полиэлектролиты. Центробежное разделение выполнялось на центрифуге ОГШ-353К-09.

На рис. 2 представлены графики зависимости коэффициента очистки  $K_{\text{оч}}$  (отношения массы твердой фазы в единице объема жидкой фазы до и после процесса разделения) раствора, обработанного флокулянт, от расхода подаваемого в центрифугу сырья, полученные в результате выполнения экспериментальных исследований. Необходимо отметить, что коэффициент  $K_{\text{оч}}$  является одним из основных критериев эффективности разделения твердой и жидкой фаз.

Из рис. 2 видно, что эффективность очистки пульпы от тяжелых металлов в центробежном поле с использованием флокулянта снижается при увеличении объемной производительности центрифуги. По всей видимости, это обстоятельство связано с увеличением времени пребывания флоккул в кольцевом слое жидкости внутри ротора при их вынужденном движении в центробежном поле, в про-

цессе которого они разрушаются. Таким образом, при объемной производительности

$Q = 2,0 \text{ м}^3/\text{ч}$  и более использование флокулянта нецелесообразно.

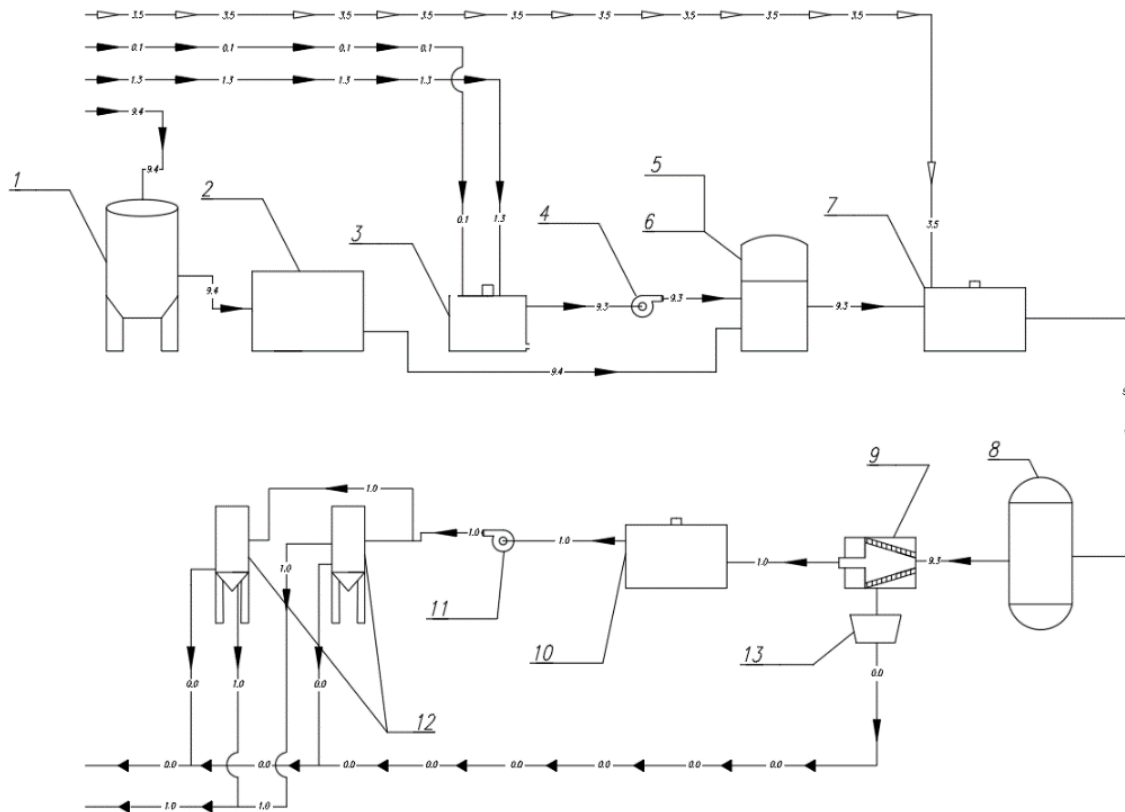


Рис. 1. Типовая технологическая схема участка очистки сточных вод гальванического производства:  
1 – шламоприемник; 2, 6 – емкости подготовки осадка; 3 – установка приготовления флокулянта; 4, 11 – насосы; 5 – коллектор флокулянта; 7 – коллектор барботаж; 8 – бак дозирования осадка; 9 – осадительная центрифуга; 10 – бак фугата; 12 – отстойники-осветлители; 13 – технологическая тара

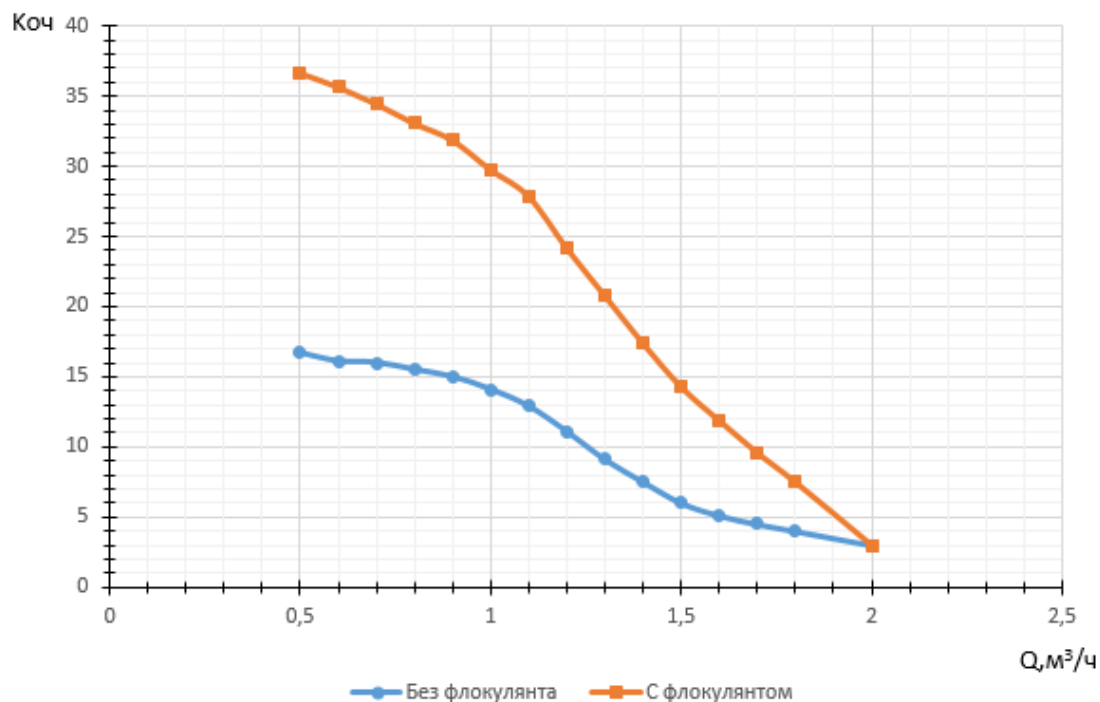


Рис. 2. Графики зависимости коэффициента очистки  $K_{оч}$  от расхода сырья  $Q$ , поступающего в центрифугу ОГШ-353К-09, работающую в номинальном режиме [6]

Математическая обработка экспериментальных данных рис. 2 [6] ставила своей целью получить полиномиальные уравнения вида:

$$K_{оч} = f(Q) = a + b \cdot Q + c \cdot Q^2 + d \cdot Q^3 + e \cdot Q^4 + g \cdot Q^5. \quad (6)$$

В результате были получены зависимости для определения коэффициента очистки сточных вод от объемной производительности центрифуги:

– без использования флокулянта:

$$K_{оч} = 64,44 - 253,09 \cdot Q + 504,77 \cdot Q^2 - 471,90 \cdot Q^3 + 202,22 \cdot Q^4 - 32,33 \cdot Q^5; \quad (7)$$

– с использованием флокулянта:

$$K_{оч} = 100,49 - 326,58 \cdot Q + 637,21 \cdot Q^2 - 593,25 \cdot Q^3 + 252,11 \cdot Q^4 - 40,03 \cdot Q^5. \quad (8)$$

На рис. 3 представлены графики уравнений (7) и (8) в сравнении с экспериментальными данными [6].

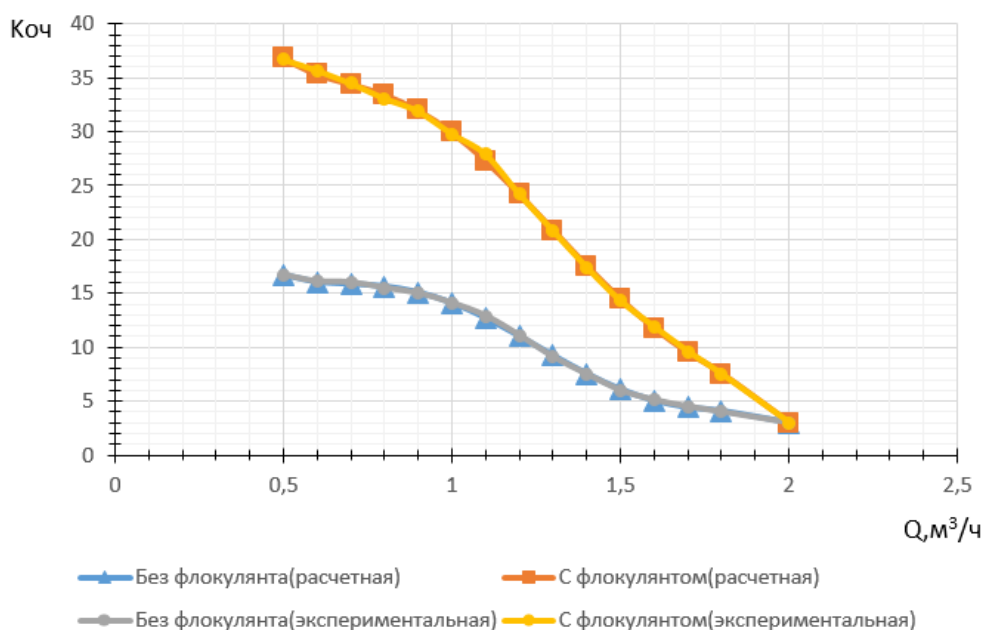


Рис. 3. Графики уравнений (7) и (8) в сравнении с экспериментальными данными [6]

Значения статистических параметров уравнений (7) и (8)

| Статистический параметр                                    | Номер уравнения |       |
|------------------------------------------------------------|-----------------|-------|
|                                                            | (7)             | (8)   |
| Средняя относительная ошибка, %                            | 0,90            | 0,74  |
| Минимальная относительная ошибка, %                        | –2,17           | –2,11 |
| Максимальная относительная ошибка, %                       | +1,91           | +1,13 |
| Табличное значение критерия Кохрена                        | 0,33            |       |
| Расчетное значение критерия Кохрена                        | 0,14            | 0,14  |
| Табличное значение критерия Стьюдента                      | 2,04            |       |
| Расчетное значение критерия Стьюдента для коэффициента $a$ | 30046           | 9923  |
| Расчетное значение критерия Стьюдента для коэффициента $b$ | 118004          | 32248 |
| Расчетное значение критерия Стьюдента для коэффициента $c$ | 235352          | 62921 |
| Расчетное значение критерия Стьюдента для коэффициента $d$ | 220026          | 58579 |
| Расчетное значение критерия Стьюдента для коэффициента $e$ | 94285           | 24894 |
| Расчетное значение критерия Стьюдента для коэффициента $g$ | 15075           | 3952  |
| Табличное значение критерия Фишера                         | 2,21            |       |
| Расчетное значение критерия Фишера                         | 1,46            | 1,24  |

В таблице приведены основные результаты корреляционного и регрессионного анализа экспериментальных данных [6].

Сравнение расчетных и критических значений статистических критериев в таблице позволяет сделать вывод о том, что уравнения регрессии (7) и (8) адекватны и все их коэффициенты значимы.

Уравнения (7) и (8) представляют собой стохастическую математическую модель для определения параметров эффективного разделения частиц твердой фазы в центробежном поле в процессе очистки сточных вод гальванического производства.

В работе [7] предложен вариант модернизации аппаратного оформления типовой технологической схемы участка гальванического производства (рис. 4) путем замены механической очистки в нескольких отстойниках-осветлителях (поз. 12 на рис. 1) на электрохимическую в одном электролизере (поз. 12 на рис. 4), что позволит повысить эффективность очистки сточных вод от ионов шестивалентного хрома  $\text{Cr}^{6+}$ , относящихся к I классу опасности, до 95 %.

Также необходимо отметить, что в работе [6] концентрация флокулянта была постоянной, которая очевидно с некоторым запасом превышала концентрацию порога флокуляции. Как правило, на практике этот запас стремятся минимизировать для сокращения финансовых затрат на закупку флокулянта.

Разработанная математическая модель позволяет косвенно установить связь между коэффициентом очистки и концентрацией флокулянта. Пусть в процессе экспериментальных исследований получены уравнения для определения коэффициента очистки:

– без использования флокулянта (концентрация равна нулю):

$$K_{oc,0} = a_0 + b_0 \cdot Q + c_0 \cdot Q^2 + d_0 \cdot Q^3 + e_0 \cdot Q^4 + g_0 \cdot Q^5; \quad (9)$$

– с использованием флокулянта при его максимальной концентрации (из расчета наибольшей эффективности очистки):

$$K_{oc,max} = a_{max} + b_{max} \cdot Q + c_{max} \cdot Q^2 + d_{max} \cdot Q^3 + e_{max} \cdot Q^4 + g_{max} \cdot Q^5. \quad (10)$$

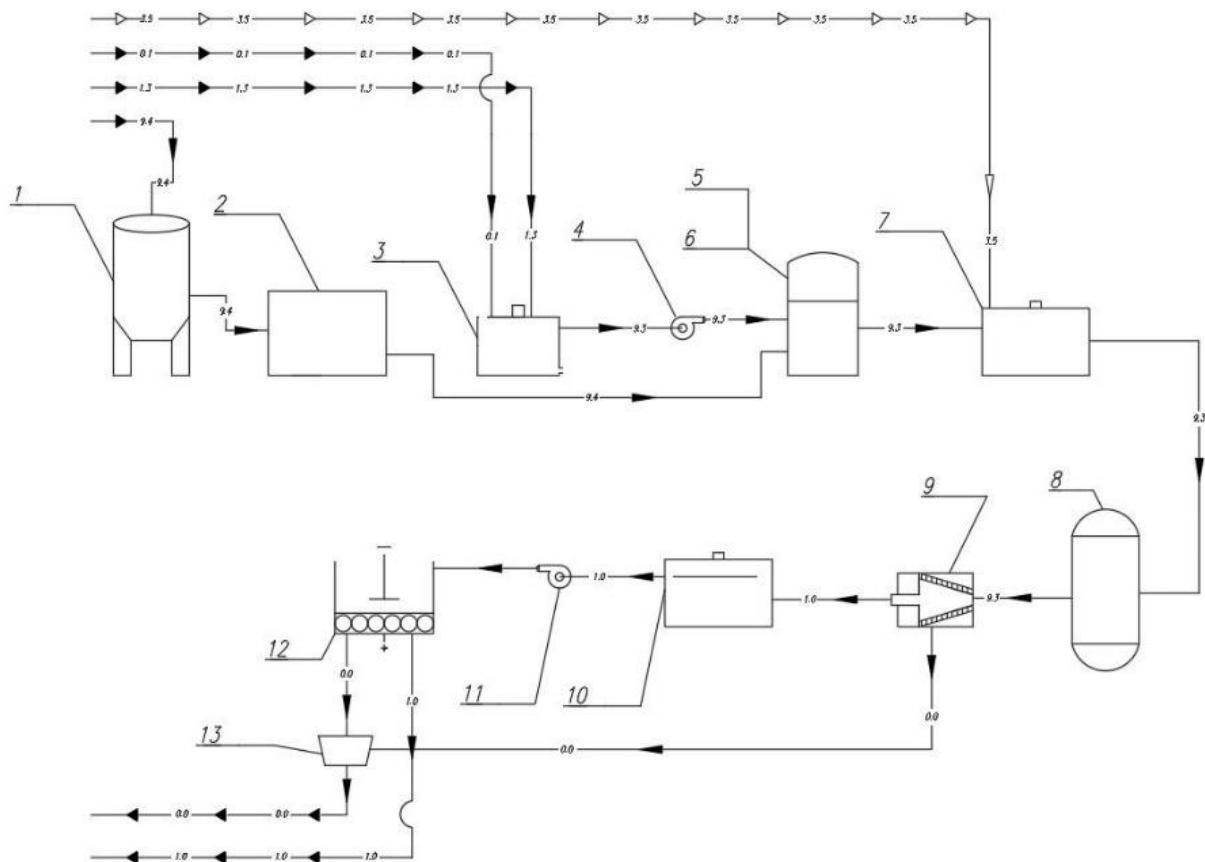


Рис. 4. Предлагаемая технологическая схема участка очистки сточных вод гальванического производства [7]:  
1 – шламоприемник; 2, 6 – емкости подготовки осадка; 3 – установка приготовления флокулянта; 4, 11 – насосы; 5 – коллектор флокулянта; 7 – коллектор барботажа; 8 – бак дозирования осадка; 9 – осадительная центрифуга; 10 – бак фугата; 12 – электролизер; 13 – технологическая тара

Тогда коэффициент очистки при концентрации флокулянта  $C_n \in (0; C_{\max})$  можно определить с помощью интерполяционной формулы:

$$K_{оч, n} = a_n + b_n \cdot Q + c_n \cdot Q^2 + d_n \cdot Q^3 + e_n \cdot Q^4 + g_n \cdot Q^5, \quad (11)$$

$$a_n = a_0 - (a_0 - a_{\max}) \cdot \frac{C_n}{C_{\max}};$$

$$b_n = b_0 - (b_0 - b_{\max}) \cdot \frac{C_n}{C_{\max}};$$

$$c_n = c_0 - (c_0 - c_{\max}) \cdot \frac{C_n}{C_{\max}};$$

$$d_n = d_0 - (d_0 - d_{\max}) \cdot \frac{C_n}{C_{\max}};$$

$$e_n = e_0 - (e_0 - e_{\max}) \cdot \frac{C_n}{C_{\max}};$$

$$g_n = g_0 - (g_0 - g_{\max}) \cdot \frac{C_n}{C_{\max}}.$$

Например, если граничные значения коэффициента очистки определены уравнениями (7) и (8), то есть:

$$K_{оч, 0} = 64,44 - 253,09 \cdot Q + 504,77 \cdot Q^2 - 471,90 \cdot Q^3 + 202,22 \cdot Q^4 - 32,33 \cdot Q^5,$$

$$K_{оч, \max} = 100,49 - 326,58 \cdot Q + 637,21 \cdot Q^2 - 593,25 \cdot Q^3 + 252,11 \cdot Q^4 - 40,03 \cdot Q^5,$$

а концентрация порога флокуляции равна  $C_n = 0,4 \cdot C_{\max}$ , то с небольшим запасом по концентрации для  $C_n = 0,5 \cdot C_{\max}$  будет справедливо уравнение:

$$K_{оч, n} = 82,47 - 289,84 \cdot Q + 570,99 \cdot Q^2 - 532,58 \cdot Q^3 + 227,17 \cdot Q^4 - 36,18 \cdot Q^5. \quad (12)$$

Таким образом, разработанная математическая модель, представленная уравнениями (7) и (8), позволяет количественно оценить эффективность очистки сточных вод гальванического производства в центробежном поле как с использованием флокулянта, так и без него. А использование интерполяционной формулы (11), устанавливающей косвенную связь между коэффициентом очистки и концентрацией флокулянта, позволяет значительно сократить количество опытов для определения оптимальной концентрации флокулянта на предварительном этапе очистки сточных вод от тяжелых металлов и нерастворенных промышленных отходов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Трейман, М. Г.* Современное гальваническое производство и его экологизация / М. Г. Трейман // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2009. – № 9. – С. 15–17.
2. *Виноградов, С. С.* Экологически безопасное гальваническое производство / С. С. Виноградов; под ред.

В. Н. Кудрявцева. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Глобус, 2002. – 352 с.

3. *Курилина, Т. А.* Интенсификация реагентного обезвреживания сточных вод гальванического производства / Т. А. Курилина, П. В. Алексеева // The Scientific Heritage. – 2021. – № 63–1 (63). – С. 10–15.

4. *Соколов, В. И.* Центрифугирование / В. И. Соколов. – Москва : Химия, 1976. – 408 с.

5. *Шкоропад, Д. Е.* Центрифуги и сепараторы для химических производств / Д. Е. Шкоропад, О. П. Новиков. – Москва : Химия, 1987. – 256 с.

6. *Колодников, И. А.* Очистка растворов урансодержащих соединений от механических примесей методом центрифугирования / И. А. Колодников, С. Н. Кладиев, С. И. Кривоустов // Известия Томского политехнического университета – 2010. – Т. 317, № 2. – С. 50–54.

7. *Смирнов, В. А.* Аппаратурное оформление участка очистки сточных вод гальванического производства / В. А. Смирнов // Конкурс научно-исследовательских работ студентов Волгоградского государственного технического университета (г. Волгоград, 24–28 апреля 2023 г.): тез. докл. / редкол.: С. В. Кузьмин (отв. ред.) [и др.]; ВолгГТУ, Отдел координации научных исследований молодых ученых УНИИ, Общество молодых ученых. – Волгоград, 2023. – С. 103–104.