

УДК 628.345.9

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ВОДОПОДГОТОВКИ ОБОРОТНОЙ ВОДЫ ЗАВОДА ПО ВТОРИЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКЕ ПЛАСТМАСС

Дюрягина Антонина Николаевна<sup>1</sup>,  
adyuryagina@inbox.ru

Островной Кирилл Александрович<sup>1</sup>,  
kostrovnoy@mail.ru

Голодова Ирина Викторовна<sup>1</sup>,  
igolodova@inbox.ru

Шаймерденова Зарина Нурлановна<sup>1</sup>,  
zarina.mambetova@gmail.com

Козик Дарья Юрьевна<sup>1</sup>,  
daria.kozik@mail.ru

Дюсикеева Алия Кайратовна<sup>1</sup>,  
aliya\_dyusikeeva@mail.ru

<sup>1</sup> НАО Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева,  
Казахстан, 150000, г. Петропавловск, ул. Пушкина, 86.

**Актуальность.** Одной из наиболее актуальных глобальных проблем является вторичная переработка пластиковых отходов, которая невозможна без качественной тщательной промывки отработанного пластика. В настоящее время проблема вторичной переработки пластмассовых изделий поставлена особенно остро. Вследствие этого на предприятиях, ориентированных на вторичную переработку пластмасс, уделяется особое внимание подготовке исходного сырья. Наличие даже небольших количеств загрязнений приводит к ухудшению показателей качества вторичных полимеров (насыпная плотность, прочность, сыпучесть), получаемых в виде флека или регранулята. Для удаления труднорастворимых примесей различной природы используют коагулянты и флокулянты. Отсутствие единой теории применения коагулирующих реагентов и оптимальных режимных параметров водоподготовки вторичной воды влечет за собой избыточные расходы реагентов, что является как технологически, так и экономически невыгодным. При этом на подавляющем большинстве предприятий выбор режимных параметров водочистки (концентрация реагентов, температура, время коагуляции) осуществляется чисто эмпирически. В свою очередь точный подбор количества реагентов дает возможность максимально увеличить эффективность водоподготовки и обеспечить требования стандартов по их остаточной концентрации в оборотной воде. Проблема оптимизации процесса водоподготовки является, безусловно, актуальной, так как эффективность использования коагулянтов и флокулянтов зависит от большого количества факторов. Вместе с тем использование вероятностно-детерминированного планирования позволяет научно обосновано оптимизировать процесс очистки воды и тем самым исключить перерасход реагентов.

**Целью** исследования является оптимизация режимных параметров очистки оборотной воды предприятия по вторичной переработке пластмасс.

**Методы:** седиментационный анализ, метод вероятностно-детерминированного планирования.

**Результат.** Изучены процессы коагуляции и флокуляции загрязнителей оборотной воды предприятия по вторичной переработке пластмасс. На основе использования принципов вероятностно-детерминированного планирования эксперимента проведен цикл исследований, направленный на установление режимов водочистки оборотной воды. Установлены кинетические зависимости процесса седиментации в присутствии коагулянта сульфата алюминия и высокомолекулярного катионного низкозарядного флокулянта. Установлены оптимальные режимы коагуляции: расходы коагулянта и флокулянта, температура, продолжительность процесса коагуляции.

**Ключевые слова:**

Коагулянт, флокулянт, сульфат алюминия, оборотная вода, вторичная переработка пластмасс.

### Введение

В настоящее время проблема вторичной переработки пластмассовых изделий в глобальном масштабе поставлена особенно остро и является актуальной проблемой современности. Причиной тому является загрязнение пластмассой окружающей среды. Пластиковые изделия при сжигании образуют большое количество вредных выбросов в атмосферу, а при подземной утилизации на полигонах процесс разложения пластика занимает очень длительный период

[1–5]. Одной из главных проблем, которую приходится решать при переработке вторичных полимеров, является загрязненность отходов пластика, поступающих с городских полигонов. Изготовление качественного гранулята из загрязненного пластика не представляется возможным, вследствие чего возникает необходимость его предварительной очистки водой. Промывка сырья водой осуществляется тремя последовательными стадиями: вымачиванием, зачисткой и разделением. Из экономических соображений вода для промывки пластика чаще всего применяется в за-

мкнутом цикле и после применения подвергается очистке с использованием процессов коагуляции и флокуляции [6–10].

Несмотря на большое количество применяемых технологических решений на подавляющем большинстве предприятий выбор режимных параметров водоочистки (концентрация реагентов, температура, время коагуляции) осуществляется чисто эмпирически [11–15]. Практикующаяся дозировка на очистку одного кубического метра загрязненной воды в среднем составляет 10 литров раствора коагулянта  $Al_2(SO_4)_3$  с концентрацией 80 г/дм<sup>3</sup>, 5 литров раствора высокомолекулярного флокулянта с концентрацией 2 г/дм<sup>3</sup>, продолжительность коагуляции составляет примерно 10 минут при комнатной температуре [16–20]. В свою очередь точный подбор количества реагентов дает возможность максимально увеличить эффективность водоподготовки и обеспечить требования стандартов по их остаточной концентрации в оборотной воде. Проблема оптимизации процесса водоподготовки является, безусловно, актуальной, так как эффективность использования коагулянтов и флокулянтов зависит от большого количества факторов. Таким образом, вопрос оптимизации процессов водоподготовки оборотной воды перерабатывающих пластик предприятий становится не только актуальным, но и экономически целесообразным. Вместе с тем использование вероятностно-детерминированного планирования (ВДП) позволяет научно-обосновано оптимизировать процесс очистки воды и тем самым исключить перерасход реагентов [21].

Целью настоящего исследования являлась оптимизация режимных параметров очистки оборотной воды с применением метода вероятностно-детерминированного планирования.

В качестве коагулянта использовали получивший наибольшее распространение сульфат алюминия (ГОСТ 12966-85). Действие коагулянта заключается в развитии процессов агрегации загрязняющих частиц и последующей седиментации последних. Для интенсификации процессов хлопьеобразования за счет формирования мостиковых связей между слипшимися коллоидными частицами вводили полимерные флокулянты на основе полиакриламида: Флопам (SNF FLOERGER, Франция), Полиакриламид ПАА (водоканальный), Вейстфлок 4312 (ТУ 2216-089-26447891-2016); далее по тексту ФЛ-1, ФЛ-2 и ФЛ-3 соответственно.

#### Методика эксперимента

При проведении эксперимента по оптимизации процессов водоподготовки оборотной воды использовали метод ВДП, который состоял из нескольких этапов:

- определение факторов (входных параметров) и уровней их варьирования;
- построение плана эксперимента в виде план-матрицы, состоящей из  $m$  столбцов, соответствующих количеству входных параметров, и  $n$  строк – количеству экспериментов. Для обеспечения ортогональности план-матрицы каждый уро-

вень одного входного параметра задавался только один раз с каждым уровнем другого входного параметра;

- проведение активного эксперимента согласно сформированной план-матрице и установление числовых значений функции отклика (выходного параметра);
- выборка функции отклика по каждому уровню каждого фактора;
- построение частных зависимостей функции отклика от каждого фактора;
- аппроксимация частных зависимостей и выведение обобщенной математической модели.

В качестве входных параметров, влияющих на процесс седиментации твердофазных загрязнителей в оборотной воде, использовали: температуру ( $t$ , 15–25 °С), продолжительность перемешивания коагулянта с оборотной водой ( $\tau$ , 12–20 мин), концентрации коагулянта ( $C_{\text{коаг}}$ , 0,4–1,2 г/дм<sup>3</sup>) и флокулянта ( $C_{\text{фл}}$ , 0,005–0,015 г/дм<sup>3</sup>). При выборе последних исходили из условий максимального приближения к реальному содержанию вводимых реагентов в оборотную воду, которая подвергается очистке.

Числовые значения уровней для каждого фактора представлены в табл. 1.

**Таблица 1.** Числовые значения уровней для каждого фактора

**Table 1.** Numerical values of levels for each factor

Уровень Level	Значение фактора/Value of the factor			
	$C_{\text{фл}}$ , г/дм <sup>3</sup> $C_{\text{п}}$ , g/dm <sup>3</sup>	$C_{\text{коаг}}$ , г/дм <sup>3</sup> $C_{\text{соаг}}$ , g/dm <sup>3</sup>	$t$ , °С	$\tau$ , мин/min
1	0,005	0,4	15	12
2	0,010	0,8	20	16
3	0,015	1,2	25	20

В рамках ВДП полнофакторный эксперимент проводили на основе построенной ортогональной план-матрицы четырехфакторного эксперимента на трех уровнях (табл. 2) [21].

**Таблица 2.** Общий вид многоуровневой план-матрицы четырехфакторного эксперимента на трех уровнях

**Table 2.** General view of the multi-level plan matrix of a four-factor experiment at three levels

№ опыта Exp. no.	$C_{\text{фл}}$ , г/дм <sup>3</sup> $C_{\text{п}}$ , g/dm <sup>3</sup>	$C_{\text{коаг}}$ , г/дм <sup>3</sup> $C_{\text{соаг}}$ , g/dm <sup>3</sup>	$t$ , °С	$\tau$ , мин/min	Функция отклика Response function
1	1	1	1	1	$y_1$
2	1	2	2	2	$y_2$
3	1	3	3	3	$y_3$
4	2	1	2	3	$y_4$
5	2	2	3	1	$y_5$
6	2	3	1	2	$y_6$
7	3	1	3	2	$y_7$
8	3	2	1	3	$y_8$
9	3	3	2	1	$y_9$

После реализации активного эксперимента (табл. 1) проводили выборку экспериментального массива по каждому уровню каждого фактора согласно табл. 3.

Таблица 3. Выборка функции отклика из план-матрицы

Table 3. Selection of the response function from the plan matrix

Уровни фактора C <sub>фл</sub> , г/дм <sup>3</sup> Levels of the factor C <sub>п</sub> , g/dm <sup>3</sup>	Выборка Selection	Уровни фактора C <sub>коаг</sub> , г/дм <sup>3</sup> Levels of the factor C <sub>соаг</sub> , g/dm <sup>3</sup>	Выборка Selection	Уровни фактора t, °C Levels of the factor t, °C	Выборка Selection	Уровни фактора τ, мин Levels of the factor τ, min	Выборка Selection
1	$\frac{y_1 + y_2 + y_3}{3}$	1	$\frac{y_1 + y_4 + y_7}{3}$	1	$\frac{y_1 + y_6 + y_8}{3}$	1	$\frac{y_1 + y_5 + y_9}{3}$
2	$\frac{y_4 + y_5 + y_6}{3}$	2	$\frac{y_2 + y_5 + y_8}{3}$	2	$\frac{y_2 + y_4 + y_9}{3}$	2	$\frac{y_2 + y_6 + y_7}{3}$
3	$\frac{y_7 + y_8 + y_9}{3}$	3	$\frac{y_3 + y_6 + y_9}{3}$	3	$\frac{y_3 + y_5 + y_7}{3}$	3	$\frac{y_3 + y_4 + y_8}{3}$

На основе выборки экспериментального массива данных (табл. 3) строили графические зависимости функции отклика от каждого фактора.

На последнем этапе осуществляли аппроксимацию частных зависимостей с получением однопараметрических уравнений  $y=f(m_i)$ , характеризующих влияние на функцию отклика каждого фактора в отдельности. Для построения многофакторной статистической математической модели (обобщенного уравнения) использовали предложенную М.М. Протодяконовым формулу, которая в случае четырехфакторного эксперимента принимает вид:

$$y = \frac{f(m_1) \cdot f(m_2) \cdot f(m_3) \cdot f(m_4)}{g_{cp}^{m-1}}, \quad (1)$$

где  $f(m_1), f(m_2), f(m_3), f(m_4)$  – зависимость функции отклика от фактора  $m_i$ ;  $g_{cp}$  – среднее значение фактической величины выходного параметра ( $y$ ) для всех  $n$  экспериментов (генеральное среднее);  $m$  – количество факторов.

Значения  $g_{cp}$  были рассчитаны по формуле:

$$g_{cp} = \frac{\sum y_i}{n}, \quad (2)$$

где  $\sum y_i$  – совокупность экспериментальных данных в матрице;  $n$  – общее число опытов в план-матрице.

Оценку точности полученных аппроксимированных уравнений и полученных математических моделей оценивали с помощью используемых в методе

ВДП коэффициентов корреляции ( $R$ ) и значимости ( $t_R$ ), рассчитанных по уравнению (3), (4).

$$R = \sqrt{1 - \frac{(n-2) \sum (y_3 - y_\tau)^2}{(n-1) \sum (y_3 - y_{cp})^2}}, \quad (3)$$

где  $n$  – количество опытов;  $y_3$  – экспериментальное значение функции отклика;  $y_\tau$  – теоретическое значение функции отклика;  $y_{cp}$  – среднее значение функции отклика.

$$t_R = \frac{R \sqrt{(n-2)}}{1 - R^2}, \quad (4)$$

За функцию отклика принимали среднюю скорость седиментации твердофазных загрязнителей ( $v_{cp}$ , мм/с) в оборотной воде.

Скорость осаждения твердофазных частиц контролировали во времени по изменению высоты осветленного слоя ( $h$ , мм) в термостатируемом режиме и рассчитывали по уравнению (5) (рис. 1).

$$v_{cp} = \sum \frac{v_i}{n}, \quad (5)$$

где  $n$  – количество измерений в опыте;  $v_i$  – скорость седиментации на высоте  $h_i$ , рассчитанная по формуле (6).

$$v_i = \frac{h_i}{\tau_i}, \quad (6)$$

где  $h_i$  – высота осветленного слоя, мм;  $\tau_i$  – время осаждения до высоты  $h_i$ , с.

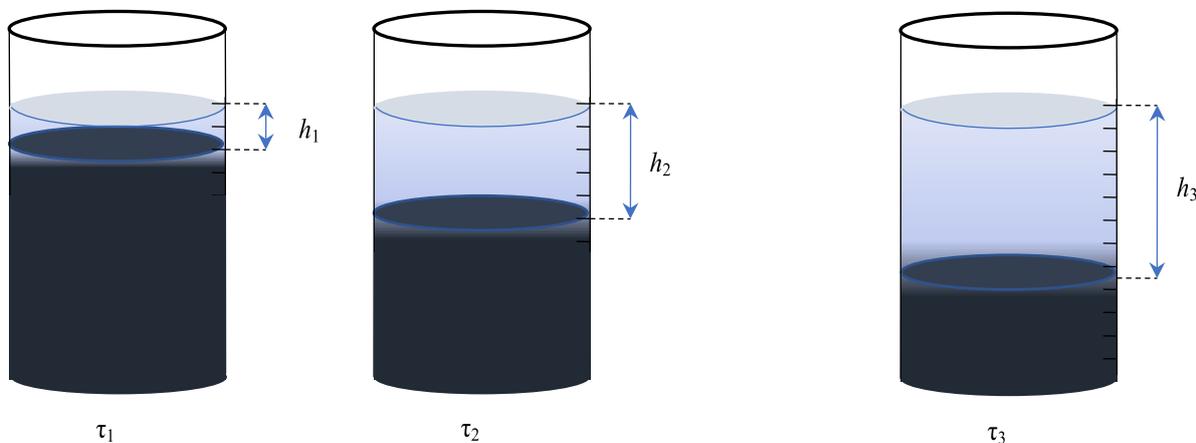


Рис. 1. Измерение высоты осветленного слоя оборотной воды во времени  
 Fig. 1. Measurement of the recycled water clarified layer height in time

В опытах использовали рабочие растворы флокулянта с концентрацией 1 г/дм<sup>3</sup> и коагулянта с концентрацией 80 г/дм<sup>3</sup>. Опыты проводили в термостатируемом режиме в стеклянном стакане на 250 мл с калибровочной шкалой, в который помещали 200 мл оборотной воды. В суспензию вводили коагулянт и перемешивали в течение времени, в соответствии с условиями матричных опытов (табл. 2). Перемешивание суспензии осуществлялось импеллерной мешалкой. По истечении заданного времени в суспензию добавляли флокулянт, через 30 секунд прекращали перемешивание и измеряли высоту осветленного слоя во времени (рис. 1).

#### Результаты и их обсуждение

Активный эксперимент проводили согласно матрице четырехфакторного эксперимента на трех уровнях (табл. 4).

**Таблица 4.** Матрица четырехфакторного эксперимента на трех уровнях

**Table 4.** Matrix of a four-factor experiment on three levels

№ опыта Exp. no.	$C_{\text{фл}},$ г/дм <sup>3</sup> $C_{\text{п}},$ г/дм <sup>3</sup>	$C_{\text{коаг}},$ г/дм <sup>3</sup> $C_{\text{коаг}},$ г/дм <sup>3</sup>	$t, 0^{\circ}\text{C}$	$\tau,$ мин/мин	ФЛ-1 FL-1	ФЛ-2 FL-2	ФЛ-3 FL-3
1	0,005	0,4	15	12	1,339	1,222	0,520
2	0,005	0,8	20	16	1,067	1,041	0,378
3	0,005	1,2	25	20	1,036	1,135	0,421
4	0,01	0,4	20	20	1,839	0,855	1,323
5	0,01	0,8	25	12	1,274	1,071	0,335
6	0,01	1,2	15	16	1,076	1,163	0,403
7	0,015	0,4	25	16	2,427	1,938	1,282
8	0,015	0,8	15	20	1,729	1,218	0,368
9	0,015	1,2	20	12	1,875	1,129	0,333

Влияние температурных режимов, продолжительности перемешивания, концентраций коагулянта и флокулянтов на скорость осаждения иллюстрируют графики частных зависимостей, представленные на рис. 2.

Увеличение температуры (до 20 °С) и продолжительности перемешивания (до 16 минут) благоприятствует интенсификации процессов агрегации твердофазных частиц при введении в оборотную воду на стадии флокуляции ФЛ-1 и ФЛ-3 (рис. 1, а, б). В системах с ФЛ-2 при аналогичных значениях  $t$  и  $\tau$  фиксировали два экстремума в показателях скорости седиментации; при  $\tau=16$  минут – максимум ( $V_c=1,380$  мм/с), а при  $t=20$  °С – минимум ( $V_c=1,008$  мм/с). В более нагретой воде (свыше 20 °С) наблюдалась тенденция к увеличению  $V_c$ , однако дальнейшее увеличение температуры ограничено рамками действующей технологии водоочистки.

Закономерности изменения скорости осветления воды при изменении содержания в ней сульфата алюминия позволяют выделить два концентрационных участка, разграничивающих активность коагулянта (рис. 2, в).

При ограниченной концентрации (0,4 г/дм<sup>3</sup>) сульфата алюминия фиксировали максимумы скорости седиментации, которые варьируются в диапазоне 1,041–1,868 мм/с, в зависимости от особенностей химического состава вводимого флокулянта.

Увеличение концентрации коагулянта до 0,8 г/дм<sup>3</sup> приводило к замедлению в 2,7 раза скорости осветления отработанной воды для системы с ФЛ-1; в случае использования ФЛ-2 и ФЛ-3 – в 1,2 и 1,4 раза соответственно.

Последующий рост концентрации сульфата алюминия (0,8–1,2 г/дм<sup>3</sup>) почти не оказывал влияния на значения скорости седиментации, которые оставались на том же уровне, что явно свидетельствует о завышенном содержании коагулянта в системах.

Активность флокулянтов (рис. 2, з), в сравнении с концентрационным фактором, установленным для коагулянта, имеет кардинально противоположный характер: наибольшее значение скорости осветления фиксировали в области повышенных концентраций ( $C_{\text{фл}} \geq 0,010$  г/дм<sup>3</sup>).

При сопоставимых концентрациях флокулянтов наибольший эффект в повышении скорости осветления оборотной воды фиксировали в присутствии ФЛ-1. По мере увеличения его концентрации (от 0,005 до 0,015 г/дм<sup>3</sup>) скорость седиментации увеличилась практически в два раза и составила 2,010 мм/с. Другие разновидности флокулянтов (ФЛ-2 и ФЛ-3) характеризуются меньшими изменениями  $V_c$ , которые варьируются в диапазоне 0,221–0,296 мм/с.

Таким образом, можно удостовериться, что используемые в технологии водоочистки содержания являются завышенными для коагулянта и заниженными для флокулянтов.

С целью уточнения содержания коагулянта и флокулянтов для очистки оборотной воды была осуществлена серия дополнительных опытов. При построении план-матрицы уровни варьирования факторов выбирали в области достижения максимальной скорости осаждения твердофазных частиц (табл. 5, б).

**Таблица 5.** Числовые значения уровней для каждого фактора

**Table 5.** Numerical values of levels for each factor

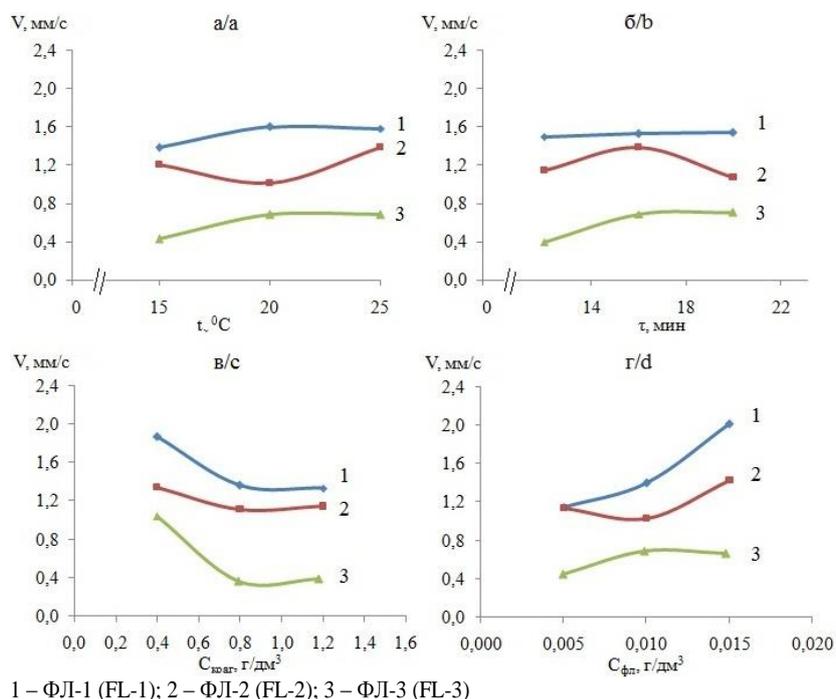
Уровень Level	Значение фактора/Value of the factor			
	$C_{\text{коаг}},$ г/дм <sup>3</sup> $C_{\text{коаг}},$ г/дм <sup>3</sup>	$C_{\text{фл}},$ г/дм <sup>3</sup> $C_{\text{п}},$ г/дм <sup>3</sup>	$t, ^{\circ}\text{C}$	$\tau,$ мин/мин
1	0,08	0,012	16	18
2	0,24	0,014	18	20
3	0,40	0,016	20	22

**Таблица 6.** Матрица четырехфакторного эксперимента на трех уровнях

**Table 6.** Matrix of a four-factor experiment at three levels

№ опыта Exp. no.	$C_{\text{фл}},$ г/дм <sup>3</sup> $C_{\text{п}},$ г/дм <sup>3</sup>	$C_{\text{коаг}},$ г/дм <sup>3</sup> $C_{\text{коаг}},$ г/дм <sup>3</sup>	$t, ^{\circ}\text{C}$	$\tau,$ мин/мин	ФЛ-1 FL-1	ФЛ-2 FL-2	ФЛ-3 FL-3
1	0,012	0,08	16	18	2,497	0,659	0,793
2	0,012	0,24	18	20	1,609	1,362	0,813
3	0,012	0,40	20	22	1,441	1,463	0,640
4	0,014	0,08	18	22	2,740	1,033	1,417
5	0,014	0,24	20	18	2,740	0,832	1,417
6	0,014	0,40	16	20	1,492	1,005	1,006
7	0,016	0,08	20	20	3,268	0,948	1,492
8	0,016	0,24	16	22	2,037	0,751	0,881
9	0,016	0,40	18	18	2,105	1,168	0,725

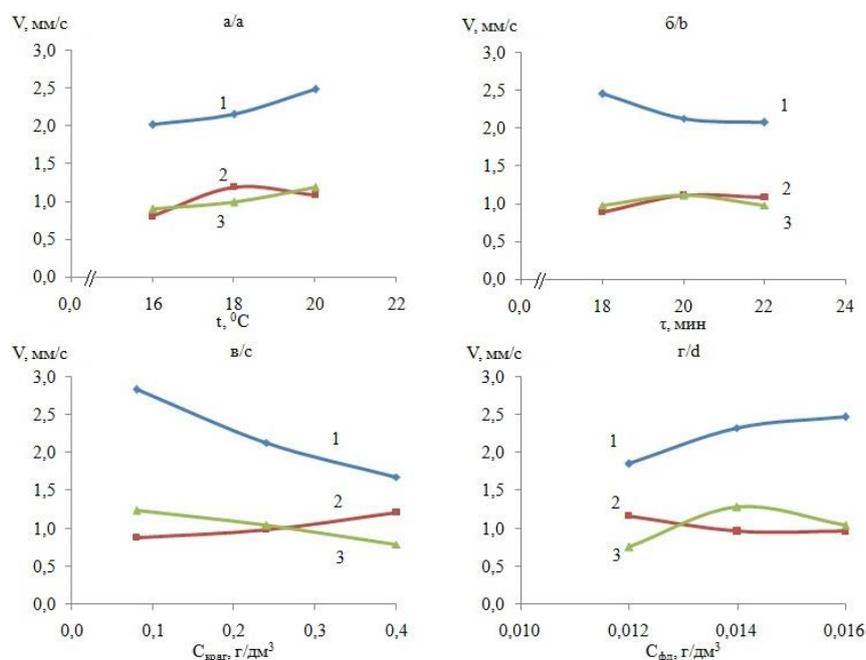
На основе объединенного массива экспериментальных данных построены зависимости средней скорости осаждения твердофазных частиц, которые представлены на рис. 3.



1 – ФЛ-1 (FL-1); 2 – ФЛ-2 (FL-2); 3 – ФЛ-3 (FL-3)

**Рис. 2.** Частные зависимости скорости осаждения от температуры (а), продолжительности перемешивания (б), концентрации коагулянта (в), концентрации флокулянта (г), построенные по выборке функции отклика из экспериментального массива (табл. 4)

**Fig. 2.** Partial dependences of the sedimentation rate on temperature (a), duration of mixing (b), concentration of coagulant (c), concentration of flocculant (d), constructed from a sample of the response function from the experimental array (table 4)



1 – ФЛ-1 (FL-1); 2 – ФЛ-2 (FL-2); 3 – ФЛ-3 (FL-3)

**Рис. 3.** Зависимости скорости осаждения твердофазных компонентов оборотной воды от температуры (а), продолжительности перемешивания (б), концентрации коагулянта (в), концентрации флокулянта (г), построенные по выборке функции отклика из экспериментального массива (табл. 6)

**Fig. 3.** Dependences of the sedimentation rate of solid-phase components of recycled water on temperature (a), duration of mixing (b), concentration of coagulant (c), concentration of flocculant (d), constructed from a sample of the response function from the experimental array (table 6)

В системах с ФЛ-2 (рис. 3) наблюдались ярко выраженные экстремумы в показателях средней скорости седиментации в зависимости от всех четырех факторов. Пики фиксировали при  $C_{\text{коаг}}=0,4$  г/дм<sup>3</sup>,  $C_{\text{фл}}=0,015$  г/дм<sup>3</sup>,  $t=25$  °С,  $\tau_{\text{коаг}}=16$  мин.

В присутствии ФЛ-1 и ФЛ-3, в отличие от ФЛ-2, были выявлены экстремумы только от трех факторов (рис. 3, б, в, з), которые свидетельствуют, что очистку воды следует производить при температуре 18–20 °С, при концентрации флокулянтов (ФЛ-1 или ФЛ-3) 0,014 г/дм<sup>3</sup> и времени перемешивания 18 минут. Если говорить о коагулянте, то отсутствие пика (рис. 3, а, кривые 1 и 3) на концентрационной зависимости предопределило исследование в области еще меньших концентраций сульфата алюминия ( $C \leq 0,08$  г/дм<sup>3</sup>) при оптимальных для данных систем параметрах водоочистки ( $C_{\text{фл}}=0,014$  г/дм<sup>3</sup>,  $t=20$  °С,  $\tau_{\text{коаг}}=18$  мин).

Экстремумы были выявлены при концентрации коагулянта 0,08 г/дм<sup>3</sup> в системе с ФЛ-1 и 0,04 г/дм<sup>3</sup> – с ФЛ-3 (рис. 4).

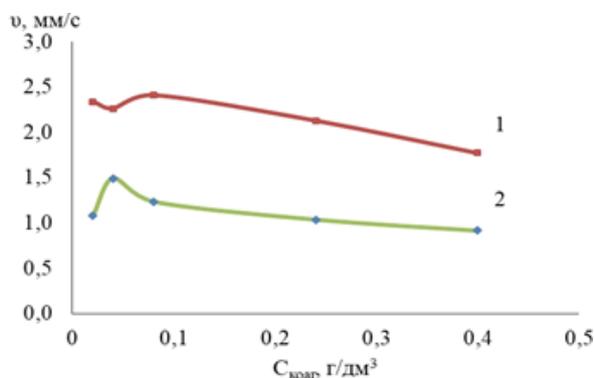


Рис. 4. Зависимость скорости осаждения загрязнителей от расходов сульфата алюминия в системах с ФЛ-1 (1) и ФЛ-3 (2)

Fig. 4. Dependence of the deposition rate of pollutants on the consumption of aluminum sulfate in systems with FL-1 (1) and FL-3 (2)

После аппроксимации частных зависимостей получены однопараметрические уравнения, которые объединены в полнофакторные математические модели (уравнения (7)–(12)):

По частным зависимостям рис. 2:

$$V_{\text{cp}} = (-0,004t^2 + 0,201t - 0,614) \times (-1,513C_{\text{коаг}}^2 - 3,094C_{\text{коаг}} + 2,863) \times (0,317e^{56,07C_{\text{фл}-1}} \tau^{0,05}), \quad (7)$$

$$V_{\text{cp}} = 0,583(-0,011t^2 + 0,434t + 5,171) \times (0,815C_{\text{коаг}}^2 - 1,549C_{\text{коаг}} + 1,827) \times (10024C_{\text{фл}-2}^2 - 170C_{\text{фл}-2} + 1,736) \times (-0,017\tau^2 + 0,542\tau - 2,886), \quad (8)$$

$$V_{\text{cp}} = 4,723(-0,004t^2 + 0,221t + 1,786) \times (2,288C_{\text{коаг}}^2 - 4,455C_{\text{коаг}} + 2,451) \times (-5668C_{\text{фл}-3}^2 + 134,5C_{\text{фл}-3} - 0,089) \times (-0,008\tau^2 + 0,313\tau - 2,127). \quad (9)$$

По частным зависимостям рис. 3:

$$V_{\text{cp}} = (0,023t^2 - 0,732t + 7,673) \times (-41103,8C_{\text{фл}-1}^2 + 1306,1C_{\text{фл}-1} - 7,905) \times (0,295e^{-1,63C_{\text{коаг}}})(0,0343\tau^2 - 1,4679\tau + 17,739), \quad (10)$$

$$V_{\text{cp}} = 0,95(-0,061t^2 + 2,27t - 19,83) \times (25434C_{\text{фл}-2}^2 - 763C_{\text{фл}-2} + 6,6) \times (-0,03\tau^2 + 1,25\tau - 11,94)(0,79e^{1,001C_{\text{коаг}}}), \quad (11)$$

$$V_{\text{cp}} = 0,98(0,013t^2 + 0,407t - 3,998) \times (-97317C_{\text{фл}-3}^2 + 2795C_{\text{фл}-3} - 18,78) \times (-0,031\tau^2 + 1,247\tau - 11,37)(1,401e^{-1,39C_{\text{коаг}}}). \quad (12)$$

Рассчитанные коэффициенты корреляции ( $R$ ) и значимости ( $t_R$ ) подтвердили достаточную точность математических моделей и сходимость экспериментальных и теоретических значений функции отклика:  $R \geq 0,9$ ;  $t_R > 2$  (табл. 7).

Таблица 7. Экспериментальные ( $V_{\text{эксп}}$ ) и рассчитанные ( $V_{\text{теор}}$ ) по уравнениям (10)–(12) значения функции отклика

Table 7. Experimental ( $V_{\text{exp}}$ ) and calculated ( $V_{\text{teor}}$ ) values of the response function according to equations (10)–(12)

№ опыта Exp. no.	ФЛ-1/FL-1		ФЛ-2/FL-2		ФЛ-3/FL-3	
	$V_{\text{эксп}}$	$V_{\text{теор}}$	$V_{\text{эксп}}$	$V_{\text{теор}}$	$V_{\text{эксп}}$	$V_{\text{теор}}$
	мм/с/mm/s					
1	2,497	2,355	0,659	0,612	0,793	0,770
2	1,609	1,686	1,362	1,336	0,813	0,759
3	1,441	1,464	1,463	1,405	0,640	0,659
4	2,740	2,685	1,033	0,912	1,417	1,469
5	2,740	2,820	0,832	0,789	1,417	1,370
6	1,492	1,524	1,005	0,868	1,006	0,957
7	3,268	3,373	0,948	0,848	1,492	1,562
8	2,037	2,053	0,751	0,726	0,881	0,871
9	2,105	2,000	1,168	1,015	0,725	0,738

Примечание: номер опыта соответствует условиям активного эксперимента табл. 6.

Note: the experiment number corresponds to the conditions of the active experiment in table 6.

Максимальной скорости оседания твердофазных частиц, рассчитанной по полнофакторным математическим моделям (уравнения (10)–(12)), отвечают следующие режимы водоочистки:

- Система «вода – ФЛ-1 – сульфат алюминия»  
 $V_c=3,659$  мм/с.  
 $C_{\text{коаг}}=0,08$  г/дм<sup>3</sup>,  $C_{\text{фл}}=0,014$  г/дм<sup>3</sup>,  $t=20$  °С,  $\tau_{\text{коаг}}=18$  мин.
- Система «вода – ФЛ-2 – сульфат алюминия»  
 $V_c=1,244$  мм/с.  
 $C_{\text{коаг}}=0,4$  г/дм<sup>3</sup>,  $C_{\text{фл}}=0,015$  г/дм<sup>3</sup>,  $t=18$  °С,  $\tau_{\text{коаг}}=20$  мин.
- Система «вода – ФЛ-3 – сульфат алюминия»  
 $V_c=1,858$  мм/с.  
 $C_{\text{коаг}}=0,04$  г/дм<sup>3</sup>,  $C_{\text{фл}}=0,014$  г/дм<sup>3</sup>,  $t=20$  °С,  $\tau_{\text{коаг}}=22$  мин.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что используемые на практике в процессе очистки воды расходы сульфата алюминия необходимо сократить ориентировочно в 10–20 раз, флокулянтов – в 1,25 раз, время перемешивания увеличить на 6–8 мин.

#### Выводы

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Показана возможность использования метода вероятностно-детерминированного планирования при нахождении оптимальных режимных параметров очистки оборотной воды завода по вторичной переработке пластмасс.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Потапова Е.В. Проблема утилизации пластиковых отходов // Известия Байкальского Государственного Университета. Рубрика: Экология. – 2018. – Т. 28. – С. 535–544.
2. Effects of plastic contamination on water evaporation and desiccation cracking in soil / Yong Wan, Chenxi Wu, Qiang Xue, Xinminnan Hui // Science of the Total Environment. – 2019. – V. 654. – P. 576–582.
3. Contamination in plastic recycling: influence of metals on the quality of reprocessed plastic / M.K. Eriksen, K. Pivnenko, M.E. Olsson, T.F. Astrup // Waste Management. – 2018. – V. 79. – P. 595–606.
4. Yooeun Chae, Youn-Joo An. Current research trends on plastic pollution and ecological impacts on the soil ecosystem: a review // Environmental Pollution. – 2018. – V. 240. – P. 387–395.
5. Plastic pollutants: effective waste management for pollution control and abatement / Kunju Vaikarar Soundararajan Rajmohan, Chandrasekaran Ramya, Manakkal Raja Viswanathan, Sunita Varjani // Current Opinion in Environmental Science & Health. – 2019. – V. 12. – P. 72–84.
6. Faraca G., Astrup Th. Plastic waste from recycling centres: characterisation and evaluation of plastic recyclability // Waste Management. – 2019. – V. 95. – P. 388–398.
7. Design from recycling: a complex mixed plastic waste case study / K. Ragaerta, S. Huysveld, G. Vynke, S. Hubo, L. Veelaert, J. Dewulf, E. Du Bois // Resources, Conservation and Recycling. – 2020. – V. 155. – P. 104646.
8. Rickert J., Cerdas F., Herrmann Ch. Exploring the environmental performance of emerging (chemical) recycling technologies for post-consumer plastic waste // Procedia CIRP. – 2020. – V. 90. – P. 426–431.
9. Plastic recycling in additive manufacturing: a systematic literature review and opportunities for the circular economy / F.A.C. Sanchez, H. Boudaoud, M. Camargo, J.M. Pearce // Journal of Cleaner Production. – 2020. – V. 264. – P. 121602
10. Sogancioglu M., Yel E., Ahmetli G. Investigation of the Effect of Polystyrene (PS) waste washing process and pyrolysis temperature on (PS) pyrolysis product quality // Energy Procedia. – 2017. – V. 118. – P. 189–194.
11. Дубровская О.Г., Евстигнеев В.В., Кулагин В.А. Проблемы очистки сточных вод, содержащих эмульгированные нефте-

2. Применяемая в технологии водоочистки дозировка коагулянта и флокулянтов может быть снижена до 0,04...0,40 и 0,014...0,015 г/дм<sup>3</sup> соответственно, что одновременно обеспечит сохранение требуемой скорости осаждения твердофазных частиц и уменьшение остаточной концентрации реагентов в оборотной воде.
3. Выведенные полнофакторные математические модели водоочистки с применением трех флокулянтов позволяют рассчитать скорость осветления при задаваемых значениях температуры, времени коагуляции и концентрации коагулянта и могут быть использованы при оптимизации процессов водоподготовки оборотной воды завода по вторичной переработке пластмасс.

- продукты в оборотных системах замкнутых циклов водопользования, и пути их решения // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2013. – № 6. – С. 680–688.
12. Технологические и экологические проблемы очистки сточных вод литейного производства и методы их решения / Пономарев А.Я., Манвелов А.Н., Шмырев В.И., Шмырев Д.В. // Человеческий капитал. – 2016. – № 87. – С. 45–47.
  13. Методическое обоснование исследований по очистке воды в отложениях гидроотвала обогатительной установки / В.П. Тихонов, Т.И. Караваева, О.Б. Наумова, А.Ю. Бардиж // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 5. – С. 541.
  14. Paul R., Kenway S., Mukheibir P. How scale and technology influence the energy intensity of water recycling systems-An analytical review // Journal of Cleaner Production. – 2019. – V. 215. – P. 1457–1480.
  15. Centi G., Perathoner S. Recycle rinse water: problems and opportunities // Catalysis Today. – 1999. – V. 53. – P. 11–21.
  16. Настенко А.О., Зосуль О.И. Современные коагулянты и флокулянты в очистке природных и сточных вод // Международный студенческий научный вестник. – 2015. – № 3–4. – С. 531–537.
  17. Дзюбо В.В. О фильтрующих материалах и параметрах работы водоочистных фильтров // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2019. – № 21. – С. 177–187.
  18. Царев Н.С. Техничко-экономические расчеты для инвестиционных проектов в сфере водоснабжения и водоотведения. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 91 с.
  19. Produced water characteristics, treatment and reuse: a review / M.A. Al-Ghouti, M.A. Al-Kaabi, M.Y. Ashfaq, D.A. Dana // Journal of Water Process Engineering. – 2019. – V. 28. – P. 222–239.
  20. Igunnu E.T., Chen G.Z. Produced water treatment technologies // International Journal of Low-Carbon Technologies. – 2014. – V. 9. – P. 157–177.
  21. Мальшев В.П. Вероятностно-детерминированное планирование эксперимента. – М.: Наука, 1981. – 115 с.

Поступила 25.08.2021 г.

#### Информация об авторах

**Дюрягина А.Н.**, кандидат химических наук, ассоциированный профессор, заведующая кафедрой химии и химических технологий, НАО Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева.

**Островной К.А.**, старший преподаватель кафедры химии и химических технологий, НАО Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева.

**Голодова И.В.**, кандидат химических наук, доцент кафедры химии и химических технологий, НАО Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева.

**Шаймерденова З.Н.**, докторант кафедры химии и химических технологий, НАО Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева.

**Козик Д.Ю.**, студент кафедры химии и химических технологий, НАО Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева.

**Дюсикеева А.К.**, магистрант кафедры химии и химических технологий, НАО Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева.

UDC 628.345.9

## RECYCLED WATER TREATMENT OPTIMIZATION AT A PLASTICS RECYCLING PLANT

**Antonina N. Dyuryagina<sup>1</sup>,**  
adyuryagina@inbox.ru

**Kirill A. Ostrovnoy<sup>1</sup>,**  
kostrovnoy@mail.ru

**Irina V. Golodova<sup>1</sup>,**  
igolodova@inbox.ru

**Zarina N. Shaimerdenova<sup>1</sup>,**  
zarina.mambetova@gmail.com

**Daria Y. Kozik<sup>1</sup>,**  
daria.kozik@mail.ru

**Aliya K. Dyusikeeva<sup>1</sup>,**  
aliya\_dyusikeeva@mail.ru

<sup>1</sup> NC JSC North Kazakhstan University named after M. Kozybayev,  
86, Pushkin street, Petropavlovsk, 150000, Kazakhstan.

**Relevance.** One of the most pressing global issues is plastic waste recycling, which is impossible without high-quality thorough washing of the waste plastic. Currently, the issues of recycling plastic products are especially acute. As a result, in the enterprises focused on the recycling of plastics, special attention is paid to the preparation of raw materials. The presence of even small amounts of contaminants leads to a deterioration in the quality indicators of secondary polymers (bulk density, strength, flowability) obtained in the form of fleck or regranulate. Coagulants and flocculants are used to remove sparingly soluble impurities of various natures. The absence of a unified theory of the use of coagulating reagents and the optimal operating parameters of secondary water treatment entails excessive consumption of reagents, which is both technologically and economically unprofitable. At the same time, at the overwhelming majority of enterprises, the choice of regime parameters for water treatment (concentration of reagents, temperature, coagulation time) is carried out purely empirically. Precise selection of the reagent quantity makes it possible to maximize the efficiency of water treatment and meet the requirements of standards for their residual concentration in recycled water. The problem of optimizing water treatment is relevant, since the effectiveness of the use of coagulants and flocculants depends on a large number of factors. At the same time, the use of probabilistic-deterministic planning makes it possible to scientifically optimize the water purification and thereby eliminate the overspending of reagents.

**The propose** of the study is to optimize the operating parameters for recycled water purification at an enterprise for recycling plastics.

**Methods:** sedimentation analysis, method of probabilistic-deterministic planning.

**Result.** The processes of coagulation and flocculation of contaminants in recycled water of an enterprise for recycling plastics have been studied. Based on the use of the principles of probabilistic-deterministic planning of the experiment, a cycle of studies was carried out aimed at establishing the regimes of water purification of recycled water. The kinetic dependence of sedimentation in the presence of a coagulant aluminum sulfate and a high-molecular-weight cationic low-charge flocculant was established. The optimal modes of coagulation: costs of coagulant and flocculant, temperature, duration of coagulation, was established.

### Key words:

Coagulant, flocculant, aluminum sulfate, recycled water, recycling of plastics.

### REFERENCES

- Potapova E.V. The issue of plastic waste utilization. *Proceedings of the Baikal State University. Category: Ecology*, 2018, vol. 28, pp. 535–544. In Rus.
- Yong Wan, Chenxi Wu, Qiang Xue, Xinminnan Hu. Effects of plastic contamination on water evaporation and desiccation cracking in soil. *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 654, pp. 576–582.
- Eriksen M.K., Pivnenko K., Olsson M.E., Astrup T.F. Contamination in plastic recycling: Influence of metals on the quality of reprocessed plastic. *Waste Management*, 2018, vol. 79, pp. 595–606.
- Yooeun Chae, Youn-Joo An. Current research trends on plastic pollution and ecological impacts on the soil ecosystem: a review. *Environmental Pollution*, 2018, vol. 240, pp. 387–395.
- Kunju Vaikarar Soundararajan Rajmohan, Chandrasekaran Ramya, Manakkal Raja Viswanathan, Sunita Varjani. Plastic pollutants: effective waste management for pollution control and abatement. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2019, vol. 12, pp. 72–84.
- Faraca G., Astrup Th. Plastic waste from recycling centres: Characterisation and evaluation of plastic recyclability. *Waste Management*, 2019, vol. 95, pp. 388–398.
- Ragaerta K., Huysveld S., Vynke G., Hubo S., Veelaert L., Dewulf J., Du Bois E. Design from recycling: a complex mixed plastic waste case study. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, vol. 155, pp. 104646.
- Rickert J., Cerdas F., Herrmann Ch. Exploring the environmental performance of emerging (chemical) recycling technologies for post-consumer plastic waste. *Procedia CIRP*, 2020, vol. 90, pp. 426–431.
- Cruz Sanchez F.A., Boudaoud H., Camargo M., Pearce J.M. Plastic recycling in additive manufacturing: A systematic literature review and opportunities for the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 264, pp. 121602
- Sogancioglu M., Yel E., Ahmetli G. Investigation of the effect of polystyrene (PS) waste washing process and pyrolysis temperature on (PS) pyrolysis product quality. *Energy Procedia*, 2017, vol. 118, pp. 189–194.
- Dubrovskaya O.G., Evstigneev V.V., Kulagin V.A. The problem of purification of waste water containing emulsified oil in the

- circulating system closed cycle water use, and the ways of their solution. *Journal of the Siberian Federal University. Series: Equipment and technologies*, 2013, vol. 6, pp. 680–688. In Rus.
12. Ponomarev A.Ya., Manvelov A.N., Shmyrev V.I., Shmyrev D.V. Technological and environmental problems of foundry wastewater treatment and methods of their solution. *Human capital*, 2016, vol. 87, pp. 45–47. In Rus.
  13. Tihonov V.P., Karavaeva T.I., Naumova O.B., Bardizh A.Yu. Methodological substantiation of research on water treatment in the deposits of a hydraulic dump of a processing plant. *Modern problems of science and education*, 2013, vol. 5, p. 541. In Rus.
  14. Paul R., Kenway S., Mukheibir P. How scale and technology influence the energy intensity of water recycling systems-An analytical review. *Journal of Cleaner Production*, 2019, vol. 215, pp. 1457–1480.
  15. Centi G., Perathoner S. Recycle rinse water: problems and opportunities. *Catalysis Today*, 1999, vol. 53, pp. 11–21.
  16. Nastenka A.O., Zosul O.I. Modern coagulants and flocculants in natural and waste water treatment. *International student scientific Bulletin*, 2015, vol. 3–4, pp. 531–537. In Rus.
  17. Dzyubo V.V. Filtering materials and operating parameters of water purifiers. *Bulletin of the Tomsk state University of architecture and civil engineering*, 2019, vol. 21, pp. 177–187. In Rus.
  18. Tsarev N.S. Tekhniko-ekonomicheskie raschety dlya investitsionnykh proektov v sfere vodosnabzheniya i vodootvedeniya [Technical and economic calculations for investment projects in the field of water supply and sanitation]. Yekaterinburg, Ural University Publ. house, 2016. 91 p.
  19. Al-Ghouti M.A., Al-Kaabi M.A., Ashfaq M.Y., Dana A.D. Produced water characteristics, treatment and reuse: a review. *Journal of Water Process Engineering*, 2019, vol. 28, pp. 222–239.
  20. Igunnu E.T., Chen G.Z. Produced water treatment technologies. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 2014, vol. 9, pp. 157–177.
  21. Malyshev V.P. Veroyatnostno-determinirovannoe planirovanie eksperimenta [Probabilistic-deterministic planning of the experiment]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 115 p.

Received: 25 August 2021.

#### Information about the authors

**Antonina N. Dyuryagina**, Cand. Sc., associate professor, head of the Chemistry and chemical technologies Department, NC JSC North Kazakhstan University named after M. Kozybayev.

**Kirill A. Ostrovnoy**, senior lecturer, NC JSC North Kazakhstan University named after M. Kozybayev.

**Irina V. Golodova**, Cand. Sc., associate professor, NC JSC North Kazakhstan University named after M. Kozybayev.

**Zarina N. Shaimerdenova**, postgraduate student, NC JSC North Kazakhstan University named after M. Kozybayev.

**Daria Y. Kozik**, student, NC JSC North Kazakhstan University named after M. Kozybayev.

**Aliya K. Dyusikeeva**, postgraduate student, NC JSC North Kazakhstan University named after M. Kozybayev.