

УДК 628.32

DOI: 10.17673/Vestnik.2024.01.01

В. И. КИЧИГИН  
А. А. ЮДИН

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-СТАТИСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ВЛАГОУТДАЧИ ОБРАБОТАННОЙ РЕАГЕНТАМИ СМЕСИ СЫРОГО ОСАДКА И УПЛОТНЕННОГО АКТИВНОГО ИЛА

EXPERIMENTAL AND STATISTICAL MODELS MOISTURE RELEASE OF THE MIXTURE TREATED  
WITH REAGENTS RAW SLUDGE AND COMPACTED ACTIVE SLUDGE

Проверена технология изменения удельного сопротивления смеси сырого осадка и уплотненного активного ила, взятого после иловой насосной станции городских очистных канализационных сооружений, за счет обработки осадка сернокислым алюминием и полиакриламидом (ПАА) дозами от 0 до 300 мг/дм<sup>3</sup>. Установлена степень влияния каждого реагента на процесс обезвоживания исследуемого осадка. Показано, что на процесс влагоотдачи ПАА оказывает примерно в 2 раза большее влияние, чем Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> при дозах реагентов от 0 до 200 мг/дм<sup>3</sup> и примерно в 1,5 раза – при дозах от 100 до 300 мг/дм<sup>3</sup>. Получены математические модели зависимости изменения удельного сопротивления осадка от количества вводимых в него Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> и ПАА. Математические модели представлены и в графическом виде (изолиниями). Определены оптимальные дозы коагулянта и флокулянта для химической обработки исследуемого осадка сточных вод.

**Ключевые слова:** удельное сопротивление осадка, математическая и графическая модели его влагоотдачи, оптимальная доза реагентов

На городских очистных сооружениях (ГОКС) образуется несколько видов осадка [1]: сырой осадок после первичных отстойников; неуплотненный активный ил после вторичных отстойников; избыточный активный ил после илоуплотнителя; смесь сырого осадка и уплотненного активного ила.

The technology of changing the resistivity of a mixture of raw sludge and compacted activated sludge taken after the sludge pumping station of urban sewage treatment plants by treating the sludge with aluminum sulfate and polyacrylamide (PAA) in doses from 0 to 300 mg/dm<sup>3</sup> has been tested. The degree of influence of each reagent on the process of dehydration of the sediment under study has been established. It has been shown that PAA has about 2.0 times greater effect on the process of moisture loss than Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> at reagent doses from 0 to 200 mg/dm<sup>3</sup> and about 1.5 times – at doses from 100 to 300 mg/dm<sup>3</sup>. Mathematical models of the dependence of the change in the resistivity of the sediment on the amount of Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> and PAA introduced into it are obtained. Mathematical models are also presented in graphical form (isolines). The optimal doses of coagulant and flocculant for chemical treatment of the studied sewage sludge were determined.

**Keywords:** the resistivity of sludge, mathematical and graphical models of its moisture loss, the optimal dose of reagents

Сырой осадок с влажностью около 95 % образуется в процессе отстаивания стоков в первичных отстойниках. Он состоит из достаточно легко декантированных взвешенных частиц. Активный ил с вторичных отстойников характеризуется низкой концентрацией сухого вещества (влажность 99,2 – 99,6 %). Активный ил после

илоуплотнителей обладает высокой структурообразующей способностью, в которой вода находится в коллоидно-связанном виде и имеет влажность 95,0 – 97,5 %. Смесь сырого осадка и уплотнённого избыточного активного ила (влажность  $\approx 96$  %) занимает промежуточную способность к влагоотдаче [2].

Основной проблемой при обработке осадков бытовых сточных вод является обезвоживание осадка, контролируемое величиной коэффициента удельного сопротивления осадка  $r$ . К сожалению, определение этого показателя не только трудоемко, но и может меняться в больших диапазонах [3]. Для улучшения водоотдающих свойств осадка применяют методы: реагентный, тепловой обработки, жидкофазного окисления, переменного замораживания и оттаивания. Самый распространенный способ, с помощью которого обезвоживают осадки, является реагентный метод. В качестве реагентов применяют органические и минеральные соединения – флокулянты, коагулянты, известь [4–6].

В данной работе представлены результаты исследования возможности изменения удельного сопротивления смеси сырого осадка и уплотненного избыточного активного ила, отобранного с иловой насосной станции городских очистных сооружений, от доз вводимых реагентов. Целью работы является изучение поведения удельного сопротивления смеси сырого осадка и активного ила от доз коагулянта  $D_k$  и флокулянта  $D_{fp}$ , а также выведение уравнений  $Y_i = f(X_1, X_2)$  в неявном виде и уравнений  $r = f(D_k, D_{fp})$ , в явном виде или в виде изолиний.

*Методика проведения исследований.* Опыты проводились на установке [7, рис. 1] по методике, изложенной в работах [3, с. 15-19; 10]. Исходным материалом служила смесь сырого осадка с первичных отстойников и избыточного активного ила после илоуплотнителя ГОКС. Состав исследуемого осадка приведен в табл. 1. Исходный осадок обрабатывался коагулянтом  $Al_2(SO_4)_3$  и флокулянтом ПАА. Опыты проводились при одинаковых условиях. Продолжительность контакта осадка с реагентами равнялась 10 мин при перемешивании на магнитной мешалке 250 мл ила. Осадок профильтровывался под давлением 500 мм рт. ст. через двойной бумажный фильтр с синей лентой. Получаемые данные записывались через каждые 15–30 с (в зависимости от скорости фильтрования). Опыт заканчивался после появления трещин на осадке в воронке Бюхнера [7, рис. 1] или прекращения поступления фильтрата в колбу Бунзена.

Для сокращения продолжительности исследований использовался метод математического планирования экспериментов (планы первого порядка) [8-10]. Было проведено две серии опытов. Основные характеристики планов экспериментов представлены в табл. 2, а матрицы планирования, опытные и расчетные данные – в табл. 3. Порядок проведения опытов в матрицах планирования (табл. 3) рандомизировался с помощью таблицы случайных чисел [9, приложение 2]. Полученные результаты обрабатывались методами математической статистики при уровне значимости  $q = 0,05$  по методике, изложенной в работе [10, с. 136].

Таблица 1  
Table 1

Качественный состав исследуемой смеси сырого осадка и активного ила  
Qualitative composition of the tested mixture of crude precipitate and active sludge

Показатель	Значения показателей по ИАИ смеси сырого осадка и ила
Азот общий, %	5,2
Фосфат общий, %	1,33
Алюминий, мг/дм <sup>3</sup>	6330
Кадмий, мг/дм <sup>3</sup>	5,9
Медь, мг/дм <sup>3</sup>	171
Железо, мг/кг	12200
Никель, мг/дм <sup>3</sup>	29,3
Свинец, мг/дм <sup>3</sup>	17,8
Цинк, мг/дм <sup>3</sup>	1910
Влажность, %	99,0

Таблица 2  
Table 2

Основные характеристики плана экспериментов, мг/дм<sup>3</sup>  
Main characteristics of the experimental plan, mg/dm<sup>3</sup>

Характеристика	Эксперимент № 1		Эксперимент № 2	
	$A_k$	$A_\phi$	$A_k$	$A_\phi$
Основной уровень	100	100	200	200
Интервал варьирования	100	100	100	100
Верхний уровень	200	200	300	300
Нижний уровень	0	0	100	100

Таблица 3  
Table 3

Матрицы планирования экспериментов, опытные и расчётные данные  
Experimental planning matrices, experimental and design data

№ п/п	План				Параметры процесса, мг/дм <sup>3</sup>		Опытные значения удельного сопротивления осадка $r \cdot 10^{-10}$ , см/г			Расчетные значения	
	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_1X_2$	$A_k$	$A_\phi$	$Y_1$	$Y_2$	$\bar{Y}_j$	$S_j^2$	$\hat{Y}_j^p$
Матрица планирования эксперимента № 1											
1	+	+	+	+	200	200	154,4	141,2	147,8	9,33	147,8
2	+	-	+	-	0	200	15,0	13,4	14,2	1,10	14,2
3	+	+	-	-	200	0	419,8	405,1	412,4	10,36	412,6
4	+	-	-	+	0	0	1271,7	1113,4	1192,6	111,95	1192,6
Матрица планирования эксперимента № 2											
1	+	+	+	+	300	300	498,4	492,6	495,5	4,12	495,5
2	+	-	+	-	100	300	66,0	159,9	112,9	66,45	112,9
3	+	+	-	-	300	100	33,8	6,9	20,3	19,05	20,3
4	+	-	-	+	100	100	21,4	26,2	23,8	3,39	23,7

Доверительную оценку искомых величин определяли по формуле

$$|X - \bar{x}| < t(q; k) \cdot S_x / \sqrt{(n - 1)}, \quad (1)$$

где  $X$  – доверительная граница для истинного значения искомой (измеренной) величины;  $\bar{x}$  – среднее арифметическое значение измеряемой величины, рассчитанное по измеренным величинам;  $t$  – критическая точка распределения Стьюдента, определяемая по [10, приложение 5.5] при принятом в расчетах уровне значимости  $q = 0,05$  и числе степеней свободы  $k$ ;  $S_x$  – эмпирический стандарт, определяемый при числе степеней свободы  $k = n - 1$ .

Результаты исследований. Анализ данных, приведенных в табл. 1, показывает, что смесь сырого осадка и активного ила содержит боль-

шое количество цветных металлов, причем основными ингредиентами, мг/дм<sup>3</sup>, являются: алюминий (6330), железо (12200), цинк (1910). Среднее значение исходной влажности этого осадка составляет 99,0 %.

Для получения математических моделей процессов обезвоживания активного ила воспользуемся методикой, представленной в работе [10, с. 154-162]. Так, для эксперимента № 1 (см. табл. 3) имеем следующее.

Воспроизводимость опытов проверяем по критерию Кохрена

$$G_p = S_{max}^2 / \sum_1^N S_i^2 = 66,45 / 93,01 = 0,71. \quad (2)$$

Для наших опытов ( $q = 0,05$ ;  $N = 4$ ;  $k = m - 1 = 2 - 1 = 1$ ) табличное значение критерия Кохрена по [10, приложение 5.8]  $G_{табл.} = 0,9065$ . Условия

$G_p \leq G_{\text{табл.}}$  выполняются, поэтому опыты считаются воспроизводимыми.

Ошибка опыта по формуле (2) составит:

$$S_0^2 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N S_i^2 = 93,01/4 = 33,185 \approx 33,2. \quad (3)$$

Коэффициенты уравнения регрессии определим по формуле

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{y}_i X_0. \quad (4)$$

Для проверки значимости коэффициентов уравнения регрессии вычисляем дисперсию коэффициентов:

$$S_{bi}^2 = S_0^2/N = 33,2/4 = 8,3. \quad (5)$$

Для уровня значимости  $q = 0,05$ , числа степеней свободы  $k = N = 4$  и  $m - 1 = 2 - 1 = 1$  табличное значение критерия Стьюдента по [10, приложение 5.5] будет равно  $t = 2,78$ , а доверительный интервал для коэффициентов  $b_i$  составит:

$$S_{bi} \cdot t = \sqrt{8,3} \cdot 2,78 = 8,0. \quad (6)$$

Коэффициенты оказались значимыми, так как  $|b_0| = 441,8 > S_{b_0} \cdot t$ ;  $|b_1| = -161,6 > S_{b_1} \cdot t$ ;  $|b_2| = -360,8 > S_{b_2} \cdot t$ .

Вычисляем дисперсию адекватности по формуле

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{m}{N-B} \sum_{i=1}^N (y_i - y_{\text{ш}}^p)^2. \quad (7)$$

Уравнение регрессии считается адекватным, если выполняется условие

$$F_p = S_{\text{ад}}^2/S_0^2 < F_T(q; k_{\text{ад}}; k_0), \quad (8)$$

где по [10, приложение 5.6] табличное значение Фишера-Снедекора равно  $F_1(0,05; 2; 4) = 6,94$ .

Тогда уравнения

$$y = 441,8 - 161,6 \cdot X_1 - 360,8 \cdot X_2, \quad (9)$$

$$y = 163,1 + 94,8 \cdot X_1 + 141,1 \cdot X_2 \quad (10)$$

оказываются *неадекватными*, так как  $S_{\text{ад}}^2 = 208758 < S_0^2 = 33,2$  и  $S_{\text{ад}}^2 = 37268 < S_0^2 = 23,2$ . Уравнения

$$y = 441,8 - 161,6 \cdot X_1 - 360,8 \cdot X_2 + 228,4 \cdot X_1 \cdot X_2, \quad (11)$$

$$Y_2 = 163,1 + 94,8 \cdot X_1 + 141,1 \cdot X_2 + 96,5 \cdot X_1 \cdot X_2 \quad (12)$$

будут *адекватными*, так как в случае использования в математической модели в виде *полуквадратичной* функции (формулы (11) и (12))  $S_{\text{ад}}^2 = 0,04 < S_0^2 = 33,2$  и  $S_{\text{ад}}^2 = 0,01 < S_0^2 = 23,2$ .

Так как  $y = r$  ( $10^{-10}$ , см/г),  $x_1 = \Delta_{\text{к}}$  (мг/дм<sup>3</sup>),  $x_2 = \Delta_{\text{ф}}$  (мг/дм<sup>3</sup>), то в пределах  $\Delta_{\text{к}} = 0-200$  мг/дм<sup>3</sup> и  $\Delta_{\text{ф}} = 0-200$  мг/дм<sup>3</sup> для первой серии опытов и  $\Delta_{\text{к}} = 0-300$  мг/дм<sup>3</sup> и  $\Delta_{\text{ф}} = 0-300$  мг/дм<sup>3</sup> для второй серии опытов зависимость  $r_i = f(\Delta_{\text{к}}, \Delta_{\text{ф}})$  можно описывать уравнениями:

$$\begin{aligned} r_1 &= 441,8 - 161,6 \cdot \frac{(x_1 - 100)}{100} - \frac{360,8 \cdot (x_2 - 100)}{100} + 228,4 \cdot \frac{(x_1 - 100)}{100} \cdot \frac{(x_2 - 100)}{100} = \\ &= 441,8 - 161,6 \cdot \frac{(\Delta_{\text{к}} - 100)}{100} - \frac{360,8 \cdot (\Delta_{\text{ф}} - 100)}{100} + 228,4 \cdot \frac{(\Delta_{\text{к}} - 100)}{100} \cdot \frac{(\Delta_{\text{ф}} - 100)}{100} = \\ &= 1192,6 - 3,9 \cdot \Delta_{\text{к}} - 5,892 + 0,02284 \cdot \Delta_{\text{к}} \cdot \Delta_{\text{ф}}; \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} r_2 &= 163,1 + 94,8 \cdot \frac{(x_1 - 200)}{100} + \frac{141,1 \cdot (x_2 - 200)}{100} + 96,5 \cdot \frac{(x_1 - 200)}{100} \cdot \frac{(x_2 - 200)}{100} = \\ &= 163,1 + 94,8 \cdot \frac{(\Delta_{\text{к}} - 200)}{100} + \frac{141,1 \cdot (\Delta_{\text{ф}} - 200)}{100} + 96,5 \cdot \frac{(\Delta_{\text{к}} - 200)}{100} \cdot \frac{(\Delta_{\text{ф}} - 200)}{100} = \\ &= 77,3 - 0,982 \cdot \Delta_{\text{к}} - 0,519 \cdot \Delta_{\text{ф}} + 0,00965 \cdot \Delta_{\text{к}} \cdot \Delta_{\text{ф}}. \end{aligned} \quad (14)$$

Проверка зависимости вероятного коэффициента удельного сопротивления  $r$  от  $D_k$  и  $D_f$  для первой серии опытов по формуле (13), а для второй серии опытов – по формуле (14) представлена в табл. 4. Установлено, что отклонение расчетных значений от опытных данных было менее 1,0 %.

Анализ полученных коэффициентов уравнений регрессии (9) и (12) показывает, что в первой серии опытов удельное сопротивление осадка  $r$  уменьшалось при увеличении дозы флокулянта и коагулянта. Причём на процесс влагоотдачи параметр  $X_2(D_f)$  оказывал большее влияние, чем параметр  $X_1(D_k)$  в  $360,8/161,6 = 2,23$  раза. Во второй серии опытов (при дозе реагентов от 100 до 300 мг/дм<sup>3</sup>) функция  $r = f(D_k, D_f)$  имела уже прямопропорциональную зависимость (см. уравнения (10) и (12)), а на процесс влагоотдачи параметр  $X_2(D_f)$  оказывал большее влияние, чем параметр  $X_1(D_k)$ , только в  $141,1/94,8 = 1,49$  раза.

В табл. 5 представлена обобщенная характеристика математических моделей изменения удельного сопротивления смеси сырого осадка и уплотненного активного ила от дозы реагентов, рассчитанная по формулам (1)–(8). По данным табл. 3 были построены изолинии зависимостей изменения удельного сопротивления смеси сырого осадка и активного ила  $r \cdot 10^{-10}$ , см/г, от доз реагентов (рис. 1 и 2). Для построения изолиний на рис. 1 и 2 были использованы экспериментальные данные, приведенные в табл. 3.

Анализ данных, приведенных на рис. 1, показывает, что величина удельного сопротивления исследуемой смеси осадков уменьшалась с увеличением дозы вводимых реагентов. Причем особенно интенсивно процесс обезвоживания проходил при увеличении  $D_f$  (даже без обработки осадка сернокислым алюминием). В зоне  $D_k$  до 50 мг/дм<sup>3</sup> и  $D_f = 190–200$  мг/дм<sup>3</sup> величина  $r$  не превышала  $100 \cdot 10^{-10}$  см/г. Вероятно, эту зону можно считать «устойчиво-допустимой» для обработки подобной смеси осадков.

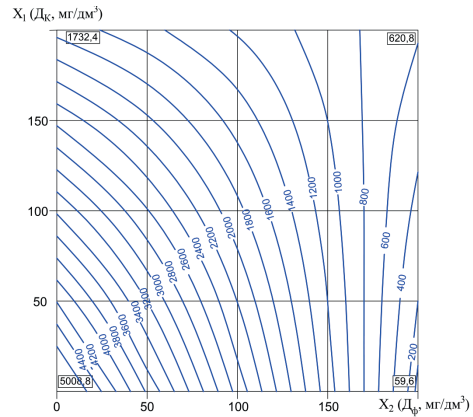


Рис. 1. Изолинии зависимости изменения удельного сопротивления исследуемого осадка  $r \cdot 10^{-10}$ , см/г, от доз реагентов  $D_k = 0–200$  мг/дм<sup>3</sup> и  $D_f = 0–200$  мг/дм<sup>3</sup>  
 Fig. 1. Isolines of the dependence of the change in the resistivity of the studied sediment  $r \cdot 10^{-10}$  cm/g, from reagent doses  $D_k = 0–200$  mg/dm<sup>3</sup> and  $D_f = 0–200$  mg/dm<sup>3</sup>

Таблица 4  
Table 4

Проверка воспроизводимости математических моделей  
Checking the reproducibility of mathematical models

№ п/п	Параметры процесса, мг/дм <sup>3</sup>		Значения удельного сопротивления осадка $r \cdot 10^{-10}$ , см/г		Отклонение расчетных значений от опытных, %
	$D_k$	$D_f$	по опытным данным	рассчитанные по формулам	
Опытные и расчётные данные по формуле (12) к матрице планирования эксперимента № 1					
1	200	200	147,8	147,8	0
2	0	200	14,2	14,2	0
3	200	0	412,4	412,6	-0,037
4	0	0	1192,6	1192,6	0
Опытные и расчётные данные по формуле (13) к матрице планирования эксперимента № 2					
1	300	300	495,5	495,5	0
2	100	300	112,9	112,9	0
3	300	100	20,3	20,3	0
4	100	100	23,8	23,7	0,42

Таблица 5  
Table 5

Обобщенная характеристика математических моделей изменения удельного сопротивления смеси сырого осадка и уплотненного активного ила от дозы реагентов  
Generalized characteristic of mathematical models of resistivity change mixtures of crude precipitate and compacted active sludge from the reagent dose

Показатель	Значения показателей для серий опытов	
	№ 1	№ 2
Расчетное значение критерия Кохрена $G_p$	0,84	0,71
Табличное значение критерия Кохрена $G_{табл}$	0,9065	
Ошибка опыта $S_0^2$	33,2	23,2
Расчетные значения коэффициентов регрессии $b_i$ :		
$b_0$	441,8	163,1
$b_1$	- 161,6	94,8
$b_2$	- 360,8	141,1
Дисперсия коэффициентов $S_{b_i}^2$	8,3	5,8
Доверительный интервал $S_{b_i} \cdot t$	8,0	6,7
Функция отклика (математическая модель) линейная	$Y_1 = 441,8 - 161,6X_1 - 360,8X_2$	$Y_2 = 163,1 + 94,8X_1 + 141,1X_2$
Расчётные значения функции отклика $Y_i$ :		
$Y_1^p$	-80,6	399,0
$Y_2^p$	242,0	209,4
$Y_3^p$	641,0	116,8
$Y_4^p$	964,2	-72,8
Дисперсия адекватности $S_{ад}^2$	208758	37268
Расчетное значение критерия Фишера $F_p$	6292	1606
Табличное значение критерия Фишера $F_m$	6,94	
Условие $F_p = S_{ад}^2 / S_0^2 < F_m(q; k_{ад}; k_0)$ не соблюдается, т. е. представленные выше уравнения регрессии неадекватны. Рассчитаем дополнительные коэффициенты регрессии $b_{12}$ и новые значения функции отклика $Y_i$		
Коэффициенты регрессии $b_{12}$	228,4	96,5
Функция отклика (математическая модель) полуквадратичная	$Y_1 = 441,8 - 161,6X_1 - 360,8X_2 + 228,4X_1X_2$	$Y_2 = 163,1 + 94,8X_1 + 141,1X_2 + 96,5X_1X_2$
Расчётные значения функции отклика, $Y_i$ :		
$Y_1^p$	147,8	495,5
$Y_2^p$	14,2	112,9
$Y_3^p$	412,6	20,3
$Y_4^p$	1192,6	23,7
Дисперсия адекватности $S_{ад}^2$	0,04	0,01



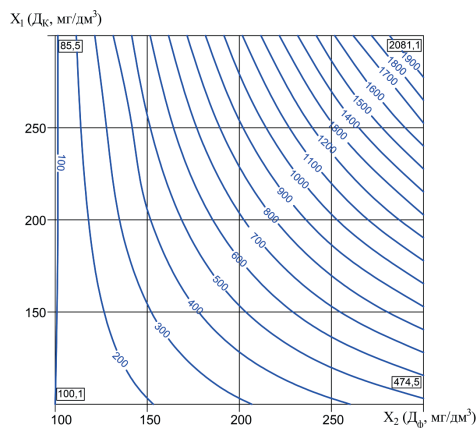


Рис. 2. Изолинии зависимости изменения удельного сопротивления исследуемого осадка  $r \cdot 10^{-10}$ , см/г, от доз реагентов  $D_k = 100\text{--}300$  мг/дм<sup>3</sup> и  $D_\phi = 100\text{--}300$  мг/дм<sup>3</sup>  
 Fig. 2. Isolines of the dependence of the change in the resistivity of the studied sediment  $r \cdot 10^{-10}$  cm/g, from reagent doses  $D_k = 100\text{--}300$  mg/dm<sup>3</sup> and  $D_\phi = 100\text{--}300$  mg/dm<sup>3</sup>

Характер изолиний на рис. 2 показывает, что при увеличении доз коагулянта и флокулянта более 150 мг/дм<sup>3</sup> наблюдался стремительный рост удельного сопротивления осадка, что указывает на снижение скорости его обезвоживания. Было установлено, что при дозах реагентов более 200 мг/дм<sup>3</sup> образовывалась пленка на фильтре в воронке Бюхнера, снижая влагоотдачу. Вероятно, оптимальная доза ПАА не может превышать 125 мг/дм<sup>3</sup>, а доза  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  – 150 мг/дм<sup>3</sup>.

Применение математической модели при экспериментально-статистическом исследовании процессов обезвоживания осадков сточных вод позволяет: выбрать оптимальный технологический режим процесса, сократить план исследовательских работ при разработке технологии производства, создать систему управления процессом.

### Выводы

1. Установлено, что смесь сырого осадка и активного ила содержит большое количество цветных металлов, причем основными ингредиентами, мг/дм<sup>3</sup>, являются: алюминий (6330), железо (12200) и цинк (1910). Среднее значение исходной влажности этого осадка составляет 99,0 %.

2. Изучено изменение удельного сопротивления смеси сырого осадка и уплотненного активного ила от доз коагулянта  $D_k$  и флокулянта  $D_\phi$ . Получены математические модели процесса обезвоживания активного ила в виде уравнения  $r = f(D_k, D_\phi)$  в неявном и явном видах и в виде изолиний.

3. Доказано, что в зоне вводимых концентраций  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  и ПАА от 0 до 200 мг/дм<sup>3</sup> ве-

личина удельного сопротивления исследуемой смеси осадков уменьшалась с увеличением дозы вводимых реагентов. Причем особенно интенсивно процесс обезвоживания проходил при увеличении  $D_\phi$  (даже без обработки осадка сернокислым алюминием). В зоне изменения этих реагентов от 100 до 300 мг/дм<sup>3</sup> с увеличением дозы реагентов увеличивалось и удельное сопротивление осадка  $r \cdot 10^{-10}$ .

4. Установлено, что на процесс влагоотдачи параметр  $X_2 (D_\phi)$  оказывает большее влияние, чем параметр  $X_1 (D_k)$  в первой серии опытов примерно в 2,23, а во второй – в 1,49.

5. Установлено, что в зоне  $D_k$  до 50 мг/дм<sup>3</sup> и  $D_\phi = 190\text{--}200$  мг/дм<sup>3</sup> величина  $r$  не превышала  $200 \cdot 10^{-10}$  см/г. Вероятно, эту зону можно считать «устойчиво-допустимой» для обработки подобной смеси осадков. Можно считать, что оптимальная доза ПАА не может превышать 125 мг/дм<sup>3</sup>, а доза  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  – 150 мг/дм<sup>3</sup>.

6. Применение математических моделей при экспериментально-статистическом исследовании процессов обезвоживания осадков сточных вод позволяет выбрать оптимальный технологический режим обезвоживания, сократить план исследовательских работ и затраты на разработку технологии производства, создать систему управления этим процессом.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Воронов Ю.В., Яковлев С.В. Водоотведение и очистка сточных вод. М.: Изд-во АСВ, 2006. 704 с.
2. Туровский И.С. Обработка осадков сточных вод. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1988. 256 с.: ил. (Охрана окружающей природной среды).
3. Кичигин В.И., Палагин Е.Д. Обработка и утилизация осадков природных и сточных вод / СГАСУ. Самара, 2008. 204 с.
4. Васильев Б.В., Морозов С.В., Пробриский М.Д. Флокулянты для обезвоживания осадков сточных вод на станциях аэрации Санкт-Петербурга // Водоснабжение и санитарная техника. 2001. № 4. С. 13–16.
5. Гумен С.Г., Васильев Б.В., Морозов С.В., Медведев Г.П. Реагентно-тепловая обработка осадков сточных вод // Водоснабжение и санитарная техника. 2001. № 4. С. 21–23.
6. Опыт применения мембранных камерных фильтр-прессов и органических флокулянтов для обезвоживания осадков городских сточных вод / В.А. Загорский, Д.А. Данилович, А.В. Ганин и др. // Водоснабжение и санитарная техника. 2001. № 4. С. 2–7.
7. Кичигин В.И., Юдин А.А. Исследование зависимости удельного сопротивления осадка от его влажности и исходной концентрации бентонитового замутнителя // Градостроительство и архитектура. 2023. Т.13, № 2. С. 22–30. DOI: 10.17673/Vestnik.2023.02.04.
8. Бондарь А.Г., Статюха Г.А. Планирование эксперимента в химической технологии (основные

положения, примеры и задачи). Киев: Вища школа, 1976. 183 с.

9. Саутин С.А. Планирование эксперимента в химии и химической технологии. Л.: Химия, 1975. 48 с.

10. Кичигин В.И. Моделирование процессов очистки воды. М.: Изд-во АСВ, 2003. 203 с.

## REFERENCES

1. Voronov Y.V., Yakovlev S.V. *Vodootvedenie i oshchistka stochnyh vod* [Drainage and wastewater treatment]. Moscow, ASV, 2006. 704 p.

2. Turovsky, I.S. *Obrabotka osadkov stochnyh vod* [Treatment of sewage sludge]. Moscow, Strojizdat, 1988. 256 p.

3. Kichigin V.I., Palagin. E.D. *Obrabotka i utilizaciya osadkov prirodnyh i stochnyh vod* [Processing and utilization of precipitation of natural and wastewater]. Samara, SGASU, 2008. 204 p.

4. Vasiliev B.V., Morozov S.V., Probirskij M.D. Flocculants for dewatering sewage sludge at aeration stations of St. Petersburg. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* [Water supply and sanitary equipment], 2001, no. 4, pp. 13–16. (in Russian)

5. Gumen S.G., Vasilyev B.V., Morozov S.V., Medvedev G.P. Reagent-thermal treatment of sewage sludge. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* [Water supply and sanitary equipment], 2001, no. 4, pp. 21–23. (in Russian)

6. Zagorsky V.A., Danilovich D.A., Ganin A.V. et al. The experience of using membrane chamber filter presses and organic flocculants for dewatering urban wastewater. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* [Water supply and sanitary equipment], 2001, no. 4, pp. 2–7. (in Russian)

7. Kichigin V.I., Yudin A.A. Investigation of the dependence of the resistivity of sediment on its humidity and the initial concentration of bentonite turbidifier. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban planning and architecture], 2023, vol. 13, no. 2, pp. 22–30. (in Russian)

8. Bondar A.G., Statyukha G.A. *Planirovanie eksperimenta v himicheskoj tekhnologii (osnovnye polozheniya, primery i zadachi)* [Experiment planning in chemical technology (main provisions, examples and tasks)]. Kiev, Vishcha shkola, 1976. 183 p.

9. Sautin S.A. *Planirovanie eksperimenta v himii i himicheskoj tekhnologii* [Experiment planning in chemistry and chemical technology]. Leningrad, 1975. 48 p.

10. Kichigin V.I. *Modelirovanie processov oshchistki vody* [Modeling of water purification processes]. Moscow, ASV, 2003. 203 p.

Об авторах:

### КИЧИГИН Виктор Иванович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры водоснабжения и водоотведения Самарский государственный технический университет 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, тел. (846) 339-14-11  
E-mail: kichigin.viktr@rambler.ru

### KICHIGIN Viktor I.

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Water Supply and Wastewater Chair Samara State Technical University 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244, tel. (846) 339-14-11  
E-mail: kichigin.viktr@rambler.ru

### ЮДИН Александр Александрович

аспирант кафедры водоснабжения и водоотведения Самарский государственный технический университет 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, тел. (846) 339-14-11  
E-mail: alex.udin1996@mail.ru

### YUDIN Alexander A.

Postgraduate student of the of the Water Supply and Wastewater Chair Samara State Technical University 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244, tel. (846) 339-14-11  
E-mail: alex.udin1996@mail.ru

Для цитирования: Кичигин В.И., Юдин А.А. Экспериментально-статистические модели влагоотдачи обработанной реагентами смеси сырого осадка и уплотненного активного ила // Градостроительство и архитектура. 2024. Т. 14, № 1. С. 4–11. DOI: 10.17673/Vestnik.2024.01.01.

For citation: Kichigin V.I., Yudin A.A. Experimental and Statistical Models Moisture Release of the Mixture Treated with Reagents Raw Sludge and Compacted Active Sludge. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2024, vol. 14, no. 1, pp. 4–11. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2024.01.01.