

В. И. КИЧИГИН

А. А. ЮДИН

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕАГЕНТНОГО ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ИЗБЫТОЧНОГО АКТИВНОГО ИЛА ИЗ ВТОРИЧНОГО ОТСТОЙНИКА ПРИ ПОМОЩИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-СТАТИСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

INVESTIGATION OF THE TECHNOLOGY OF REAGENT DECONTAMINATION OF EXCESS ACTIVATED SLUDGE FROM A SECONDARY DUMP USING EXPERIMENTAL STATISTICAL MODELS

Исследована технология изменения удельного сопротивления неуплотненного избыточного активного ила за счет обработки осадка шестью видами коагулянта и полиакриламидом (ПАА) дозами от 0 до 200 мг/дм³. Установлена степень влияния каждого реагента на степень обезвоживания ила. Получены математические модели зависимости изменения удельного сопротивления осадка от количества вводимых в осадок коагулянта и флокулянта. Математические модели представлены как в неявном, так и в явном виде (изолиниями). Доказано, что процесс максимального снижения удельного сопротивления неуплотненного избыточного активного ила целесообразнее вести коагулянтами: алюминий полиоксисульфат, хлорное железо дозой до 50 мг/дм³ и флокулянт ПАА дозой 50 мг/дм³.

Ключевые слова: удельное сопротивление ила, вторичный отстойник, математическая и графическая модели его влаготдачи, оптимальная доза реагентов

В России образуется более семи миллионов тонн осадка сточных вод в год с учетом сухого вещества [1]. Проблемы с обработкой осадка и дальнейшей его реализацией были всегда. В некоторых случаях осадок можно использовать в качестве топлива [2], удобрений в сельском хозяйстве [3, 4] (считается наиболее перспективным в мире), в качестве добавки в строительные материалы [5,6]. Обработка осадка является сложным процессом, и прежде чем его утилизировать, необходимо пройти несколько этапов обработки осадка, одним из которых является обезвоживание, оно контролируется коэффициентом удельного сопротивления $r \times 10^{-10}$ см/г. Определение данного показателя всегда трудно. Самым распространённым способом обезвоживания является предварительная обработка реагентами осадка с последующим механическим обезвоживанием [6–8].

A technology has been developed to change the resistivity of compacted excess activated sludge (EAS) by treating sludge with six types of coagulant and polyacrylamide (PAA) in doses from 0 to 200 mg/dm³. The degree of influence of each reagent on the degree of sediment dehydration has been established. Mathematical models of the dependence of the change in the resistivity of the sediment on the amount of coagulant and flocculant introduced into the sediment are obtained. Mathematical models are represented both implicitly and explicitly (by isolines). It has been proved that the process of maximum reduction of the resistivity of uncompact excess activated sludge is more expedient to conduct coagulants: Aluminum polyoxysulfate or Ferric chloride with a dose of up to 50 mg/dm³ and flocculant PAA with a dose of 50 mg/dm³.

Keywords: the specific resistance of sludge, the secondary settling tank, the mathematical and graphical model of its moisture loss, the optimal dose of reagents

В статье представлены результаты исследования изменения удельного сопротивления неуплотненного избыточного активного ила (ИАИ) от доз шести видов коагулянтов (A_k) и одного флокулянта (A_{ϕ}). Целью этих исследований являлось изучение поведения удельного сопротивления активного ила от доз коагулянта и флокулянта, выбор наилучшего реагента для обезвоживания, а также получение математических моделей исследуемых процессов в виде уравнений $Y_i = f(X_1, X_2)$ в неявном виде и удобных для инженерных и технологических расчетов уравнений $r = f(A_k, A_{\phi})$ в явном виде или в виде изолиний.

Методика проведения исследований. Опыты проводились на установке [9, рис. 1] по методике, изложенной в работе [6, с. 15–19]. Исходным материалом служил неуплотненный избыточный активный ил городских очистных

канализационных сооружений (ГОКС) г. Самара. В качестве реагентов использовали шесть видов коагулянта (табл. 1) и флокулянт – полиакриламид (ПАА).

Опыты проводились при одинаковых условиях. Продолжительность контакта активного ила с реагентами равнялась 10 мин и обеспечивалась их перемешиванием на механической мешалке вместимостью 250 мл. 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 фильтрации). Опыт заканчивался после появления трещин на осадке в воронке Бюхнера или прекращения поступления фильтрата в колбу Бунзена (см. соответственно поз. 2 и 4 в [9, рис. 1]).

Для сокращения продолжительности исследований использовался метод математического планирования экспериментов (планы первого порядка) [11-13]. Было проведено 12 серий опытов. Основные характеристики двух

планов экспериментов представлены в табл. 2 (планы № 1 и 2), а усредненные экспериментальные и расчётные данные – в табл. 3. Порядок проведения опытов в матрицах планирования рандомизировался по таблице случайных чисел. Результаты экспериментов обрабатывались методами математической статистики при уровне значимости $q = 0,05$ по методике, изложенной в работе [13, с. 136]. Для получения математических моделей процессов обезвоживания активного ила использовалась методика, приведенная в работе [13, с. 154-162]. Последовательность проверки воспроизводимости опытов, расчета коэффициентов регрессии, определения их значимости и адекватности полученных математических моделей рассмотрены в [10, с. 58].

Результаты исследований. В процессе обработки данных были получены коэффициенты уравнений математических моделей, описывающих процессы влагоотдачи в зависимости от вида вводимых реагентов, представленные в табл. 3. Проверка по критерию

Таблица 1. Доля Al_2O_3 % в коагулянте
Table 1. Proportion of Al_2O_3 % in coagulant

Коагулянт	Характеристики	Содержание Al_2O_3 , %
Сульфат алюминия	ТУ 2013.41-04- 41654713-2014, высший сорт	17,0
Хлорид железа «ФерАква-Аурат»	ТУ 2152-088-00205067-16	40,0 ($FeCl_3$)
Алюминий полиоксисульфат	ТУ 20.13.41-090-00205067-2017, технический очищенный	16,0
Полиоксихлориды алюминия «ГранПАКС»	ТУ 20.59.59-092-00205067-2018	30±3,0
Алюминий хлоргидрат «ГранЭКО»	ТУ 2163-086-00205067-15	45,0±51,0
«АкваАурат™-30»	ТУ 2163-069-00205067-2007, среднеосновный	30±3,0

Таблица 2. Основные характеристики плана экспериментов
Table 2. The main characteristics of the experiment plan

Характеристика	A_{κ} мг/дм ³	A_{ϕ} мг/дм ³	Характеристика	A_{κ} мг/дм ³	A_{ϕ} мг/дм ³
План эксперимента № 1					
Основной уровень	100	100	Верхний уровень	200	200
Интервал варьирования	100	100	Нижний уровень	0	0
Плана эксперимента № 2					
Основной уровень	150	150	Верхний уровень	150	150
Интервал варьирования	100	100	Нижний уровень	50	50

Кохрена показала, что *опыты воспроизводимы*, полученные коэффициенты уравнений регрессии *значимы* по критерию Стьюдента, а уравнений (1) – (12) в табл. 4 адекватны по критерию Фишера-Снедекора. Хорошая воспроизводимость представленных в табл. 4 расчетных формул (1) – (12) *в натуральном виде* показана в табл. 5 и 6.

Анализ данных, приведенных в табл. 3, показал, что в области изменения концентрации вводимого в ИАИ флокулянта от 0 до 200 мг/дм³ удельное сопротивление осадка находилось в *прямо пропорциональной зависимости* от его дозы. Подобная зависимость с остаточной величиной r в этой области изменения дозы коагулянтов была только у FeCl_3 , ГранЭКО и $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, а *обратно пропорциональной* – для коагулянтов: Аква-Аурат-30, алюминий полиоксисульфат и полиоксихлорид алюминий «ГранПАКС»

Влияние ПАА на процесс изменения удельного сопротивления неуплотненного ИАИ было больше, чем влияние коагулянтов для всех сочетаний коагулянтов с ПАА. Например, для сочетаний «Аквa-Аурат-30 / ПАА» примерно в 2,3 раза; для «полиоксисульфат Al / ПАА» – в 1,4 раза; для « FeCl_3 / ПАА» – в 12,1 раза; для «ГранПАКС / ПАА» – в 1,3 раза; для «ГранЭКО / ПАА» – в 6 раз; для « $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ / ПАА» – в 1,2 раза (см. табл. 3, строку $|b_2/b_1|$). Сравнение второй и третьей строк матрицы планирования № 1 показывает, что остаточная величина удельного сопротивления осадка (УСО) была меньше при соотношении $D_k / D_\phi = 200 / 0$, чем при соотношении $0 / 200$ для всех исследованных коагулянтов.

Опыты по плану экспериментов № 2 показали, что в диапазоне изменения независимых факторов D_k и D_ϕ от 50 до 150 мг/дм³ удельное сопротивление ИАИ уменьшалось с увеличением D_k и увеличивалось с ростом вводимой дозы ПАА (см. соответственно знаки при коэффициентах b_1 и b_1). Причем степень влияния флокулянта на изменение остаточной величины r в осадке была больше, чем коагулянта, в несколько раз (см. строку $|b_2/b_1|$ в матрице № 2). Сравнение значений второй и третьей строк матрицы планирования № 2 показывает, что и в диапазоне изменения независимых факторов D_k и D_ϕ остаточная величина УСО была меньше при соотношении $D_k / D_\phi = 150 / 50$, чем при соотношении $50 / 150$ для всех исследованных коагулянтов.

Значимость коэффициентов b_{12} при взаимодействующих факторах всех сочетаний «коагулянт + ПАА» указывает на то, что функция отклика исследуемых математических моделей $Y = f(D_k, D_\phi)$ адекватно описывается не плоскостью, а полуквадратичной формой (сферой),

у которой значение коэффициента b_0 не соответствует фактическому значению функции отклика в центре плана эксперимента. Анализ осредненных экспериментальных данных по четвертой строке табл. 3 (по плану № 2) показал, что минимальное значение удельного сопротивления ИАИ $(10,2 \div 13,7) \times 10^{-10}$ см/г имело место при обработке ИАИ полиакриламидом и коагулянтом дозой 50 мг/дм³ в экспериментах с использованием коагулянтов: «Аквa-Аурат-30», «Алюминий полиоксисульфат», « FeCl_3 » и «ГранЭКО». Повышение дозы флокулянта (строка 2 по плану № 2) увеличивало значение УСО для всех сочетаний исследованных коагулянтов с ПАА.

В четвертой графе табл. 4 приведены уравнения (1) – (12), описывающие математические модели исследуемых процессов, представленные в неявном виде. Для практических технологических расчетов эти уравнения были переведены в явный вид. По уравнениям (1) – (12) в явном виде были построены зависимости $r = f(D_k, D_\phi)$ в виде изолиний. Для иллюстрации здесь приведены графики только для коагулянтов: «Аквa-Аурат-30», «Алюминий полиоксисульфат», « FeCl_3 » и «ГранЭКО» (рис. 1 – 4) в области изменения концентрации вводимых в ИАИ коагулянтов и ПАА от 50 до 150 мг/дм³.

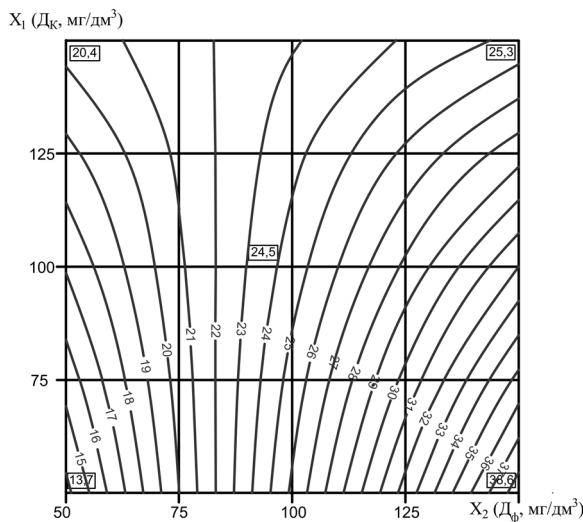


Рис. 1. Зависимость изменения удельного сопротивления исследуемого осадка $r \times 10^{-10}$, см/г, от доз реагентов: $D_k = 50-150$ мг/дм³ (Аквa-Аурат-30) и $D_\phi = 50-150$ мг/дм³ (ПАА)

Fig. 1. Dependence of the change in the resistivity of the sediment under study $r \times 10^{-10}$, cm/g, from reagent doses: $D_k = 50-150$ mg/dm³ (Aqua-Aurat-30) and $D_\phi = 50-150$ mg/dm³ (ПАА)

Таблица 3. Экспериментальные и расчетные значения удельного сопротивления осадка $r \times 10^{-10}$, см/г, в зависимости от дозы и типа коагулянта и флокулянта
 Table 3. Experimental and calculated values of resistivity precipitation $r \times 10^{-10}$, sm/g, depending on the dose and type of coagulant and flocculanta

Доза реагентов, мг/дм ³		ПАА					
A_k	A_ϕ	Аква- Аурат-30	Al поли- оксисульфат	FeCl ₃	ГранПАКС	Гран-ЭКО	Al ₂ (SO ₄) ₃
По плану эксперимента № 1							
200	200	64,4	52,5	83,4	51,9	116,3	3104,5
0	200	80,1	81,3	80,1	80,1	80,1	394,5
200	0	26,6	35,9	45,0	29,1	29,4	67,7
0	0	43,7	45,2	42,0	45,5	45,2	88,6
b_0		53,7	53,72	62,62	51,65	67,75	913,82
b_1		-8,20	-9,52	1,58	-11,15	5,1	672,28
b_2		18,58	13,18	19,12	14,35	30,45	835,68
b_{12}		0,35	-4,90	0,075	-2,95	13,0	682,72
		-2,3	-1,38	12,1	1,3	6,0	1,2
По плану эксперимента № 2							
150	150	25,3	37,9	64,9	47,1	51,5	665,9
50	150	38,6	79,1	89,7	42,6	69,0	2161,3
150	50	20,4	10,5	11,6	10,3	10,0	13,3
50	50	13,7	10,2	12,4	72,1	13,6	23,6
b_0		24,5	34,42	44,65	43,1	36,02	716,02
b_1		-1,65	-10,22	-6,4	-14,32	-5,28	-376,42
b_2		7,48	24,075	32,65	1,82	24,22	697,58
b_{12}		-5,0	-10,38	-6,0	16,58	-3,48	-371,28
		4,5	2,4	5,1	-0,13	4,6	1,8

Таблица 4. Характеристика процессов снижения удельного сопротивления избыточного активного ила реагентами
 Table 4. Characteristics of the processes of reducing the resistivity of excess activated sludge by reagents

Коагулянт + ПАА	№ плана экспери- мента	№ формулы	Математические модели процессов в неявном виде	Расчетная формула в явном виде
Аква-Аурат-30	1	1	$r=53,7-8,2 \cdot X_1+18,58 \cdot X_2$	$r=43,32-0,0819 \cdot A_k+0,0185 \cdot A_\phi$
	2	2	$r=24,5-1,65 \cdot X_1+7,48 \cdot X_2-5,0 \cdot X_1 \cdot X_2$	$r=-7,16+0,167 \cdot A_k+0,3496 \cdot A_\phi-0,002 \cdot A_k \cdot A_\phi$
Алюминий полиоксисульфат	1	3	$r=53,72-9,52 \cdot X_1+13,18 \cdot X_2-4,9 \cdot X_1 \cdot X_2$	$r=45,16-0,0462 \cdot A_k+0,1808 \cdot A_\phi-0,00049 \cdot A_k \cdot A_\phi$
	2	4	$r=34,45-10,22 \cdot X_1+24,08 \cdot X_2-10,38 \cdot X_1 \cdot X_2$	$r=-34,78+0,2104 \cdot A_k+0,8968 \cdot A_\phi-0,004152 \cdot A_k \cdot A_\phi$
Хлорное железо	1	5	$r=62,62+1,58 \cdot X_1+19,12 \cdot X_2$	$r=41,92+0,0158 \cdot A_k+0,1912 \cdot A_\phi$
	2	6	$r=44,65-6,4 \cdot X_1+32,65 \cdot X_2-6,0 \cdot X_1 \cdot X_2$	$r=-31,85+0,112 \cdot A_k+0,893 \cdot A_\phi-0,00244 \cdot A_k \cdot A_\phi$
ГранПАКС	1	7	$r=51,65-11,15 \cdot X_1+14,35 \cdot X_2-2,95 \cdot X_1 \cdot X_2$	$r=45,5+0,082 \cdot A_k+0,173 \cdot A_\phi-0,000295 \cdot A_k \cdot A_\phi$
	2	8	$r=43,1-14,32 \cdot X_1+1,82 \cdot X_2+16,58 \cdot X_1 \cdot X_2$	$r=134,42-0,9496 \cdot A_k-0,6267 \cdot A_\phi+0,006632 \cdot A_k \cdot A_\phi$
ГранЭКО	1	9	$r=67,75+5,10 \cdot X_1+30,45 \cdot X_2+13,0 \cdot X_1 \cdot X_2$	$r=45,17-0,079 \cdot A_k+0,1748 \cdot A_\phi+0,0013 \cdot A_k \cdot A_\phi$
	2	10	$r=36,02-5,28 \cdot X_1+24,22 \cdot X_2-3,48 \cdot X_1 \cdot X_2$	$r=-15,78+0,0336 \cdot A_k+0,624 \cdot A_\phi-0,001392 \cdot A_k \cdot A_\phi$
Сульфат алюминия	1	11	$r=913,82+672,28 \cdot X_1+835,68 \cdot X_2+682,72 \cdot X_1 \cdot X_2$	$r=88,58-0,1044 \cdot A_k+1,53 \cdot A_\phi+0,06827 \cdot A_k \cdot A_\phi$
	2	12	$r=716,02-376,42 \cdot X_1+697,58 \cdot X_2-371,28 \cdot X_1 \cdot X_2$	$r=-1411,4+7,323 \cdot A_k+28,8 \cdot A_\phi-0,1485 \cdot A_k \cdot A_\phi$

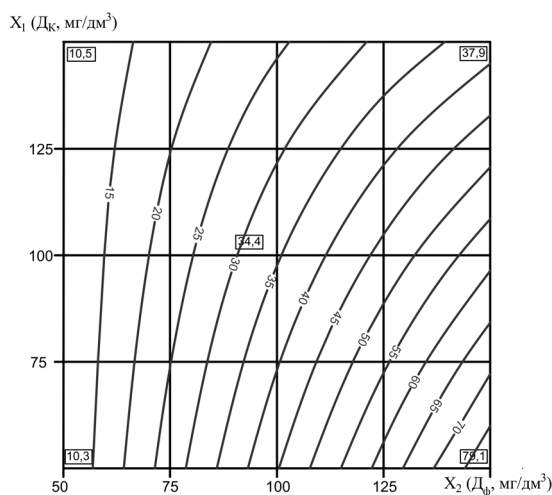


Рис. 2. Зависимость изменения удельного сопротивления исследуемого осадка $r \times 10^{-10}$, см/г, от $D_k = 50-150$ мг/дм³ (алюминий полиоксисульфат) и $D_f = 50-150$ мг/дм³ (ПАА)

Fig. 2. Dependence of the change in the resistivity of the sediment under study $r \times 10^{-10}$, cm/g, from $D_k = 50-150$ mg/dm³ (Aluminum polyoxysulfate) and $D_f = 50-150$ mg/dm³ (PAA)

Представленные графики подтверждают, что процесс максимального снижения удельного сопротивления неуплотненного избыточного активного ила, вероятно, целесообразнее вести коагулянтами: «Аква-Аурат-30», «Алюминий полиоксисульфат», «FeCl₃» и «ГранЭКО» дозой 50 мг/дм³ и флокулянт ПАА дозой 50 мг/дм³.

Параллельно с исследованием технологии реагентного обезвоживания неуплотненного избыточного активного ила фиксировалось и изменение величины pH в исходном ИАИ после обработки его соответствующими реагентами и в фильтрате ИАИ (табл. 5 и 6). Анализ этих данных показывает, что по планам эксперимента № 1 и № 2 значение показателя pH в центре плана (см. величину) уменьшалось в скоагулированном ИАИ и увеличивалось в его фильтрате за исключением случая, когда в качестве коагулянта использовался Аква-Аурат-30. На изменение величины pH большее влияние оказывала доза коагулянта, чем доза флокулянта при использовании Аква-Аурат-30, ГранПАКС, ГранЭКО и Al₂(SO₄)₃ (см. значения коэффициентов b_1 и b_2 по модулю в опытах по плану № 1), а в опытах по плану № 2 – при использовании Al₂(SO₄)₃ флокулянт оказывал большее влияние на pH. При использовании алюминий полиоксисульфата в соотношении с ПАА при дозах от 50 до 150 мг/дм³ оказывали равномерное влияние на pH, при дозах больше 150 мг/дм³ влияние флокулянта pH становилось больше. Было уста-

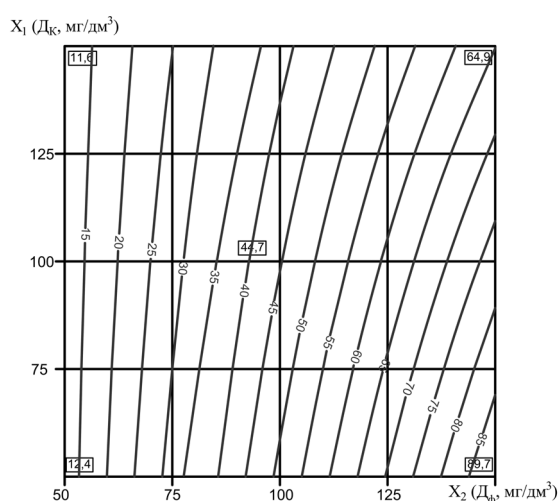


Рис. 3. Зависимости изменения удельного сопротивления исследуемого осадка $r \times 10^{-10}$, см/г, от $D_k = 50-150$ мг/дм³ (FeCl₃) и $D_f = 50-150$ мг/дм³ (ПАА)

Fig. 3. Dependence of the change in the resistivity of the sediment under study $r \times 10^{-10}$, cm/g, from $D_k = 50-150$ mg/dm³ (FeCl₃) and $D_f = 50-150$ mg/dm³ (PAA)

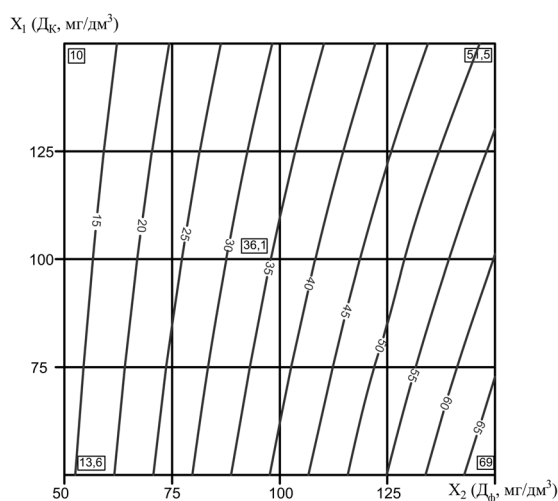


Рис. 4. Зависимости изменения удельного сопротивления исследуемого осадка $r \times 10^{-10}$, см/г, от $D_k = 50-150$ мг/дм³ (ГранЭКО) и $D_f = 50-150$ мг/дм³ (ПАА)

Fig. 4. Dependence of the change in the resistivity of the sediment under study $r \times 10^{-10}$, cm/g, from $D_k = 50-150$ mg/dm³ (GranECO) and $D_f = 50-150$ mg/dm³ (PAA)

новлено, что в исследованном диапазоне для практической технологии реагентного обезвоживания ИАИ доза вводимых реагентов не оказывает существенного влияния на величину pH.

Таблица 5. Влияние дозы реагентов на величину рН
в неуплотненном ИАИ, обработанном реагентами ИАИ и в фильтрате
Table 5. The effect of the reagent dose on the pH value
in uncompacted EAS treated with EAS reagents and in the filtrate

Дозы реагентов, мг/дм ³		Значения рН в исходном ИАИ после обработки ИАИ реагентами и в фильтрате ИАИ для сред, обработанных								
		Аква-Аурат-30 + ПАА			Алюминий полиоксисульфат + ПАА			Хлорное железо + ПАА		
Д _к	Д _ф	ИАИ	скоагули- рованный ИАИ	фильтрат ИАИ	ИАИ	скоагули- рованный ИАИ	фильтрат ИАИ	ИАИ	скоагули- рованный ИАИ	фильтрат ИАИ
По плану эксперимента № 1										
200	200	6,98	7,06	6,91	6,10	6,15	6,20	6,34	6,00	5,97
0	200	7,03	7,00	6,98	6,10	6,20	6,30	6,00	6,10	6,20
200	0	6,96	6,97	6,98	6,54	6,30	6,14	5,9	5,88	5,86
0	0	7,27	7,18	7,10	7,00	7,00	7,05	6,98	7,00	7,00
b ₀		7,06	7,05	6,99	6,43	6,41	6,42	6,30	6,245	6,26
b ₁		-0,09	-0,04	-0,05	-0,12	-0,19	-0,25	-0,18	-0,30	-0,34
b ₂		-0,06	-0,02	-0,05	-0,34	-0,24	-0,17	-0,14	-0,19	-0,17
b ₁₂		0,06	0,07	0,01	0,12	0,16	0,20	0,36	0,26	0,23
По плану эксперимента № 3										
150	150	7,10	7,07	6,95	6,16	6,27	6,37	5,93	5,85	5,95
50	150	6,89	6,92	6,95	6,25	6,31	6,36	5,88	5,72	6,00
150	50	6,90	7,00	6,97	6,25	6,30	6,34	6,00	5,95	5,94
50	50	6,86	6,91	6,92	6,70	6,50	6,70	5,75	5,76	5,94
b ₀		6,94	6,975	6,9475	6,34	6,34	6,44	5,89	5,82	5,96
b ₁		0,06	0,06	0,01	-0,14	-0,06	-0,09	0,08	0,08	-0,01
b ₂		0,06	0,02	0,00	-0,14	-0,06	-0,08	0,02	-0,04	0,02
b ₁₂		0,04	0,015	-0,01	0,09	0,04	0,09	-0,05	-0,02	-0,01

Таблица 6. Влияние дозы реагентов на величину рН
в неуплотненном ИАИ, обработанном реагентами ИАИ и в фильтрате
Table 6. The effect of the reagent dose on the pH value
in uncompacted EAS treated with EAS reagents and in the filtrate

Дозы реагентов, мг/дм ³		Значения рН в исходном ИАИ после обработки ИАИ реагентами и в фильтрате ИАИ для сред, обработанных								
		ГранПАКС + ПАА			ГранЭКО + ПАА			Сульфат алюминий + ПАА		
Δ _к	Δ _ф	ИАИ	скоагули- рованный ИАИ	фильтрат ИАИ	ИАИ	скоагули- рованный ИАИ	фильтрат ИАИ	ИАИ	скоагули- рованный ИАИ	фильтрат ИАИ
По плану эксперимента № 1										
200	200	6,17	6,15	6,21	6,00	6,07	6,14	6,93	6,80	7,00
0	200	6,2	6,15	6,20	6,30	6,00	6,20	6,83	7,00	7,18
200	0	6,17	6,34	6,27	5,95	5,96	6,08	6,96	6,85	7,23
0	0	6,18	6,20	6,29	6,10	6,10	6,15	6,90	6,88	7,27
b ₀		6,18	6,21	6,24	6,08	6,03	6,14	6,90	6,88	7,17
b ₁		-0,01	1,00	-0,00	-0,11	-0,018	-0,03	0,04	-0,06	-0,06
b ₂		0,01	-0,06	-0,04	0,06	0,00	0,03	-0,02	0,02	-0,08
b ₁₂		-0,01	-0,04	0,00	-0,04	0,05	0,00	0,01	-0,04	-0,035
По плану эксперимента № 3										
150	150	6,14	6,21	6,24	6,1	6,23	6,27	6,5	6,55	6,6
50	150	6,26	6,46	6,37	6,0	6,07	6,22	6,45	6,55	6,65
150	50	6,22	6,26	6,28	6,1	6,14	6,2	6,5	6,5	6,5
50	50	6,14	6,24	6,27	6,1	6,17	6,24	6,4	6,45	6,5
b ₀		6,19	6,29	6,29	6,07	6,15	6,23	6,46	6,51	6,56
b ₁		-0,01	-0,06	-0,03	0,02	0,03	0,00	0,04	0,01	-0,01
b ₂		0,01	0,04	0,02	-0,02	-0,00	0,01	0,01	0,04	0,06
b ₁₂		-0,05	-0,07	-0,04	0,02	0,05	0,02	-0,01	-0,01	-0,01

Выводы

1. Изучено изменение удельного сопротивления избыточного неуплотненного активного ила от доз коагулянта (D_k) и флокулянта (D_f). Получены математические модели процесса обезвоживания ИАИ в виде уравнения $r = f(D_k, D_f)$ в неявном виде или в виде изолиний в явном виде.

2. Было установлено, что обработка исследуемого осадка полиакриламидом дозой больше 50 мг/дм³ оказывает негативное влияние на степень обезвоживания ИАИ. Степень влияния ПАА на удельное сопротивление ИАИ было больше, чем влияние коагулянтов, в 1,2 – 12,1 раза, кроме варианта использования коагулянта ГранПАКС.

3. Минимальное значение удельного сопротивления неуплотненного ИАИ $(10,2–13,7) \times 10^{-10}$ см/г имело место при его обработке реагентами дозой 50 мг/дм³ флокулянт ПАА и коагулянтами «Аква-Аурат-30», «Алюминий полиоксисульфат», «FeCl₃» и «ГранЭКО». В зоне доз реагентов от 50 до 150 мг/дм³ (план № 2) более перспективным оказалось применение в качестве коагулянтов: «Алюминий полиоксисульфат» и FeCl₃ с $r \approx (10,2–12,4) \times 10^{-10}$ см/г.

4. Установлено, что величина pH в ИАИ могла изменяться в пределах 5,9 – 7,27, после добавления реагентов происходило подкисление ИАИ до значения pH 5,88 – 7,18, а в фильтрате – до 5,86 – 7,10. Показано, что в исследованном диапазоне для практической технологии реагентного обезвоживания ИАИ доза вводимых реагентов не оказывает существенного влияния на величину pH.

5. Процесс максимального снижения удельного сопротивления неуплотненного избыточного активного ила целесообразнее вести коагулянтами: «Алюминий полиоксисульфат» и FeCl₃ дозой до 50 мг/дм³ совместно с флокулянт ПАА дозой 50 мг/дм³.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. РАН. Сибирские ученые нашли способ полезной утилизации осадков сточных вод [Электронный ресурс]. URL: https://www.ras.ru/digest/showdnews.aspx?_language=ru&id=3d297d0f-94e8-43bc-aae6-b825db336c9d (дата обращения: 06.06.2024).
2. Vambol V., Kowalczyk-Juško A., Józwiakowski K., Mazur A., Vambol S., Khan N. A. Investigation in Techniques for Using Sewage Sludge as an Energy Feedstock: Poland's Experience // *Ecological Questions*. 2023. N34(1). P. 2–12. DOI: 10.12775/EQ.2023.007.
3. Kominko H, Gorazda K, Wzorek Z. Effect of sewage sludge-based fertilizers on biomass growth and heavy metal accumulation in plants // *Environ Manage*. 2022; 305. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.114417.
4. Кравцова М., Чариков Ю., Волков Д., Мельникова Д., Пустовитова Т., Кравцов М. Исследование осадка сточных вод для получения органоминерального удобрения // *Экология и промышленность России*. 2023. №27(4). С. 17–21. DOI: 10.18412/1816-0395-2023-4-17-21.
5. Чулкова И.Л., Смирнова О.Е., Красова А.В. Использование осадков сточных вод в бетонной промышленности // *Российский журнал автомобильной и шоссейной промышленности*. 2021. № 18(5). С. 566–575. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-566-575>.
6. Кичигин В.И., Палагин Е.Д. Обработка и утилизация осадков природных и сточных вод / СГАСУ. Самара, 2008. 204 с.
7. Рублевская О.Н., Краснопеев А.Л. Опыт внедрения современных технологий методов обработки осадка сточных вод // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2011. № 4. С. 65–69.
8. Намяк Д.Е., Зубко А.Л., Штонда Ю.И. Обезвоживание осадков на канализационных очистных сооружениях г. Симеиза // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2008. № 12. С. 40–43.
9. 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.
10. Кичигин В.И., Юдин А.А. Экспериментально-статистические модели влагоотдачи обработанного реагентами уплотненного избыточного активного ила // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2023. № 11. С. 55–60. DOI: 10.35776/VST.2023.11.08.
11. Бондарь А.Г., Статюха Г.А. Планирование эксперимента в химической технологии (основные положения, примеры и задачи). Киев: Вища школа, 1976. 183 с.
12. Саутин С.А. Планирование эксперимента в химии и химической технологии. Л.: Химия, 1975. 48 с.
13. Кичигин В.И. Моделирование процессов очистки воды: М.: Изд-во АСВ, 2003. 203 с.

REFERENCES

1. RAS. Siberian scientists have found a way to usefully dispose of sewage sludge. Available at: https://www.ras.ru/digest/showdnews.aspx?_language=ru&id=3d297d0f-94e8-43bc-aae6-b825db336c9d (accessed 06 June 2024).
2. Vambol V., Kowalczyk-Juško A., Józwiakowski K., Mazur A., Vambol S., Khan N. A. Investigation in Techniques for Using Sewage Sludge as an Energy Feedstock: Poland's Experience. *Ecological Questions*. 2023. N34(1). P. 2–12. DOI: 10.12775/EQ.2023.007
3. Kominko H, Gorazda K, Wzorek Z. Effect of sewage sludge-based fertilizers on biomass growth and heavy metal accumulation in plants. *Environ Manage*. 2022. N. 305. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.114417
4. Kravtsova M., Charikov Yu., Volkov D., Melnikova D., Pustovitova T., Kravtsov M. Study of

sewage sludge for obtaining organomineral fertilizer. *Jekologija i promyshlennost' Rossii* [Ecology and industry of Russia], 2023, №27(4), pp. 17–21. (in Russian) DOI: 10.18412/1816-0395-2023-4-17-21

5. Chulkova I.L., Smirnova O.E., Krasova A.V. Use of sewage sludge in the concrete industry. *Rossiiskij zhurnal avtomobil'noj i shossejnoj promyshlennosti* [Russian Journal of Automobile and Road Industry], 2021, no. 18(5), pp. 566–575. (in Russian) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-566-575>

6. Kichigin V.I., Palagin E.D. *Obrabotka i utilizacija osadkov prirodnyh i stochnyh vod* [Natural and wastewater sludge treatment and disposal]. Samara, SGASU, 2008. 204 p.

7. Rublevskaya O.N., Krasnopeev A.L. Experience in implementation of modern technologies and methods of sewage sludge treatment. *Vodosnabzhenie i sanitarnaja tehnika* [Water supply and sanitary equipment], 2011, no. 4, pp. 65–69. (in Russian)

8. Namyak D.E., Zubko A.L., Shtonda Yu.I. Dewatering of sediments at the sewage treatment plant in Simeiz. *Vodosnabzhenie i sanitarnaja tehnika* [Water supply and sanitary equipment], 2008, no. 12, pp. 40–43. (in Russian)

9. Kichigin V.I., Yudin A.A. Study of dependence of sediment resistivity on its humidity and initial concentration of bentonite turbidity. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban planning and architecture], 2023, vol. 13, no. 2, pp. 22–30. (in Russian) DOI: [10.17673/Vestnik.2023.02.04](https://doi.org/10.17673/Vestnik.2023.02.04)

10. Kichigin V.I., Yudin A.A. Experimental and statistical models of moisture recovery of compacted excess activated sludge treated with reagents. *Vodosnabzhenie i sanitarnaja tehnika* [Water supply and sanitary equipment], 2023, no. 11, pp. 55–60. (in Russian) DOI: [10.35776/VST.2023.11.08](https://doi.org/10.35776/VST.2023.11.08)

11. Bondar A.G., Statiukha G.A. *Planirovanie jeksperimenta v himicheskoj tehnologii (osnovnye polozenija, primery i zadachi)* [Planning of experiment in chemical technology (basic provisions, examples and tasks)]. Kiev, Vischa School, 1976. 183 p.

12. Sautin S.A. *Planirovanie jeksperimenta v himii i himicheskoj tehnologii* [Planning an experiment in chemistry and chemical technology]. Leningrad, Chemistry, 1975. 48 p.

13. Kichigin V.I. *Modelirovanie processov ochistki vody* [Modeling of water treatment processes]. Moscow, DIA Publishing House, 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 Iv.

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

ЮДИН Александр Александрович

инженер кафедры водоснабжения
и водоотведения
Самарский государственный технический университет
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244,
тел.: (846) 339-14-11
E-mail: alex.udin1996@mail.ru

YUDIN Alexander Al.

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

Для цитирования: Кичигин В.И., Юдин А.А. Исследование технологии реагентного обезвреживания избыточного активного ила из вторичного отстойника при помощи экспериментально-статистических моделей // Градостроительство и архитектура. 2024. Т. 14, № 4. С. 60–68. DOI: [10.17673/Vestnik.2024.04.09](https://doi.org/10.17673/Vestnik.2024.04.09).

For citation: Kichigin V.I., Yudin A.A. Investigation of the technology of reagent decontamination of excess activated sludge from a secondary dump using experimental statistical models. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2024, vol. 14, no. 4, pp. 60–68. (in Russian) DOI: [10.17673/Vestnik.2024.04.09](https://doi.org/10.17673/Vestnik.2024.04.09).