

# АНАЛИЗ ВЗАИМОСВЯЗИ ЦВЕТНОСТИ ВОДЫ С ДОЗОЙ КОАГУЛЯНТА В ВОДОИСТОЧНИКЕ И ВОЗМОЖНОСТЬ ЕЁ УЧЕТА ПРИ МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ

<sup>1</sup>А.В. Ялалетдинова, <sup>2</sup>П.В. Серебряков, <sup>2</sup>М.Ю. Вождаева, <sup>3</sup>Е.А. Мазлова, <sup>4</sup>И.Г. Шайхиев, <sup>1</sup>Е.А. Кантор

<sup>1</sup>Уфимский государственный нефтяной технический университет,

<sup>2</sup>ГУП РБ "Уфаводоканал",

<sup>3</sup>Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, г. Москва,

<sup>4</sup>Казанский национальный исследовательский технологический университет

Проанализирован характер изменения цветности воды в водоисточнике, который является основным при организации водоснабжения крупной городской агломерации. Показано, что корреляционный анализ характеризует связь между дозой коагулянта и цветностью воды как заметную (по шкале Чеддока), что предопределяет необходимость учета цветности воды как параметра, влияющего на выбор дозы коагулянта. Построены вариационные ряды, получены эмпирические и теоретические функции распределения цветности воды по месяцам. Достигнута возможность моделирования дозы реагентов по изменению цветности с учетом конкретных условий практически постоянного влияния сезонных и случайных факторов в выделенных периодах. Сделан вывод о том, что показатель цветности вносит значимый вклад в величину прогнозируемого значения дозы коагулянта.

*Ключевые слова:* цветность, доза реагента, шкала Чеддока, математическое моделирование

Статья поступила в редакцию 24.06.2024, доработана 12.08.2024, принята к публикации 30.09.2024

## Analysis of the Interrelationship between Water Color and Coagulant Dose and the Possibility of Taking it into Account in Mathematical Modeling

<sup>1</sup>A.V. Yalaletdinova, <sup>2</sup>P.V. Serebryakov, <sup>2</sup>M.Yu. Vozhdaeva, <sup>3</sup>E.A. Mazlova, <sup>4</sup>I.G. Shaikhiev, <sup>1</sup>E.A. Kantor

<sup>1</sup>Ufa State Petroleum Technological University, 450062 Ufa, Russia,

<sup>2</sup>SUE RB "Ufavodokanal", 450098 Ufa, Russia,

<sup>3</sup>Gubkin Russian State University of Oil and Gas (NRU), 119991, Moscow, Russia,

<sup>4</sup>Kazan National Research Technological University, 420015 Kazan, Russia

The character of water chromaticity change in a water source, which is the main one for organizing water supply of a large urban agglomeration, is analyzed. It is shown that the correlation analysis characterizes the interrelationship between the coagulant dose and water chromaticity as noticeable (on the Cheddock scale), which predetermines the necessity to take into account water chromaticity as a parameter influencing the choice of coagulant dose. Variation series were constructed, empirical and theoretical functions of water chromaticity distribution by months were obtained. The possibility of modeling the reagent dose on the change of chromaticity taking into account specific conditions of practically constant influence of seasonal and random factors in the selected periods has been achieved. It is concluded that the chromaticity index makes a significant contribution to the value of the predicted value of coagulant dose.

*Keywords:* chromaticity, reagent dose, Cheddock scale, mathematical modeling

Received 24.06.2024, revised 12.08.2024, accepted for publication 30.09.2024

DOI: 10.18412/1816-0395-2024-11-15-21

В настоящее время проблема обеспечения качества питьевой воды усугубляется усиливающейся урбанизацией [1]. Формирование многокомпонентных развивающихся систем — городских агломераций — приводит к по-

явлению новых объектов, связанных с жизнедеятельностью населения и усилению антропогенной нагрузки на зоны водосбора [2]. Из-за увеличения числа источников загрязнений (промышленных предприятий, развивающейся транспортной

инфраструктуры, строительства, объектов формирования бытовых отходов и др.) возрастает антропогенная нагрузка, нарушается экологическое равновесие, снижается способность окружающей среды к самоочищению [3]. Начинают

проявляться не фиксируемые ранее загрязнители, дополняющие компонентный состав имеющихся природных загрязнителей [4]. Обобщенные и органолептические показатели качества воды, такие как мутность, цветность, окисляемость и др., характеризуют интегральную загрязненность воды, т.е. содержание в ней различных примесей, соотношения которых изменяются в зависимости от условий [5]. Влияние городских агломераций, возможно, становится настолько существенным, что изменяет основу обобщенных показателей по сравнению с природными водоемами [4]. Например, цветность воды в природных условиях характеризует наличие в воде окрашенных веществ органического происхождения, соединений трехвалентного железа и других металлов [6], которые либо входят в состав, либо сорбируются на органических кластерах в виде солей, малорастворимых кислот, оснований, гидратированных и прочих ассоциатов [7]. С другой стороны, под действием городских агломераций цветность определяется присутствующими в воде техногенными органическими (и неорганическими) веществами: полиароматическими, хлорированными полиароматическими углеводородами, в том числе суперэкоксикантами (бенз(а)пирен и диоксины), включая их комплексы [8]. Поэтому проявление влияния городских агломераций может сказываться на величине и изменении характера цветности воды в виде загрязнителей, которые поддаются коагуляции. Таким образом, при организации технологии водоподготовки промышленных и нагруженных сельских территорий появляется необходимость учета качества природных вод не только по мутности, но и по другим обобщенным показателям, в частности по цветности [9]. В подавляющем большинстве случаев основой для сопоставления исходного качества

воды и дозы коагулянта служат данные по мутности воды, а также по окисляемости, температуре и щелочности [10], поскольку они участвуют в процессе хлопьеобразования. Цветность как фактор, оказывающий заметное влияние на процесс коагуляции, не рассматривается [2], тем не менее известно, что цветность воды может снижаться в результате коагуляции [7].

В последнее время в практике водоснабжающих организаций для осуществления необходимого контроля качества воды все большее значение приобретают методы математического моделирования, которые позволяют корректировать дозу коагулянта по значениям исходных показателей качества воды [11]. Среди них можно выделить метод анализа временных рядов [7], обработку статистических данных и др. [12].

Нами на основе статистических данных цветности воды поверхностного водозабора крупной городской агломерации, предпринята попытка анализа связи "доза коагулянта — цветность воды" и использования цветности воды как параметра при математическом моделировании величины дозы коагулянта.

#### *Характеристика объектов исследования и методология проведения анализа*

В качестве исходных данных использованы результаты ежедневных измерений цветности (Ц) воды водоисточника (створ ПВ) и дозы коагулянта Д ( $Al_2(SO_4)_3$ ), используемой на очистных сооружениях поверхностного водозабора, расположенного на территории городской агломерации (ГА), за 22-летний период. Также приобщены данные по цветности воды в створах выше и ниже ГА за тот же период.

Для оценки вероятности превышения норматива по цветности проведена статистическая обработка. Выполнено разбиение исходных значений

цветности (объем выборки  $n$ ) на интервалы одинаковой длины и установлены границы каждого интервала ( $x_{\min i}$ ,  $x_{\max i}$ ), определены частоты  $n_i$  и относительные частоты  $w_i = n_i/n$  попадания значений в каждый интервал. Найдена эмпирическая функция распределения  $F_n(x)$ , являющаяся эмпирической вероятностью того, что значение случайной величины  $X$  не превысит значение аргумента  $x$ . Определена теоретическая функция распределения  $F'(x)$ . Для этого ряда накопленных относительных частот цветности  $F_n(x)$  аппроксимированы функцией плотности гамма-распределения с параметрами  $a$  и  $b$  [13]. Значения параметров гамма-распределения вычислены по значениям выборочной средней и выборочной дисперсии эмпирического распределения  $F_n(x)$  при помощи встроенных функций "СРЗНАЧ" и "ДИСП" в процессоре MS Excel.

Проверка соответствия эмпирического и теоретического распределений проведена по критерию согласия Колмогорова [14]. Вычислена мера расхождения между теоретическим и эмпирическим распределением  $D = \max |F_n(x) - F'(x)|$  и определена величина  $\lambda_\alpha = D\sqrt{n}$ . При  $\lambda \leq \lambda_\alpha$  (для выбранного уровня значимости  $\alpha = 0,05$  табличное значение  $\lambda_\alpha = 1,36$ ) теоретическая функция распределения достаточно точно описывает кривую эмпирического распределения.

При моделировании определяется значимость факторов, включаемых в модельное уравнение, при этом факторы, существенно не влияющие на выходную (зависимую) переменную, выводятся из уравнения, либо же происходит дополнение уравнения новыми факторами. Поэтому с помощью регрессионного анализа можно не только вычислить коэффициенты уравнения регрессии, но и рассчитать значимости входных переменных [13].

Коэффициенты уравнения множественной линейной ре-

грессии, а также значения  $t$ -статистики для оценки значимости коэффициентов уравнения,  $F$ -критерий Фишера для проверки надежности уравнения и коэффициент корреляции  $R$ , служащий количественной оценкой связи между фактором и его влиянием на результат, определены в процессоре MS Excel при помощи встроенного инструмента "Регрессия" пакета анализа в блоке инструментов "Анализ". Все расчеты проведены для уровня значимости  $p = 0,1$ .

Степень линейной связи между переменными оценена с помощью коэффициента корреляции Пирсона [13]. Качественная оценка коэффициента корреляции проведена по шкале Чеддока [14], которая позволяет определить тесноту связи в зависимости от значения коэффициента корреляции.

### Результаты и их обсуждение

В последнее время, по всей вероятности, происходит перераспределение в количественной значимости факторов, которые устанавливаются величины обобщенных и органолептических показателей качества воды. В этой связи появляется необходимость переоценки причин, определяющих величину и источники формирования этих показателей. Нами проведены исследования по анализу цветности воды водисточника как параметра, который может учитываться при количественном определении дозы коагулянта.

Одним из свидетельств в пользу влияния городской агломерации (ГА) на показатели качества воды, в том числе цветности, может служить результат определения вкладов компонент временного ряда цветности в створах водозаборов (аддитивная модель со среднегодовым методом сглаживания [13]). Так, обработка временного ряда цветности (22-летний период наблюдений) показывает, что случай-

ная составляющая возрастает более, чем на 10 % (с 30,3 до 40,8 %) при переходе от створа, расположенного до ГА, к створу, расположенному после ГА. Вклад сезонной компоненты снижается с 65,9 % (в створе выше ГА) до 48,2 % (в створе ниже ГА), а вклад тренд-циклической компоненты возрастает более чем в 2,5 раза (с 3,8 до 11,0 % соответственно).

Заметный вклад в изменения цветности вносит сезонная величина. Нами проведена свертка рядов данных по детерминированным компонентам, которые не учитывают вклад случайной величины, и построена модель, описывающая закономерные изменения цветности в воде створов в годичном цикле (рис. 1).

В модельном году выделены четыре фазы (I–IV) с характерными закономерностями изменения цветности воды в годичном цикле. Для I фазы (паводок) отмечается практически линейный рост значений показателя, II фаза характеризуется снижением цветности воды, в III фазу происходит незначительное повышение цветности воды, а IV фаза — снижение значений показателя до минимума.

Несмотря на то, что фазам присущи схожие особенности изменения показателя, для створов отмечаются расхождения во временных рамках. Например, II фаза в створе 1 и створе 2 длится с мая по октябрь, а в створе 3 — с мая по сентябрь. Возможно, причина-

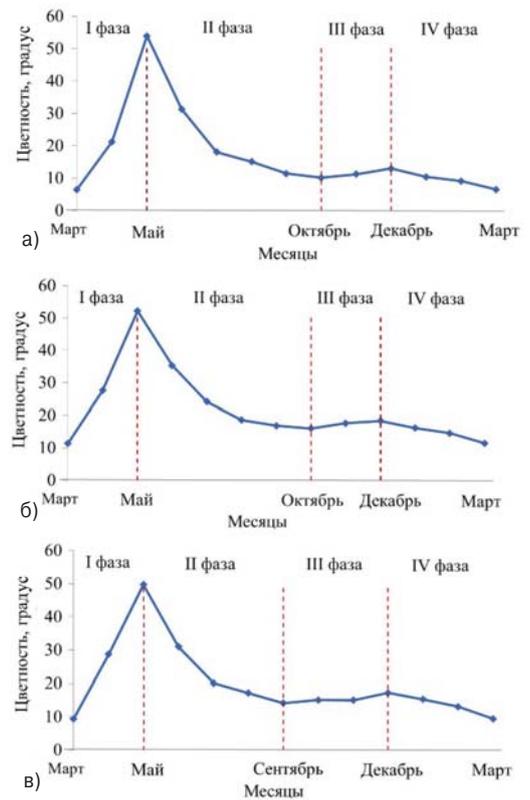


Рис. 1. Зависимость цветности от времени года по створам:

а – створ выше ГА; б – створ ПВ; в – створ ниже ГА

Fig. 1. Dependence of chromaticity on the time of the year by control stations:

a – control station above the urban agglomeration; b – surface water control station; c – control station below the urban agglomeration

ми этому служат различия в расположении водозаборов относительно городской агломерации и оказываемом ею влиянии на них. Следует отметить, что створы находятся на значительном расстоянии друг от друга и подвергаются воздействию различных антропогенных факторов, оказываемых разными по характеру частями ГА: на створ выше ГА воздействие со стороны ГА отсутству-

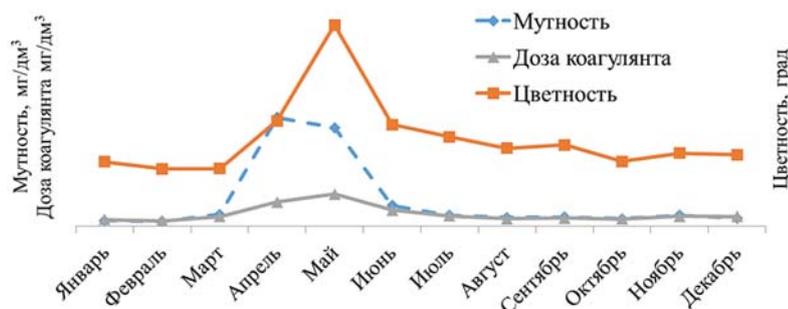
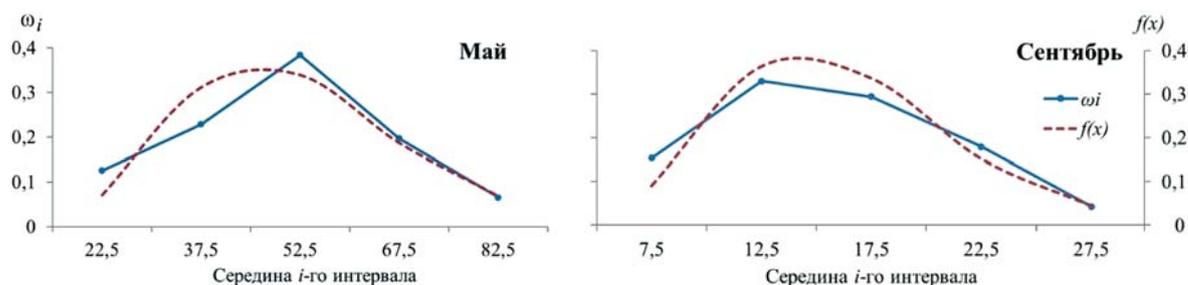


Рис. 2. Зависимость мутности, цветности воды и дозы коагулянта в створе ПВ от времени года (среднегодовые значения за 22-летний период)

Fig. 2. Dependence of turbidity, water chromaticity and coagulant dosage in the surface water control station on the time of the year (average annual values for 22 years)



**Рис. 3. Полигон относительных частот цветности  $\omega_i$  и кривая функции плотности гамма-распределения  $f(x)$**   
**Fig. 3. Polygon of relative frequencies of chromaticity  $\omega_i$  and curve of gamma distribution density function  $f(x)$**

ет, на створ ПВ оказывает воздействие промзона, на створ ниже ГА — помимо промышленной действует и селитебная зона. Таким образом, цветность воды может изменяться под влиянием как природных факторов, так и городской агломерации [6].

Результаты свертки временных рядов данных за 22-летний период по мутности, цветности и дозе коагулянта предполагают возможность наличия связи как между параметрами качества воды — мутностью и цветностью, так и между этими параметрами и величиной дозы коагулянта. Так, например, с марта по май доза коагулянта, как и цветность воды, возрастает. Однако мутность воды в апреле начинает снижаться, в то время как изменение цветности и дозы коагулянта происходит симбатно (рис. 2).

Ранее было показано, что на величину цветности влияет часть органического вещества, которое оказывает воздействие и на величину взвеси, опреде-

ляющей мутность воды [15]. Близкими являются коэффициенты парной корреляции между дозой коагулянта и параметрами качества воды водисточника: между мутностью и цветностью коэффициент корреляции составляет 0,54, что соответствует заметной связи [14]; между дозой коагулянта и мутностью — 0,77 (высокая связь [14]); между дозой коагулянта и цветностью — 0,65 (заметная связь [14]). Полученное значение коэффициента корреляции между дозой коагулянта и цветностью воды можно рассматривать как свидетельство того, что цветность содержит вещества, поддающиеся коагуляции.

Среднегодовые значения цветности изменяются в широком интервале значений от 4,7 до 82,1 градусов. В паводок цветность воды в отдельные годы достигает 113 градусов, в другие периоды не превышает нормативов. Поэтому представляется обоснованным провести математическое модели-

рование доз коагулянта по цветности по различным периодам года, характеризующимся разной величиной цветности [11]. Выделение временных периодов, в которых качество исходной воды по цветности отличается, проведено с учетом вероятностей превышения исследуемым показателем его норматива, вычисленных по гамма-распределениям: чем ближе значения теоретических функций распределения к нулю, тем выше вероятность превышения показателем норматива, и наоборот, когда значения функций стремятся к единице, снижается вероятность превышения норматива по цветности.

Следует отметить, что исходная выборка по цветности воды в реке (6574 значения) включает в себя ежедневные наблюдения. Общая тенденция изменения показателя в годовом цикле сохраняется — значения цветности колеблются в пределах некоторого интервала, а максимума достигают во время паводков (см. рис. 1). Однако определение вероятностей больших или меньших значений цветности для всего (годового) периода неинформативно, поскольку не даст возможности оценить, в какие именно месяцы года будет превышен или не превышен норматив, вследствие чего нами исследованы распределения цветности для каждого месяца. В качестве примера приведены результаты исследования для мая (значения показателя достигают максимума из-за паводка) и сентября (цветность не превышает норматива). Для каждой выборки

**Таблица 1. Характеристики эмпирического и гамма-распределений цветности воды**

**Table 1. Characteristics of the empirical and gamma distributions of water chromaticity**

Месяц	Интервал	Границы интервалов		Частоты $n_i$	Эмпирическая функция $F_i(s_2)$	Плотность гамма-распределения $f(s^*)$	Функция гамма-распределения $F'(s_2)$
		$S_{нижн}$	$S_{верхн}$				
Май	1	15,0	30,0	67	0,125	0,005	0,083
	2	30,0	45,0	122	0,354	0,021	0,382
	3	45,0	60,0	205	0,738	0,023	0,713
	4	60,0	75,0	105	0,934	0,012	0,902
	5	75,0	90,0	35	1,000	0,005	0,973
Сентябрь	1	5,0	10,0	82	0,154	0,018	0,105
	2	10,0	15,0	176	0,483	0,073	0,452
	3	15,0	20,0	157	0,777	0,067	0,783
	4	20,0	25,0	96	0,957	0,030	0,939
	5	25,0	30,0	23	1,000	0,009	0,987

(534 значения) определены границы интервалов, вычислены относительные частоты  $w_i$  (рис. 3) и значения эмпирической функции распределения  $F_n(x)$  (табл. 1).

Предположено, с учетом формы изменения полигона относительных частот цветности  $\omega_i$  (см. рис. 3), что эмпирическое распределение цветности воды может быть описано гамма-распределением. Действительно, для всех месяцев вычисленные параметры гамма-распределений  $a$  и  $b$  проверены при помощи критерия согласия Колмогорова [14] и подтверждена гипотеза о гамма-распределении цветности воды ( $\lambda \leq \lambda_{\alpha}$ ) (табл. 1, табл. 2).

Полученные функции распределения цветности воды позволяют провести вероятностную оценку наступления того или иного события, например превышения нормативов по цветности с помощью гамма-распределения (табл. 3).

Поскольку вероятности превышения цветностью норматива в каждый месяц различны, оценка связи между дозой коагулянта и цветностью приведена с учетом их значений. Дифференцирование года на периоды заключалось в группировке месяцев по значениям вероятностей, которые позволяют сформировать пять групп, характеризующихся достаточным количеством наблюдений и сравнительно небольшим изменением диапазонов вероятностей. Для каждого из выделенных временных периодов составлены новые ряды данных, полученные группировкой значений показателей, соответствующих конкретному временному периоду водоемного периода (табл. 4).

Проведен поиск связи между дозами реагентов и цветностью воды водоемного периода для каждого временного периода, найдены уравнения регрессии, устанавливающие связь "доза коагулянта — цветность" (табл. 5).

**Таблица 2. Результаты проверки гипотезы о гамма-распределении цветности воды по критерию Колмогорова  $\lambda$  ( $\lambda_{0,05} = 1,36$ )**

**Table 2. Results of testing the hypothesis about gamma-distribution of water chromaticity by Kolmogorov's criterion  $\lambda$  ( $\lambda_{0,05} = 1.36$ )**

Месяц	Параметры распределения		D	$\lambda$	Месяц	Параметры распределения		D	$\lambda$
	a	b				a	b		
Январь	2,246	0,149	0,016	0,38	Июль	7,189	0,310	0,029	0,64
Февраль	3,006	0,213	0,058	1,30	Август	8,066	0,455	0,029	0,68
Март	4,375	0,389	0,056	1,30	Сентябрь	9,444	0,584	0,049	1,13
Апрель	2,129	0,080	0,036	0,84	Октябрь	5,186	0,327	0,050	1,14
Май	9,017	0,174	0,043	0,99	Ноябрь	3,651	0,238	0,036	0,81
Июнь	7,782	0,231	0,026	0,59	Декабрь	2,824	0,158	0,015	0,35

**Примечание.** D – мера расхождения между теоретическим и эмпирическим распределениями.

**Таблица 3. Вероятность превышения нормативов по цветности воды в реке\***

**Table 3. Probability of exceeding normative standards for water chromaticity in the river\***

Месяц	Интервал значений цветности, градус		Месяц	Интервал значений цветности, градус	
	До 20	От 20 до 40		До 20	От 20 до 40
Январь	0,747	0,227	Июль	0,398	0,560
Февраль	0,798	0,193	Август	0,679	0,318
Март	0,931	0,069	Сентябрь	0,783	0,217
Апрель	0,433	0,370	Октябрь	0,757	0,239
Май	0,009	0,255	Ноябрь	0,758	0,232
Июнь	0,112	0,617	Декабрь	0,653	0,307

\*Норматив цветности воды составляет 20 градусов.

**Таблица 4. Временные периоды, выделенные по значениям вероятностей превышения норматива по цветности воды**

**Table 4. Time periods selected by the values of probability of exceeding the normative standards for water chromaticity**

Период	Месяц	Характеристика по вероятности превышения норматива	Диапазон вероятностей	Число наблюдений n
1	Май, июнь	Большая вероятность	0–0,11	1305
2	Апрель, июль	Вероятность превышает 50 %	0,40–0,43	1292
3	Август, декабрь	Вероятность не превышает 50 %	0,65–0,68	1343
4	Январь, сентябрь, октябрь, ноябрь	Средняя вероятность	0,75–0,78	2555
5	Февраль, март	Большая вероятность не превышения	0,80–0,93	1202

**Таблица 5. Параметры уравнений зависимости доз коагулянта ( $Al_2(SO_4)_3$ ) от цветности в различные временные периоды\***

**Table 5. Parameters of equations of dependence of coagulant ( $Al_2(SO_4)_3$ ) doses on chromaticity in different time periods\***

Период	Уравнение	Параметры значимости уравнения**				
		R	R <sup>2</sup>	F	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>
1	D ( $Al_2(SO_4)_3$ ) = 3,47 + 0,06·Ц	0,46	0,21	355	23,33	18,85
2	D ( $Al_2(SO_4)_3$ ) = 1,41 + 0,12·Ц	0,56	0,31	592	10,7	24,34
3	D ( $Al_2(SO_4)_3$ ) = 0,80 + 0,07·Ц	0,51	0,26	481	12,04	21,94
4	D ( $Al_2(SO_4)_3$ ) = 0,84 + 0,06·Ц	0,51	0,26	896	21,5	29,93
5	D ( $Al_2(SO_4)_3$ ) = 1,83 – 0,03·Ц	-0,27	0,07	94	43,7	-9,72

\*См. табл. 4.

\*\*R – коэффициент корреляции; R<sup>2</sup> – коэффициент детерминации; F – критерий Фишера; t<sub>1</sub> – значение t-статистики для первого коэффициента уравнения, t<sub>2</sub> – значение t-статистики для второго коэффициента уравнения.

В большинстве случаев (кроме пятого временного периода) коэффициенты корреляции характеризуют связи между дозой коагулянта и цветностью воды как заметные (см. табл. 5). Для пятого периода (февраль, март) значения  $t$ -статистики ниже критического ( $<1,65$ ), что означает, что полученное уравнение не является статистически значимым. Можно предположить, что в этот период вода характеризуется минимальными значениями цветности и выбор дозы коагулянта существенным образом зависит от условий коагуляции. Низкие температуры обрабатываемой воды определяют небольшую скорость коагуляции, а обеспечение нормативных показателей качества воды требует повышенной дозы коагулянта [11].

Значимость полученных моделей "доза коагулянта — цветность воды" для большинства месяцев подтверждается вычисленными статистическими критериями (значением  $t$ -статистики), а значит, показатель цветности воды водоисточника — значимый фактор при определении дозы коагулянта.

### Заключение

Известно, что при моделировании дозы коагулянта мутность воды является основным технологическим параметром. Как правило, цветность не рассматривается как параметр, оказывающий значимое влияние на величину дозы коагулянта. В условиях воздействия на водоисточник городской агломерации происходит некоторое перераспределение количественного влияния таких параметров, как мутность и окисляемость, на качество воды, подвергаемой коагуляции. С помощью регрессионного анализа выявлено, что между цветностью воды и дозой коагулянта существует определенная связь.

Результаты исследования свидетельствуют о том, что для цветности воды водоисточника характерны сезонные колебания в рамках годового цикла. Аппроксимация эмпирического распределения некоторой непрерывной функцией позволяет установить, что распределения цветности воды могут быть описаны гамма-распределением. Применение законов распределения цветности воды для каждого месяца дает возможность количественно оце-

нить превышение норматива качества воды по этому показателю.

Дифференцирование годового цикла по значениям вероятностей создает условия для формирования временных периодов, которым свойственны характерные особенности изменения цветности, и определения зависимости доз коагулянта ( $Al_2(SO_4)_3$ ) от цветности для каждого из них. Полученные уравнения регрессии подтверждают связь между изучаемыми показателями, а значения  $t$ -статистики характеризуют цветность как значимый фактор при определении дозы коагулянта.

Важно подчеркнуть, что цветность воды не всегда может проявляться как значимый фактор, требующий непрямого учета при моделировании дозы коагулянта. Однако в осложненных условиях, в частности при возможном влиянии на водоисточник различных факторов (например, со стороны городских агломераций), возникает необходимость исследования цветности воды водоисточника как параметра, который необходимо учитывать при моделировании управляющих качеством воды технологических параметров.

Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, публикационный номер FEUR — 2023 — 0006, проект "Разработка и создание малотоннажных продуктов и реагентов (ингибиторы коррозии и солеотложения, антиоксиданты, биоциды, присадки и др.) для процессов нефтегазохимии и очистки водных сред от загрязнений, замещающих импортные вещества и материалы. Теоретические и экспериментальные подходы".

The work was performed within the framework of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation state task in the field of scientific activity, publication number FEUR — 2023 — 0006, project "Development and creation of low-tonnage products and reagents (corrosion and scale inhibitors, antioxidants, biocides, additives, etc.) for petrochemical processes and water purification from pollution, replacing imported substances and materials. Theoretical and experimental approaches".

### Литература

1. Опекунова М.Г., Никулина А.Р., Опекунов А.Ю., Кукушкин С.Ю., Федькина М.Ю. Скрининг ключевых биогеохимических индикаторов экологического состояния крупных промышленных агломераций (на примере Московского района Санкт-Петербурга). Экология и промышленность России. 2024. Т. 28. № 3. С. 44–49. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2024-3-44-49>.
2. Wu Yue, He Peiran, Zhang Jian, Wei Ning, Zhang Zhongguo, Zhang Fengshan, Cheng Hongshun. Treatment of Deinking Wastewater by Enhanced Coagulation-Flat Turning Cross-flow Ultrafiltration Process. Chinese Journal of Environmental Engineering. 2022. Vol. 16. No. 5. P. 1497–1505. <https://doi.org/10.12030/j.cjee.202201139>.

### References

1. Opekunova M.G., Nikulina A.R., Opekunov A.Yu., Kukushkin S.Yu., Fed'kina M.Yu. Screening klyuchevykh biogeokhimicheskikh indikatorov ekologicheskogo sostoyaniya krupnykh promyshlennykh aglomeratsii (na primere Moskovskogo raiona Sankt-Peterburga). Ekologiya i promyshlennost' Rossii. 2024. T. 28. № 3. S. 44–49. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2024-3-44-49>.
2. Wu Yue, He Peiran, Zhang Jian, Wei Ning, Zhang Zhongguo, Zhang Fengshan, Cheng Hongshun. Treatment of Deinking Wastewater by Enhanced Coagulation-Flat Turning Cross-flow Ultrafiltration Process. Chinese Journal of Environmental Engineering. 2022. Vol. 16. No. 5. P. 1497–1505. <https://doi.org/10.12030/j.cjee.202201139>.

3. **Маркушина Л.А.** Эффективность экологических инициатив при оценке состояния окружающей среды города. *Экономический вестник РГУ "Terra economica"*. 2010. Т. 3. № 2. С. 59–65.
4. **Meyer T., Lei Y.D., Wania F.** Transport of polycyclic aromatic hydrocarbons and pesticides during snowmelt within an urban watershed. *Water Research*. 2011. Vol.45. No. 3. P. 1147–1156. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.11.004>.
5. **Juncosa R., Arango J.L., V6zquez R.** Physicochemical Parameters in the Generation of Turbidity Episodes in a Water Supply Distribution System. *Water*. 2022. Vol. 14. P. 3383. <https://doi.org/10.3390/w14213383>
6. **Xu Y., Feng L., Hou X., Wang J., Tang J.** Four-decade dynamics of the water color in 61 large lakes on the Yangtze Plain and the impacts of reclaimed aquaculture zones. *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 781. P. 146688. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146688>.
7. **Malakootian M., Fatehizadeh A.** Color removal from water by coagulation/caustic soda and lime. *Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 2010. Vol. 7. No. 3. P. 267–272.
8. **Бигалиев А.Б., Синтурина А.В., Бияшева З.М.** К вопросу о патогенном действии бензапирена, как загрязнителя окружающей среды (обзор). *Вестник КазНУ. Серия экологическая*. 2009. № 1 (24). С. 14–21.
9. **Rosińska A., Dąbrowska L.** Influence of type and dose of coagulants on effectiveness of PAH removal in coagulation water treatment. *Water Science and Engineering*. 2021. Vol. 14. No. 3. P. 193–200. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2021.08.004>.
10. **Jr-Lin Lin, Aldeno Rachmad Ika.** Minimization of halogenated DBP precursors by enhanced PACl coagulation: The impact of organic molecule fraction changes on DBP precursors destabilization with Al hydrates. *Science of The Total Environment*. 2020. Vol. 703. P. 134936. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134936>.
11. **Linde J.C., Fosso-Kankeu E., Waanders F., Gericke G.** Investigation of effective chemical flocculation conditions for the treatment of reverse osmosis reject water from coal power plant: a case study. *Desalination and Water Treatment*. 2020. Vol. 193. P. 251–265.
12. **Dnyaneshwar W., Alka K.** Applications of cascade feed forward neural network for modelling of coagulant dose in a drinking water treatment plant: comparative study. *Groundwater and Water Quality*. 2022. P. 191–198. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-09551-1\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-031-09551-1_14).
13. **Елисеева И.И., Курешева С.В., Костеева Т.В., Пантина И.В.** Эконометрика. Учебник. М., Финансы и статистика. 2007. 576 с.
14. **Кремер Н.Ш.** Теория вероятностей и математическая статистика. Учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М., ЮНИТИ-ДАНА. 2009. 551 с.
15. **Ялалетдинова А.В., Еникеева Л.В., Вожаева М.Ю., Кантор Е.А.** Статистические характеристики взаимосвязи мутности и расходов воды в реке, вызванных попусками водохранилища. *Теоретическая и прикладная экология*. 2018. № 1. С. 33–42. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2018-1-033-042>.
3. **Markushina L.A.** Effektivnost' ekologicheskikh initsiativ pri otsenke sostoyaniya okruzhayushchei sredy goroda. *Ekonomicheskii vestnik RGU "Terra economica"*. 2010. T. 3. № 2. S. 59–65.
4. **Meyer T., Lei Y.D., Wania F.** Transport of polycyclic aromatic hydrocarbons and pesticides during snowmelt within an urban watershed. *Water Research*. 2011. Vol.45. No. 3. P. 1147–1156. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.11.004>.
5. **Juncosa R., Arango J.L., V6zquez R.** Physicochemical Parameters in the Generation of Turbidity Episodes in a Water Supply Distribution System. *Water*. 2022. Vol. 14. P. 3383. <https://doi.org/10.3390/w14213383>.
6. **Xu Y., Feng L., Hou X., Wang J., Tang J.** Four-decade dynamics of the water color in 61 large lakes on the Yangtze Plain and the impacts of reclaimed aquaculture zones. *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 781. P. 146688. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146688>.
7. **Malakootian M., Fatehizadeh A.** Color removal from water by coagulation/caustic soda and lime. *Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 2010. Vol. 7. No. 3. P. 267–272.
8. **Bigaliev A.B., Sintyurina A.V., Biyasheva Z.M.** K voprosu o patogennom deistvii benzapirena, kak zagryaznitelya okruzhayushchei sredy (obzor). *Vestnik KazNU. Seriya ekologicheskaya*. 2009. № 1 (24). S. 14–21.
9. **Rosińska A., Dąbrowska L.** Influence of type and dose of coagulants on effectiveness of PAH removal in coagulation water treatment. *Water Science and Engineering*. 2021. Vol. 14. No. 3. P. 193–200. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2021.08.004>.
10. **Jr-Lin Lin, Aldeno Rachmad Ika.** Minimization of halogenated DBP precursors by enhanced PACl coagulation: The impact of organic molecule fraction changes on DBP precursors destabilization with Al hydrates. *Science of The Total Environment*. 2020. Vol. 703. P. 134936. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134936>.
11. **Linde J.C., Fosso-Kankeu E., Waanders F., Gericke G.** Investigation of effective chemical flocculation conditions for the treatment of reverse osmosis reject water from coal power plant: a case study. *Desalination and Water Treatment*. 2020. Vol. 193. P. 251–265.
12. **Dnyaneshwar W., Alka K.** Applications of cascade feed forward neural network for modelling of coagulant dose in a drinking water treatment plant: comparative study. *Groundwater and Water Quality*. 2022. P. 191–198. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-09551-1\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-031-09551-1_14).
13. **Eliseeva I.I., Kuryseva S.V., Kosteeva T.V., Pantina I.V.** *Ekonometrika. Uchebnik. M., Finansy i statistika*. 2007. 576 s.
14. **Kremer N.Sh.** *Teoriya veroyatnostei i matematicheskaya statistika. Uchebnik dlya vuzov. 3-e izd., pererab. i dop. M., YuNITI-DANA*. 2009. 551 s.
15. **Yalaletdinova A.V., Enikeeva L.V., Vozhdaeva M.Yu., Kantor E.A.** *Statisticheskie kharakteristiki vzaimosvyazi mutnosti i raskhodov vody v reke, vyzvannymi popuskami vodokhraniliushcha. Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2018. № 1. S. 33–42. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2018-1-033-042>.

А.В. Ялалетдинова – канд. техн. наук, доцент, Уфимский государственный нефтяной технический университет (УГНТУ), e-mail: hawk22.89@mail.ru • П.В. Сereбрияков – гл. инженер, ГУП РБ "Уфаводоканал", e-mail: serebryakov@uwc.ufanet.ru • М.Ю. Вожаева – д-р хим. наук, начальник Центральной химико-бактериологической лаборатории Центра аналитического контроля качества воды, ГУП РБ "Уфаводоканал", e-mail: vozhdaveva@mail.ru • Е.А. Мазлова – д-р техн. наук, профессор, Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, e-mail: mazlova@hotmail.com • И.Г. Шайхиев – д-р техн. наук, зав. кафедрой, Казанский национальный исследовательский технологический университет, e-mail: ildars@inbox.ru • Е.А. Кантор – д-р хим. наук, профессор, УГНТУ, e-mail: evgkantor@mail.ru

A.V. Yalaletdinova – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Ufa State Petroleum Technical University (USPTU), e-mail: hawk22.89@mail.ru • P.V. Serebriakov – Chief Engineer, SUE RB "Ufavadocanal", e-mail: serebryakov@uwc.ufanet.ru • M.Yu. Vozhdaeva – Dr. Sci. (Chem.), Head of the Central Chemical and Bacteriological Laboratory of the Center for Analytical Water Quality Control, SUE RB "Ufavadocanal", e-mail: vozhdaveva@mail.ru • E.A. Mazlova – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (NRU), e-mail: mazlova@hotmail.com • I.G. Shaikhiev – Dr. Sci. (Eng.), Head of Department, Kazan National Research Technological University, e-mail: ildars@inbox.ru • E.A. Kantor – Dr. Sci. (Chem.), Professor, USPTU, e-mail: evgkantor@mail.ru