

КОМПЛЕКСНОЕ ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ПРОЦЕСС ИЗВЛЕЧЕНИЯ КРАСИТЕЛЯ МЕТИЛЕНОВОГО ГОЛУБОГО ИЗ МОДЕЛЬНОГО РАСТВОРА

С.В. Свергузова¹, Р.Р. Гафаров¹, И.Г. Шайхиев², А.В. Четвериков¹, Ж.А. Сапронова¹

¹Кафедра Промышленной экологии, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, ул. Костюкова, 46, Белгород, Российская Федерация, 308012

E-mail: pe@bstu.ru, sapronova.2016@yandex.ru, beldevid94@mail.ru, amfimag@yandex.ru

²Кафедра Инженерной экологии, Казанский национальный исследовательский технологический университет, ул. К. Маркса, 68, Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация, 420015

E-mail: ildars@inbox.ru

Представлены результаты исследования влияния физико-химических параметров на эффективность очистки сточных вод от красителя метиленовой голубой (МГ) методом планирования эксперимента для выбора рациональных параметров процесса очистки. При выборе должны применяться соответствующие методики, такие как математическое моделирование, анализ данных и практические исследования, чтобы выбрать оптимальные параметры очистки, обеспечивающие эффективность, экономичность и соблюдение экологических стандартов. Использовались математические модели и алгоритмы, позволяющие предсказать влияние изменения технологических параметров на конечный результат процесса и оптимизировать его выполнение. Для исследования был взят отход отбелочной глины, полученный на Алексеевском маслоэкстракционном заводе (Белгородская область). В соответствии с планом эксперимента было проведено 30 опытов с учетом изменения четырех переменных на трех уровнях значений. Обработка результатов эксперимента проводилась методом математической статистики. В качестве статистики критерия использовался уровень значимости. В результате статистической компьютерной обработки экспериментальных данных получено уравнение регрессии, адекватно описывающее зависимость эффективности очистки модельного раствора сорбционным материалом от изменения температуры обжига, времени перемешивания, температуры среды и массовой дозы добавки СМ. Построены номограммы, позволяющие анализировать влияние варьируемых факторов на выходной параметр. Каждый опыт проводился в течение заданного времени, после чего содержимое реакционной емкости фильтровали через бумажный фильтр, в фильтрате определяли остаточную концентрацию МГ. В качестве статистики критерия использовался уровень значимости. В качестве оптимальных приняты технологические параметры: температура обжига СМ – 350 °С, длительность взаимодействия сорбционного материала с модельным раствором МГ – 90 мин, доза СМ – 0,5 г/дм³, температура водной среды – 60 °С.

Ключевые слова: отход отбелочной глины, параметры, четырёхфакторный эксперимент, планирование, уравнение регрессии

COMPLEX INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL FACTORS ON THE PROCESS OF EXTRACTING METHYLENE BLUE DYE FROM A MODEL SOLUTION

S.V. Sverguzova¹, R.R. Gafarov¹, I.G. Shaikhiev², A.V. Chetverikov¹, Zh.A. Sapronova¹

¹Department of Industrial Ecology, Belgorod State Technological University, V.G. Shukhov, st. Kostyukova, 46, Belgorod, Russian Federation, 308012

E-mail: pe@bstu.ru, sapronova.2016@yandex.ru; yuliavoronina@mail.ru

²Department of Engineering Ecology, Kazan National Research Technological University, st. K. Marx, 68, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation, 420015

E-mail: ildars@inbox.ru

The results of a study of the influence of physicochemical parameters on the efficiency of wastewater treatment from the methylene blue (MB) dye using the method of planning an experiment to select rational parameters for the treatment process are presented. Selection must apply appropriate techniques such as mathematical modeling, data analysis and case studies to select optimal treatment parameters that ensure efficiency, cost-effectiveness and compliance with environmental standards. Mathematical models and algorithms were used to predict the impact of changes in technological parameters on the final result of the process and optimize its implementation. For the study, waste bleaching clay obtained at the Alekseevsky oil extraction plant (Belgorod region) was taken. In accordance with the experimental plan, 30 experiments were carried out, taking into account changes in four variables at three levels of values. The experimental results were processed using the method of mathematical statistics. The significance level was used as the criterion statistic. As a result of statistical computer processing of experimental data, a regression equation was obtained that adequately describes the dependence of the efficiency of purification of a model solution with sorption material on changes in the firing temperature, stirring time, medium temperature and mass dose of the SM additive. Nomograms have been constructed to analyze the influence of variable factors on the output parameter. Each experiment was carried out for a given time, after which the contents of the reaction container were filtered through a paper filter, and the residual concentration of MG in the filtrate was determined. The significance level was used as the criterion statistic. The following technological parameters were accepted as optimal: SM firing temperature – 350 °C, duration of interaction of the sorption material with the MG model solution – 90 min, SM dose – 0.5 g/dm³, water temperature – 60 °C.

Key words: bleaching clay waste, parameters, four-factor experiment, planning, regression equation

Для цитирования:

Свергузова С.В., Гафаров Р.Р., Шайхиев И.Г., Четвериков А.В., Сапронова Ж.А. Комплексное влияние технологических факторов на процесс извлечения красителя метиленового голубого из модельного раствора. *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2024. Т. LXVIII. № 2. С. 60–66. DOI: 10.6060/RCJ.2024682.8.

For citation:

Sverguzova S.V., Gafarov R.R., Shaikhiev I.G., Chetverikov A.V., Saponova Zh.A. Complex influence of technological factors on the process of extracting methylene blue dye from a model solution. *Ros. Khim. Zh.* 2024. V. 68. N 2. P. 60–66. DOI: 10.6060/RCJ.2024682.8.

ВВЕДЕНИЕ

В ходе реализации реальных производственных процессов с множеством разнообразных технологических параметров часто наблюдается одновременное изменение следующих факторов: давления, температуры, концентрации, pH среды, длительности контакта и др., влияющих на конечную цель процесса [1–3]. При одновременном изменении значений многих параметров очень сложно предсказать суммарную эффективность их воздействия, поскольку обычно в исследованиях определяются двухпараметровые зависимости типа температура – эффективность; интенсивность перемешивания – скорость реакции; дисперсность частиц – сорбционная емкость и т.д. Однако, для оперативного контроля и регулирования течения технологических процессов часто необходимо учитывать одновременное изменение множества состав-

ляющих [4, 5]. В этом случае выходом из ситуации может оказаться комплексная оценка влияния технологических факторов на течение производственного процесса в соответствии с дробной, с использованием 3-х уровневой 4-х факторного эксперимента и применением программного пакета статистического анализа данных STATISTICA [6]. В соответствии с планом эксперимента было проведено 30 опытов с учетом изменения четырех переменных на трех уровнях значений.

Целью работы являлось исследование совместного влияния 4-х технологических факторов на ход процесса очистки модельного раствора от метиленового голубого (МГ). Моделирование химико-технологического процесса очистки водных сред, в частности, от МГ является актуальной задачей, решение которой позволяет уменьшить временные затраты, снизить расход реактивов и определить оптимальные параметры водоочистки.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Объектом исследований являлся сорбционный материал (СМ), полученный при термической модификации отхода отбелной глины, взятой на Алексеевском маслоэкстракционном заводе (Белгородская область) [7].

Предметом исследований являлся процесс извлечения метиленового голубого из модельных растворов и влияние на него различных факторов.

В качестве переменных (X_1 , X_2 , X_3 , X_4) были выбраны следующие параметры:

X_1 – доза добавляемого сорбционного материала, г/дм³;

X_2 – температура обжига сорбционного материала, °С;

X_3 – длительность взаимодействия сорбционного материала с модельным раствором МГ, мин;

X_4 – температура реакционной среды, °С;

В качестве отклика (Y) была выбрана эффективность очистки раствора от МГ, %.

В ходе предварительных экспериментов была проведена оценка влияния на эффективность очистки каждого фактора ($X_1 - X_4$) по отдельности (рис.1).

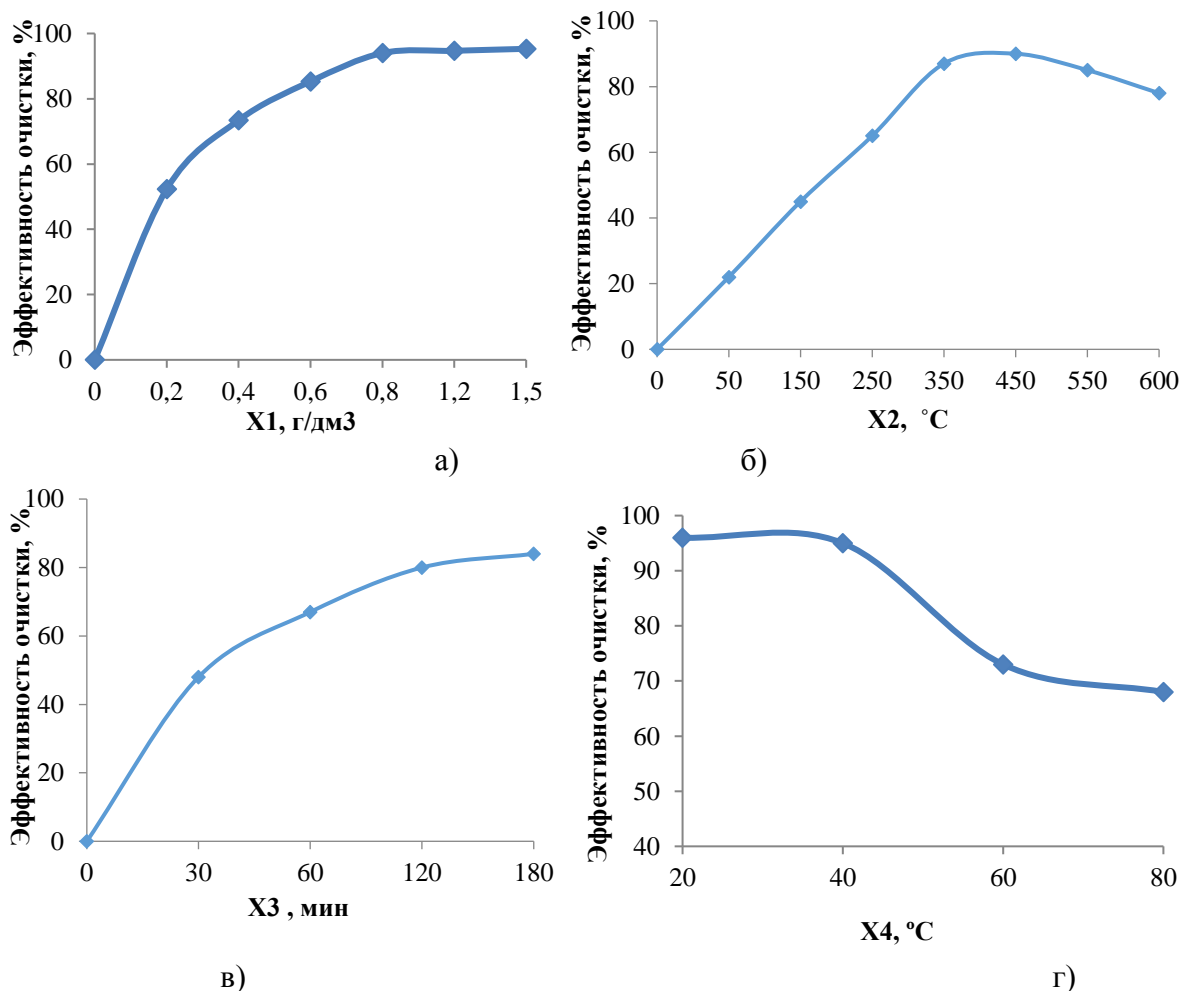


Рис. 1. Влияние технологических факторов на эффективность очистки, а) X_1 – дозы добавки СМ; б) X_2 – температуры обжига СМ; в) X_3 – длительности взаимодействия СМ с модельным раствором МГ; г) температуры реакционной среды

Для моделирования технологического процесса был использован план 3-х уровневый четырёхфакторного эксперимента [8–11].

Исходя из результатов исследования, представленных на рис. 1, были выбраны интервалы и уровни варьирования переменных (табл. 1):

Таблица 1

Кодированные переменные	Перемены в натуральных величинах	Интервалы и уровни варьирования				Интервалы варьирования
		-1	0	+1	Шаг варьирования	
X ₁	Доза СМ, г/дм ³	0,2	0,5	0,8	0,3	0,2 – 0,8
X ₂	Температура обжига, t _{обж} , °С	150	250	350	100	150 -350
X ₃	τ*, мин.	30	60	90	30	30 - 90
X ₄	Температура водной среды, °С	20	40	60	20	20 - 60

*длительность взаимодействия сорбционного материала с модельным раствором МГ

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В соответствии с планом эксперимента было проведено 30 опытов. Порядок выполнения экспериментов был следующим. В реактор с модельным раствором и работающей мешалкой подавался порошок СМ в расчетном количестве. Число оборотов мешалки (200 об/мин) было обусловлено необходимостью поддержания всех частиц суспензии во взвешенном состоянии, не допуская их оседания. Каждый опыт проводился в течение заданного времени, после чего содержимое реакционной емкости фильтровали через бумажный фильтр, в фильтрате определяли остаточную концентрацию МГ.

Для построения регрессионной модели, объясняющей поведение целевой переменной Y использовалась функция вида:

$$Y = A_0 + A_1X_1 + A_2X_2 + A_3X_3 + A_4X_4 + A_5X_1X_2 + A_6X_1X_3 + A_7X_1X_4 + A_8X_2X_3 + A_9X_2X_4 + A_{10}X_3X_4 + A_{11}X_1^2 + A_{12}X_2^2 + A_{13}X_3^2 + A_{14}X_4^2$$

В которой:

- A₀ – независимый коэффициент;
- A₁, A₂, A₃, A₄ – коэффициенты линейного влияния исходных факторов X₁, X₂, X₃, X₄;
- A₅, A₆, A₇, A₈, A₉, A₁₀ – коэффициенты, показывающие влияние взаимосвязи между факторами X₁ и X₂, X₁ и X₃, X₁ и X₄, X₂ и X₃, X₂ и X₄, X₃ и X₄ соответственно;
- A₁₁, A₁₂, A₁₃, A₁₄ – коэффициенты, показывающие нелинейную квадратичную зависимость от факторов X₁, X₂, X₃, X₄ соответственно.

Обработка результатов эксперимента проводилась методом математической статистики [12–15]. В качестве статистики критерия использовался уровень значимости. Методом регрессионного анализа [16–18], получено уравнение регрессии $Y = f(X_1, X_2, X_3, X_4)$:

Полученная регрессионная модель (с округленными коэффициентами):

$$y = 30,31 + 51,94X_1 + 0,24X_2 + 0,24X_3 +$$

$$+ 0,24X_4 - 0,046X_1X_2 - 0,031X_1X_3 - 0,179X_1X_4 - 8 \cdot 10^{-4}X_2X_3 + 3 \cdot 10^{-4}X_2X_4 + 27 \cdot 10^{-4}X_3X_4 - 16,25X_1^2 - 3 \cdot 10^{-4}X_2^2 - 8 \cdot 10^{-4}X_3^2 - 45 \cdot 10^{-4}X_4^2$$

Проведен анализ полученной регрессионной модели с целью определить ее адекватность и соответствие значениям эксперимента [19, 20].

Коэффициент детерминации показывает долю объясненной дисперсии (изменчивости): $R^2 = 0,9134$.

Средняя ошибка между экспериментальными и модельными значениями: $\Delta = -0,0237$.

Остаточная стандартная ошибка $S_{ост} = 0,6252$.

$$S_{ост} = \frac{1}{n-1} \cdot \sqrt{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (1)$$

где y_i – измеренное значение, \bar{y}_i – вычисленное по модели значение, n – число наблюдений в модели, l – число параметров модели/ $n = 30$, $l = 14$.

Коэффициент детерминации близок к 1, а средняя и остаточная стандартные ошибки малы, что показывает, что модель с высокой точностью предсказывает значения целевой переменной [21].

Значения критерия t-Стьюдента = 0,0149. Для уровня значимости $\alpha = 0,05$ и для 58 (60 измерений в двух выборках минус количество выборок) степеней свободы $t_{крит} = 2,002$. Т.е. $t < t_{крит}$, то принимается нулевая гипотеза о равенстве математических ожиданий.

Значение критерия Фишера $F = 1,1055$. Для уровня значимости $\alpha = 0,05$ и для 30 степеней свободы в каждой выборке $F_{крит} = 1,8409$. Т.к. $F < F_{крит}$, то принимается нулевая гипотеза о равенстве дисперсий выборок.

По результатам анализа можно сказать, что построенная модель обладает высокой адекватностью.

Был исследован анализ важности каждого из факторов путем проведения стандартизации каждого из показателей и построения регрессион-

ной модели на полученных данных [22]. Из полученных выше данных следует:

- близкие к нулю коэффициенты – незначительные факторы. Чем дальше от нуля – тем сильнее влияние фактора.

- положительные коэффициенты – прямая зависимость. При увеличении значения фактора – увеличивается выходной параметр y .

- отрицательные коэффициенты – обратная зависимость. При уменьшении значения фактора – уменьшается выходной параметр y .

Важность факторов по убыванию: X_2 , X_1 , X_3 , X_4 .

Важность взаимодействия факторов между собой по убыванию: (X_2, X_3) , (X_3, X_4) , (X_1, X_2) , (X_1, X_4) , (X_2, X_4) , (X_1, X_3) .

Важность квадратичной зависимости по убыванию: X_2^2 , X_4^2 , X_1^2 , X_3^2 .

По результатам расчетов построены поверхности отклика параметра Y для разных условий процесса (рис. 2). Статистические характеристики расчетов приводятся в табл. 4.

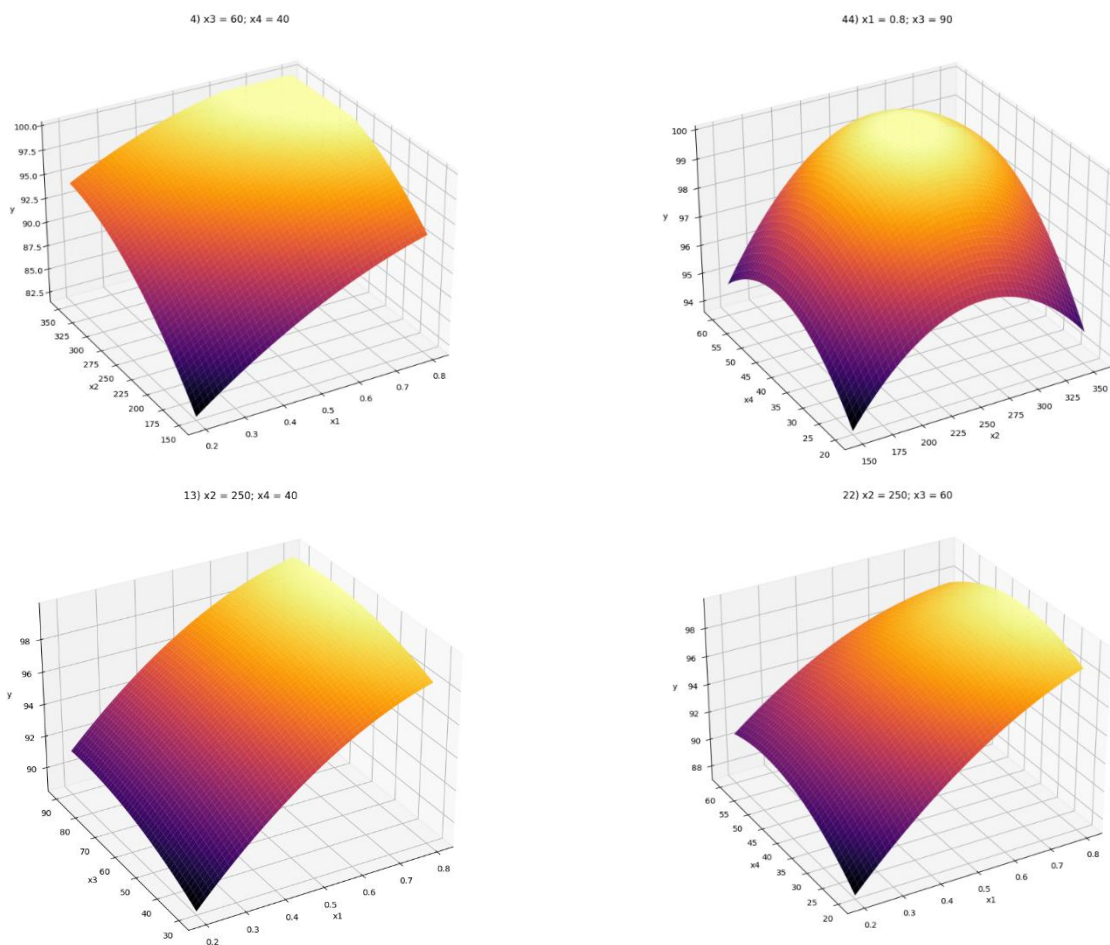


Рис. 2. Поверхности отклика при некоторых фиксированных переменных

Таблица 2

Статистические характеристики

Показатели			Значения
Среднее значение отклика в центре плана, \bar{y}			93,096
Среднеквадратичные ошибки (СКО)	Об адекватности	F	1,1055
		t - Стьюдента	0,0149

После уравнения $Y = f(X_1, X_2, X_3, X_4)$, приведен вектор $\hat{\alpha}_i$ уровня значимости соответствующих коэффициентов регрессии, определенных с помощью номограмм [23].

Анализ полученного уравнения проводили в порядке, изложенном в работе [24].

Ошибки измерения $S_{уи}$ определяли следующим образом. Для каждой искомой величины S_u

проводили по три направленных опыта и вычислили среднеквадратичную ошибку.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}}, \quad (2)$$

где X_i – значение величины измерения в i – том опыте; n – число опытов.

Как следует из полученного уравнения, эффективность очистки (Y), увеличивается при повышении значений X_1, X_2, X_3, X_4 , причем, рост фактора X_1 оказывает гораздо большее влияние на величину эффективности очистки по сравнению с остальными факторами [25]. Парные взаимодействия факторов $X_1X_3; X_1X_2; X_2X_4; X_2X_3; X_3X_4$; а также квадратичные члены уравнения $X_1^2, X_2^2, X_3^2, X_4^2$ имеют очень низкие значения коэффициентов. Поэтому ими можно пренебречь и исключить из уравнения регрессии. Тогда полученное уравнение примет вид: $Y = 30,31 + 51,94X + 0,24X_2 + 0,24X_3 + 0,24X_4 - 0,79X_1X_4 - 16,25X_1^2$.

ВЫВОДЫ

В результате исследования влияния четырёх независимых факторов при одновременном их изменении получено уравнение регрессии, позволяющее предсказать эффективность очистки при разных технологических ситуациях. Уравнение адекватно описывает процесс очистки и может быть использовано в производственных условиях для оперативного управления технологическим процессом.

Полученные в ходе экспериментальных исследований данные могут быть успешно использованы при оперативном руководстве технологическим процессом. Результаты экспериментов могут быть также использованы при проектировании новых и реконструкции существующих систем водочистки.

Применение изложенного подхода исследований к экспериментальному изучению влияния различных факторов на эффективность процесса может быть использовано также при изучении различных технологий, что позволяет значительно сократить время, затрачиваемое для исследований, уменьшить расход дорогостоящих реактивов и при минимальном количестве экспериментов иметь возможность предсказать оптимальные значения искомых параметров.

Работа выполнена с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В. Г. Шухова.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. Denisova K.O., Iljin A.A., Rumyantsev R.N., Ilin A.P. Biomedical Journal of Scientific and Technical Research. 2020. V. 28. N 3. P. 21549–21550. DOI: 10.26717/BJSTR.2020.28.004642.
2. Akhmetova S.O. Вестник Алматинского технологического университета. 2019. N 4. P. 88–96.
3. Дегтярева Е.А., Вишневецкая Л.И., Гарная С.В., Калько Е.А. Химия растительного сырья. 2019. № 3. С. 299–305. DOI: 10.14258/jcprm.2019035098.
4. Калякин М.А., Филаретов А.Г., Стрельников С.И. Петербургский журнал электроники. 2018. № 1(90). С. 87–96.
5. Ковалев И.В., Сарамуд М.В., Калинин А.О. Промышленные АСУ и контроллеры. 2022. № 2. С. 8–14. DOI: 10.25791/asu.2.2022.1344.
6. Седых И. А., Истомин В. А. Вестник Липецкого государственного технического университета. 2017. № 1(31). С. 33–37.
7. Свергузова С. В., Шайхиев И. Г., Сапронова Ж. А., Лупандина Н.С., Воронина Ю.С., Гафаров Р.Р. Изв. вузов. Химия и хим. 2023. Т. 66. Вып. 6. С. 76–84. DOI: 10.6060/ivkkt.20236606.6780.
8. Фомин В. Н., Ковалева А. А., Алдабергеннова С. К. Вестник Карагандинского университета. Серия: Химия. 2017. № 3(87). С. 91–100.
9. Команов П. А., Тавасиев Д. А. Академическая публикастика. 2019. № 12. С. 50–52.
10. Кельдюшов В. Д. Аллея науки. 2020. Т. 1. № 7(46). С. 314–317.

REFERENCES

1. Denisova K.O., Iljin A.A., Rumyantsev R.N., Ilin A.P. Biomedical Journal of Scientific and Technical Research. 2020. V. 28. N 3. P. 21549–21550. DOI: 10.26717/BJSTR.2020.28.004642.
2. Akhmetova S.O. Bulletin of Almaty Technological University. 2019. N 4. P. 88–96.
3. Degtyareva E. A., Vishnevskaya L. I., Garnaya S. V., Kalko E. A. Chemistry of plant materials. 2019. N 3. P. 299–305. DOI: 10.14258/jcprm.2019035098.
4. Kalyakin M. A., Filaretov A. G., Strelnikov S. I. St. Petersburg Journal of Electronics. 2018. N 1(90). P. 87–96.
5. Kovalev I. V., Saramud M. V., Kalinin A. O. Industrial automated control systems and controllers. 2022. N 2. P. 8–14. DOI: 10.25791/asu.2.2022.1344.
6. Sedykh I. A., Istomin V. A. Bulletin of Lipetsk State Technical University. 2017. N 1(31). P. 33–37.
7. Svergzova S. V., Shaikhiyev I. G., Sapronova Zh. A., Lupandina N. S., Voronina Yu.S., Gafarov R.R. ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2023. V. 66. N 6. P. 76–84. DOI: 10.6060/ivkkt.20236606.6780.
8. Fomin V. N., Kovaleva A. A., Aldabergenova S. K. Bulletin of Karaganda University. Series: Chemistry. 2017. N 3(87). P. 91–100.
9. Komanov P. A., Tavasiev D. A. Academic journalism. 2019. N 12. P. 50–52.
10. Keldyushov V. D. Alley of Science. 2020. V. 1. N 7(46). P. 314–317.
11. Shindryaev A.V., Lebedev A. E., Menshutina N. V. Ros. Khim. Zh. 2023 V. 67. N 2. P. 28–36. DOI: 10.6060/rcj.2022672.3.

11. Шиндряев А. В., Лебедев А. Е., Меньшутина Н. В. Рос. хим. ж. 2023. Т. 67. № 2. С. 28–36. DOI 10.6060/rcj.2022672.3.
12. Момзяков А. А., Дебердеев Т. Р., Дебердеев Р. Я. Бутлеровские сообщения. 2019. Т. 58. № 4. С. 127–132.
13. Яковлева Т. В., Кульберг Н. С. Доклады Академии наук. 2014. Т. 459. № 1. С. 27. DOI: 10.7868/S0869565214310089.
14. Свергузова С. В., Старостина И. В., Сапронова Ж. А., Солопов Ю. И., Четвериков А. В. Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 6. С. 197–201.
15. Буре В. М., Петрушин А. Ф., Митрофанов Е. П. Сельскохозяйственная биология. 2019. Т. 54. № 1. С. 84–90. DOI: 10.15389/agrobiology.2019.1.84rus.
16. Мефтахетдинова Д. Р., Магеррамов З. Т. Sciences of Europe. 2023. № 112(112). С. 69–73. DOI: 10.5281/zenodo.7708542.
17. Носков С. И. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 10. С. 380–385. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-10-380-386.
18. Носков С. И., Бычков Ю. А. Вестник Воронежского государственного технического университета. 2022. Т. 18. № 2. С. 7–12. DOI: 10.36622/VSTU.2022.18.2.001.
19. Свергузова С. В., Сапронова Ж. А., Шаихиев И. Г. Рос. хим. ж. 2023. Т. 67. № 2. С. 67–73. DOI 10.6060/rcj.2023672.8.
20. Родионова Т. Е. Описание технического процесса методами регрессионного анализа. Сб. тр. Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем: Сборник научных трудов, Ульяновск, 10–11 октября 2019 года. – Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2019. – С. 145–149.
21. Хан П. В., Таиров Э. А. Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2017. № 4(8). С. 109–119.
22. Кривенко М. П. Информатика и ее применения. 2014. Т. 8. № 3. С. 70–78. DOI: 10.14357/19922264140308.
23. Бондарь А. Г., Статюха Г. А., Потяженко И. А. Планирование эксперимента при оптимизации процессов химической технологии (алгоритмы и примеры): Учеб. пособие. Киев: Выща школа. Головное изд-во, 1980. – 264 с.
24. Хнаев О. А., Данилов А. М. Молодой ученый. 2014. № 4. С. 295–297.
25. Логинова М. Е., Мовсумзаде Э. М., Тептерева Г. А. Рос. хим. ж. 2022. Т. 66. № 1. С. 35–41. DOI 10.6060/rcj.2022661.6.
12. Momzyakov A. A., Deberdeev T. R., Deberdeev R. Ya. Butlerov's messages. 2019 V. 58. N 4. P. 127–132.
13. Yakovleva T. V., Kulberg N. S. Reports of the Academy of Sciences. 2014. V. 459. N 1. P. 27. DOI: 10.7868/S0869565214310089.
14. Svergzuzova S. V., Starostina I. V., Sapronova Zh. A., Solopov Yu. I., Chetverikov A. V. Bulletin of Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhov. 2016. N 6. P. 197–201.
15. Bure V. M., Petrushin A. F., Mitrofanov E. P. Experience in applying mathematical statistics methods to assess the condition of agricultural plants. Agricultural biology. 2019. V. 54. N 1. P. 84–90. DOI: 10.15389/agrobiology.2019.1.84rus.
16. Meftakhetdinova D. R., Maharramov Z. T. Sciences of Europe. 2023. N 112(112). P. 69–73. DOI: 10.5281/zenodo.7708542.
17. Noskov S. I. News of Tula State University. Technical science. 2021. N 10. P. 380–385. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-10-380-386.
18. Noskov S. I., Bychkov Yu. A. Bulletin of Voronezh State Technical University. 2022. V. 18. N 2. P. 7–12. DOI: 10.36622/VSTU.2022.18.2.001.
19. Svergzuzova S. V., Sapronova Zh. A., Shaikhiyev I. G. Ros. Khim. Zh. 2023 V. 67. N 2. P. 67–73. DOI 10.6060/rcj.2023672.8.
20. Rodionova T. E. Description of a technical process using regression analysis methods. Sat. tr. Modern problems of design, production and operation of radio engineering systems: Collection of scientific papers, Ulyanovsk, October 10–11, 2019. Ulyanovsk: Ulyanovsk State Technical University, 2019. P. 145–149.
21. Khan P. V., Tairov E. A. Information and mathematical technologies in science and management. 2017. N 4(8). P. 109–119.
22. Krivenko M. P. Computer science and its applications. 2014. V. 8. N 3. P. 70–78. DOI: 10.14357/19922264140308.
23. Bondar A. G., Statyukha G. A., Potyazhenko I. A. Planning an experiment when optimizing chemical technology processes (algorithms and examples): Textbook. allowance. Kyiv: Vysha school. Head publishing house, 1980. – 264 p.
24. Khnaev O. A., Danilov A. M. Young scientist. 2014. N 4. P. 295–297.
25. Loginova M. E., Movsumzade E. M., Tepтерева G. A. Ros. Khim. Zh. 2022. V. 66. N 1. P. 35–41. DOI 10.6060/rcj.2022661.6.

Поступила в редакцию 12.12.2023
Принята к опубликованию 07.04.2024

Received 12.12.2023
Accepted 07.04.2024