

**МАТЕМАТИКО-СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЧИСТКИ
В ВЫСОКОГРАДИЕНТНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ ГИДРИРОВАННОГО ЖИРА
ОТ СУСПЕНДИРОВАННОГО КАТАЛИЗАТОРА**

В.Н. Тыртыгин, А.А. Денисковец, А.Н. Лабутин

Вячеслав Николаевич Тыртыгин*

Кафедра технической механики, Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, ул. Ожешко, 22, Гродно, Республика Беларусь, 230023

E-mail: tyrtugin@mail.ru*

Алексей Андреевич Денисковец

Кафедра технической механики и математики, Гродненский государственный аграрный университет, ул. Терешковой, 28, Гродно, Республика Беларусь, 230008

E-mail: aleksei_deniskov@mail.ru

Александр Николаевич Лабутин

Кафедра технической кибернетики и автоматики, Ивановский государственный химико-технологический университет, пр. Шереметевский, 7, Иваново, Российская Федерация, 153000

E-mail: lan@isuct.ru

Во введении указан объект исследования – гидрированный жир, подвергнутый очистке от суспендированного никельсодержащего катализатора в высокоградиентном магнитном поле. Никельсодержащий катализатор, благодаря наличию в нем солей никеля, парамагнитен и может эффективно извлекаться из гидрированного жира в магнитном поле методом высокоградиентной магнитной сепарации. В методике эксперимента напряженность магнитного поля составляла не менее 600 кА/м, градиент не менее $(20-30) \cdot 10^4$ кА/м². По результатам и их обсуждению выполнен анализ эмпирических зависимостей по каждому факторному признаку в отдельности, а также построение по каждому из них классических типов одномерных нелинейных регрессионных моделей. Показано, что наиболее статистически достоверными являются модели экспоненциального типа. Установлено, что после очистки содержание в гидрированном жире суспендированного никельсодержащего катализатора имеет обратно пропорциональную зависимость от напряженности магнитного поля, высоты (длины) зоны фильтрации и скорости фильтрации. Построена двумерная экспоненциальная регрессионная модель содержания в саломасе никельсодержащего катализатора в комплексной зависимости от скорости и высоты рабочей зоны фильтрации. По данным эксперимента при определенной высоте зоны фильтрации и выбранной скорости фильтрации, составлена математико-статистическая модель изменения концентрации никельсодержащего катализатора в зависимости от напряженности магнитного поля. Используя полученную двумерную экспоненциальную регрессионную модель, можно прогнозировать степень очистки саломасы от суспендированного катализатора в зависимости от конкретной напряженности магнитного поля и определять напряженность магнитного поля, при которой концентрация никеля в результате очистки достигнет наперед заданного значения.

Ключевые слова: саломас, гидрированные жиры, никельсодержащие катализаторы, высокоградиентное магнитное поле, многомерная регрессия, математическая модель

Для цитирования:

Тыртыгин В.Н., Денисковец А.А., Лабутин А.Н. Математико-статистическая модель очистки в высокоградиентном магнитном поле гидрированного жира от суспендированного катализатора. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2021. Т. 64. Вып. 6. С. 83–88

For citation:

Tyrtygin V.N., Deniskovets A.A., Labutin A.N. Mathematical and statistical model of cleaning in a high-gradient magnetic field of hydrogenated fat from suspended catalyst. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 6. P. 83–88

**MATHEMATICAL AND STATISTICAL MODEL OF CLEANING IN A HIGH-GRADIENT
MAGNETIC FIELD OF HYDROGENATED FAT FROM SUSPENDED CATALYST**

V.N. Tyrtygin, A.A. Deniskovets, A.N. Labutin

Vyacheslav N. Tyrtygin*

Department of Technical Mechanics, Janka Kupala State University of Grodno, Ozheshko st., 22, Grodno, 230023, Belarus

E-mail: tyrtygin@mail.ru*

Aleksey A. Deniskovets

Department of Technical Mechanics and Mathematics, Grodno State Agrarian University, Tereshkova st., 28, Grodno, 230008, Belarus

E-mail: aleksei_deniskov@mail.ru

Aleksandr N. Labutin

Department of Technical Cybernetics and Automation, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Sheremetevsky ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia

E-mail: lan@isuct.ru

The introduction specifies the object of the study - hydrogenated fat subjected to purification from suspended nickel-containing catalyst in a high-gradient magnetic field. The nickel-containing catalyst, due to the presence of nickel salts in it, is paramagnetic and can be effectively extracted from hydrated fat in the magnetic field by a method of highly gradient magnetic separation. In the experiment technique the magnetic field strength was not less than 600 kA/m, the gradient not less than $(20-30) \cdot 10^4$ kA/m². Based on the results and their discussion, the analysis of empirical dependencies on each factor basis is carried out separately, as well as the construction of classical types of one-dimensional non-linear regression models for each of them. It is shown that the most statistically reliable are the exponential models. It was found that after purification the content of suspended nickel-containing catalyst in the hydrogenated fat has an inverse proportional dependence on the magnetic field strength, height (length) of the filtration zone and filtration rate. A two-dimensional exponential regression model of the content of the nickel-containing catalyst in the hydrogenated fat in the complex dependence on the rate and height of the filtration zone is built. Based on the experimental data at a certain height of the filtration zone and the selected filtration rate, a mathematical-statistical model of change in the concentration of nickel-containing catalyst depending on the magnetic field strength is made. Using the resulting two-dimensional exponential regression model, it is possible to predict the degree of purification of the salomas from the suspended catalyst depending on the specific tension of the magnetic field and to determine the tension of the magnetic field, at which the concentration of nickel as a result of cleaning will reach an advance value.

Key words: salomas, hydrogenated fats, nickel-containing catalysts, high-gradient magnetic field, multivariate regression, mathematical model

ВВЕДЕНИЕ

Использование магнитных технологий в процессах гидрогенизации для извлечения, например, суспендированного никельсодержащего катализатора из гидрированного жира (саломаса)

осуществляется достаточно давно [1]. Никельсодержащий катализатор, благодаря наличию в нем солей никеля, парамагнитен и может достаточно эффективно извлекаться из гидрированного жира в магнитном поле методом высокоградиентной

магнитной сепарации (ВГМС) [2]. Этот метод основан на том, что через рабочую зону магнитного сепаратора, содержащую «матрицу», например, в виде спрессованного металлического «войлока», при включенном магнитном поле пропускают саломас, содержащий катализатор. Благодаря наличию «матрицы», в рабочей зоне магнитного сепаратора создается высокоградиентное магнитное поле, достаточное для захвата и удержания частиц катализатора элементами «матрицы». Очищенный от частиц катализатора саломас поступает на дальнейшую переработку. Через заданное время, «матрица» промывается от задержанных частиц катализатора, повторно используемого в процессах гидрогенизации.

В России первые работы по очистке саломаса от никельсодержащего катализатора методом высокоградиентной магнитной сепарации появились в начале 90-х г. XX века [1, 2].

Благодаря более раннему развитию метода ВГМС, в таких странах как США, Япония, Корея, Китай, такого рода исследования проводились с начала 80-х годов. Так, например, в статье [3] автор описывает процесс удаления из жира никелевого катализатора в высокоградиентном магнитном поле. В 1984 г. японские исследователи получили патент [4] на использование высокоградиентного магнитного сепаратора для удаления из тяжелых масел частиц катализатора, содержащего никель. Наиболее широкое применение ВГМС в различных отраслях промышленности, в том числе и пищевой, описали в 2009 г. корейские исследователи [5].

Дальнейшие исследования ряда зарубежных авторов [6-13], относящиеся в основном к периоду с 2008 по 2015 г., проводились с целью повышения эффективности процесса извлечения в магнитном поле специальных поверхностно-модифицированных катализаторов (используемых, в том числе, в процессах гидрирования) на основе наноматериалов и их повторного использования.

Одним из перспективных направлений исследований явились представления происходящего технологического процесса очистки исходного материала от примесей методом ВГМС в виде формализованных математических моделей, которые в большинстве случаев записывались обыкновенными дифференциальными уравнениями или их системами [14-16], а в некоторых случаях, как, например, в [16], – системой уравнений в частных производных. Так в работе [14] представлена математическая модель процесса извлечения

в высокоградиентном магнитном поле катализаторов платиновой группы, проведен анализ уравнений системы, описывающих вышеуказанный технологический процесс, и построено решение данной системы.

Следует отметить, что не всегда представляется возможным найти аналитическое представление решения системы дифференциальных уравнений в явном или неявном виде, поэтому для ее решения прибегают к приближенным численным методам с использованием известных пакетов математических программ. Наглядным примером этому может служить работа [15], в которой очистка семенного материала производилась с помощью воздушно магнитного сепаратора, а сам процесс движений семян в разделенной смеси записывался квазилинейной системой четырех дифференциальных уравнений. Полученную систему решали численным методом Рунге-Кутты, используя пакет математических программ MathCad.

В нашей работе при построении математической модели по результатам исследований очистки саломаса методом ВГМС мы в какой-то степени воспользовались известными методами химической кинетики, изучающей скорости и механизмы химических превращений [17]. В последнее время эти методы все чаще используются при решении одной из основных задач современного промышленного производства – получение конечного продукта с наперед заданными свойствами и минимальными затратами материальных, энергетических и трудовых ресурсов. В качестве частичного ознакомления приведем лишь несколько работ, по которым можем судить о степени сложности составления систем кинетических уравнений (дифференциальных уравнений), различных известных и новых методов их решения, а также разнообразия областей их применения [18-20].

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

По результатам исследований, выполненных ранее [1], был разработан и опробован технологический узел магнитной очистки гидрированных жиров (саломаса) от никельсодержащего катализатора типа НМ-3 и ВНИИЖ-1, а также получен патент Республики Беларусь на способ очистки саломаса от суспендированного катализатора [21]. Объемная производительность технологического узла составила 0,2 м³/ч, а извлечение из саломаса никельсодержащего катализатора (Ni)

находилось в диапазоне от 67% до 83%. В процессе эксперимента также было установлено, что при напряженности магнитного поля не менее 600 кА/м и градиенте магнитного поля не менее $(20-30) \cdot 10^4$ кА/м² содержание в саломасе никельсодержащего катализатора со средней удельной магнитной восприимчивостью $(47-71) \cdot 10^{-6}$ м³/кг имеет обратно пропорциональную зависимость от напряженности магнитного поля (H), высоты (длины) зоны фильтрации (h) и скорости фильтрации (v). Кроме того, по эмпирическим данным построены нелинейные регрессионные зависимости результативного признака (Ni) относительно одного из выше перечисленных факторов при условии, что два другие принимают некоторые наперед заданные постоянные значения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Всесторонний анализ эмпирических зависимостей по каждому факторному признаку в отдельности, а также построение по каждому из них классических типов одномерных нелинейных регрессионных моделей, показал, что во всех случаях наиболее подходящими и статистически достоверными являются модели экспоненциального типа. В этой связи нами было принято решение изучать содержание в саломасе никельсодержащего катализатора в комплексной зависимости от скорости и высоты рабочей зоны фильтрации.

По результатам обработки эмпирических данных при напряженности магнитного поля 600 кА/м и первоначальном содержании Ni в исходном продукте 15000 мг/кг нами была построена двумерная экспоненциальная зависимость содержания Ni (результативного признака Y) от двух факторных признаков: скорости фильтрации (X_1) и высоты рабочей зоны фильтрации (X_2) [3]. Уравнение нелинейной регрессии имеет вид

$$Y = A \cdot \exp(-\alpha X_1 - \beta X_2), \quad (1)$$

где $A = 1881,8 \pm 3,1$, $\alpha = 0,575 \pm 0,32$, $\beta = 0,0084 \pm 0,004$.

При уровне значимости 0,05 корреляционное отношение $\eta = 0,88$, что свидетельствует о вполне хорошем качестве соответствия теоретических значений ($Y_{теор}$) регрессионной модели (1) наблюдаемым (эмпирическим) значениям ($Y_{набл}$). Численные значения факторных и результативного (наблюдаемые и теоретические) признаков представлены в таблице.

Построенная многомерная нелинейная регрессионная модель для случая, когда напряженность магнитного поля равна 600 кА/м, а содержа-

ние Ni в исходном продукте составляет 15000 мг/кг, дает возможность сделать прогноз зависимости содержания никельсодержащего катализатора от установленной скорости фильтрации в пределах $2,7 \cdot 10^{-3} \leq v \leq 3,3 \cdot 10^{-3}$ м/с и высоте (длине) рабочей зоны фильтрации $15 \cdot 10^{-2} \leq h \leq 60 \cdot 10^{-2}$ м. Так, например, для срединных значений скорости фильтрации $\bar{X}_1 = 2,95 \cdot 10^{-3}$ м/с и высоте рабочей зоны фильтрации $\bar{X}_2 = 37,5 \cdot 10^{-2}$ м содержание никельсодержащего катализатора в результате очистки прогнозируется быть равным порядка 252 мг/кг.

Таблица

Результаты обработки технологических режимов по очистке саломаса методом ВГМС
Table. The results of processing technological modes for cleaning salomas by the VGMS method

$X_1, v \cdot 10^{-3}$ м/с	$X_2, h \cdot 10^{-2}$ м	$Y_{набл},$ МГ/КГ	$Y_{теор},$ МГ/КГ
3,3	15	250	249
3	30	255	261
2,8	45	264	258
2,7	60	240	241

При построении многомерной регрессии третий фактор – напряженность магнитного поля – мы не учитывали из-за малого количества опытных данных. Наши исследования показали, что зависимость содержания Ni в очищенном саломасе от напряженности магнитного поля при высоте зоны фильтрации $h = 0,15$ м и скорости фильтрации $v = 3 \cdot 10^{-3}$ м/с можно условно разделить на несколько ступеней (этапов): 1) ступень быстрой очистки (от 0 до 400 кА/м); 2) ступень средней очистки (от 400 до 600 кА/м); 3) ступень медленной очистки (от 600 до 1200 кА/м); 4) ступень ничтожно малой очистки (свыше 1200 кА/м), которой можно пренебречь. В этой связи мы выдвинули гипотезу, что изменение концентрации C_i никельсодержащего катализатора в магнитном поле на каждом из указанных выше этапов протекает по экспоненциальному закону и может быть записано в виде кусочно-аналитической функции

$$C = \begin{cases} C_1^0 e^{-k_1 H}, & 0 \leq H \leq 400, \\ C_2^0 e^{-k_2 H}, & 400 \leq H \leq 600, \\ C_3^0 e^{-k_3 H}, & 600 \leq H \leq 1200, \end{cases} \quad (2)$$

где C_i^0 ($i = 1,2,3$) – концентрация Ni в начальной фазе i -й ступени очистки, $k_i > 0$ – константа скорости очистки (изменения концентрации) Ni на i -м этапе, H – напряженность магнитного поля.

Поэтому скорость очистки Ni в саломасе можно описать совокупностью трех дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dC_1}{dH} = -k_1 C_1, & 0 \leq H \leq 400, \\ \frac{dC_2}{dH} = -k_2 C_2, & 400 \leq H \leq 600, \\ \frac{dC_3}{dH} = -k_3 C_3, & 600 \leq H \leq 1200, \end{cases} \quad (3)$$

где dC_i/dH ($i = 1, 2, 3$) – скорость изменения концентрации Ni , C_i – количество Ni в саломасе на i -м этапе очистки. Интегрируя дифференциальные уравнения (3), получим изменение концентрации Ni в продукте как функцию от напряженности магнитного поля (2). В нашем случае эта функция имеет вид

$$C = \begin{cases} 15000 e^{-0,0027 H}, & 0 \leq H \leq 400, \\ 1056318 e^{-0,0134 H}, & 400 \leq H \leq 600, \\ 732 e^{-0,0011 H}, & 600 \leq H \leq 1200. \end{cases}$$

Таким образом, при высоте рабочей зоны и скорости фильтрации порядка $h = 0,15$ м и $v = 3 \cdot 10^{-3}$ м/с, соответственно, мы можем прогнозировать степень очистки саломаса от суспендированного катализатора в зависимости от конкретной напряженности магнитного поля, равной H . Например, при напряженности $H = 550$ кА/м концентрация Ni в результате очистки ожидается быть равной

$$C = 1056318 e^{-0,0134 \cdot 550} = 655 \text{ мг/кг}$$

а при $H = 650$ кА/м – $C = 732 e^{-0,0011 \cdot 650} = 358$ мг/кг.

Поскольку аналитические составляющие функции (2) в свою очередь являются строго убывающими функциями, то для каждой из них существуют обратные к ним функции. Поэтому, разрешая уравнение $C = C_i^0 e^{-k_i H}$ относительно переменной H и воспользовавшись свойством логарифма частного, в результате найдем выражение для напряженности магнитного поля, как функции переменной C :

$$H = \frac{1}{k_i} \ln \frac{C_i^0}{C}. \quad (4)$$

ЛИТЕРАТУРА

1. **Тыртыгин В.Н.** Повышение качества сельскохозяйственного сырья и сточных вод магнитными и сорбционными методами. Саратов: Наука. 2019. 203 с.
2. **Тыртыгин В.Н.** Очистка гидрированных жиров в высокоградиентном магнитном поле от никельсодержащего катализатора. *Хим. технология*. 2006. № 8. С. 33-35.
3. **Lindley J.** The use of magnetic techniques in the development of a hydrogenation process. *IEEE Transact. on Magnetics*. 1982. V. 18. N 3. P. 836-840. DOI: 10.1109/TMAG.1982.1061920.
4. **Ushio M., Morita T., Ishii T.** Process for fluid catalytic cracking of distillation residual oils. Pat. 4359379 USA. 1982.
5. **Yavuz C.T.** Magnetic separations: from steel plants to biotechnology. *Chem. Eng. Sci.* 2009. V. 64. N 10. P. 2510-2521. DOI: 10.1016/j.ces.2008.11.018.

Таким образом, по формуле (4) мы можем определять напряженность магнитного поля, при которой концентрация Ni в результате очистки достигнет наперед заданного значения C . Последнее (в особенности) является полезным при принятии решений, руководствуясь допустимыми нормами ГОСТ по содержанию Ni в продукте. Предположим, например, что мы хотим определить напряженность магнитного поля, при которой концентрация Ni в результате опыта будет численно равна 350 мг/кг. Поскольку в начале 3-го этапа очистки концентрация $C(400) = 732 e^{-0,0011 \cdot 400} = 471$ мг/кг, то искомая величина определяется из равенства

$$H = \frac{1}{k_3} \ln \frac{C_3^0}{C} = \frac{1}{0,0011} \ln \frac{732}{350} = 670 \text{ кА/м.}$$

Это значит, что для очистки продукта до уровня концентрации Ni , равной 350 мг/кг, при высоте зоны $h = 0,15$ м и скорости фильтрации $v = 3 \cdot 10^{-3}$ м/с, соответственно, необходимо, чтобы напряженность магнитного поля в технологическом узле составляла порядка 670 кА/м.

ВЫВОДЫ

Построена двумерная экспоненциальная регрессионная модель содержания в саломасе никельсодержащего катализатора в комплексной зависимости от скорости и высоты рабочей зоны фильтрации. По данным эксперимента составлена математико-статистическая модель изменения концентрации никельсодержащего катализатора в зависимости от напряженности магнитного поля. Используя полученные зависимости, мы можем прогнозировать степень очистки саломаса от суспендированного катализатора в зависимости от конкретной напряженности магнитного поля и определять напряженность магнитного поля, при которой концентрация никеля в результате очистки достигнет наперед заданное значение.

REFERENCES

1. **Tyrtugin V.N.** Improving the quality of agricultural raw materials and wastewater by magnetic and sorption methods. Saratov: Nauka. 2019. 203 p. (in Russian).
2. **Tyrtugin V.N.** Purification of hydrogenated fats in a high-gradient magnetic field from a nickel-containing catalyst. *Khim. Tekhnol.* 2006. N 8. P. 33-35 (in Russian).
3. **Lindley J.** The use of magnetic techniques in the development of a hydrogenation process. *IEEE Transact. on Magnetics*. 1982. V. 18. N 3. P. 836-840. DOI: 10.1109/TMAG.1982.1061920.
4. **Ushio M., Morita T., Ishii T.** Process for fluid catalytic cracking of distillation residual oils. Pat. 4359379 USA. 1982.
5. **Yavuz C.T.** Magnetic separations: from steel plants to biotechnology. *Chem. Eng. Sci.* 2009. V. 64. N 10. P. 2510-2521. DOI: 10.1016/j.ces.2008.11.018.

6. **Rossi L.M., Garcia M.A.S., Vono L.L.R.** Recent advances in the development of magnetically recoverable metal nanoparticle catalysts. *J. Brazil. Chem. Soc.* 2012. V. 23. N 11. P. 1959-1971. DOI: 10.1590/S0103-50532012001100002.
7. **Baig R.B.N., Varma R.S.** Magnetically retrievable catalysts for organic synthesis. *Chem. Commun.* 2013. V. 49. N 8. P. 752-770. DOI: 10.1039/C2CC35663E.
8. **Baig R.B.N., Nadagouda M.N., Varma R.S.** Magnetically retrievable catalysts for asymmetric synthesis. *Coord. Chem. Rev.* 2015. V. 287. P. 137-156. DOI: 10.1016/j.ccr.2014.12.017.
9. **Mrówczyński R., Nan A., Liebscher J.** Magnetic nanoparticle-supported organocatalysts—an efficient way of recycling and reuse. *Rsc. Adv.* 2014. V. 4. N 12. P. 5927-5952. DOI: 10.1039/C3RA46984K.
10. **Karimi B.** Highly Efficient Aerobic Oxidation of Alcohols Using a Recoverable Catalyst: The Role of Mesoporous Channels of SBA-15 in Stabilizing Palladium Nanoparticles. *Angew. Chem. Internat. Ed.* 2006. V. 45. N 29. P. 4776-4779. DOI: 10.1002/anie.200504359.
11. **Shylesh S., Schünemann V., Thiel W.R.** Magnetically separable nanocatalysts: bridges between homogeneous and heterogeneous catalysis. *Angew. Chem. Internat. Ed.* 2010. V. 49. N 20. P. 3428-3459. DOI: 10.1002/anie.200905684.
12. **Iranmanesh M., Hulliger J.** Magnetic separation: its application in mining, waste purification, medicine, biochemistry and chemistry. *Chem. Soc. Rev.* 2017. V. 46. N 19. P. 5925-5934. DOI: 10.1039/C7CS00230K.
13. **Shylesh S., Schünemann V., Thiel W.R.** Magnetically separable nanocatalysts: bridges between homogeneous and heterogeneous catalysis. *Angew. Chem. Internat. Ed.* 2010. V. 49. N 20. P. 3428-3459. DOI: 10.1002/anie.200905684.
14. **Gerber R., Watmough M.** Magnetic separator equations. *IEEE Transact. on Magnetism.* 1982. V. 18. N 6. P. 1671-1673. DOI: 10.1109/TMAG.1982.1062146.
15. **Kozlova E.V., Skrypnikov A.V., Kozlov V.G.** Air magnetic separator for the preparation of forestry seed material and its theoretical justification. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. and Eng.* 2018. N 560. P. 6. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012070.
16. **Ciesla A.** Application of superconducting magnets to magnetic separation some selected aspects. *Magn. Elect. Sep.* 1991. V. 3. P. 219-240.
17. **Буданов В.В., Ломова Т.Н., Рыбкин В.В.** Химическая кинетика. СПб.: Изд-во «Лань». 2008. 288 с.
18. **Невиницын В.Ю.** Системный анализ химического реактора как объекта управления. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2017. Т. 60. Вып. 9. С. 92-99. DOI: 10.6060/tcct2017609.5587.
19. **Убодоев В.В.** Дифференциальные уравнения кинетики некоторых химических реакций. *Вестн. Бурят. Гос. ун-та. Математика, информатика.* 2016. № 3. С. 64-71. DOI: 10.18101/2304-5728-2016-3-64-71.
20. **Липатов А.М., Болкисев А.А.** О решении систем уравнений химической кинетики явными методами. *Сибир. журн. индустр. математики.* 2014. Т. 17. № 2. С. 74-86.
21. **Денисковец, А.А., Тыртыгин В.Н.** Многомерная нелинейная регрессионная модель очистки саломаса от суспензированного катализатора в магнитном поле. *Сб. науч. ст. по матер. XXII Междунар. науч.-практ. конф. Современные технологии сельскохозяйственного производства.* Гродно: ГГАУ. 2019. С. 30-31.
6. **Rossi L.M., Garcia M.A.S., Vono L.L.R.** Recent advances in the development of magnetically recoverable metal nanoparticle catalysts. *J. Brazil. Chem. Soc.* 2012. V. 23. N 11. P. 1959-1971. DOI: 10.1590/S0103-50532012001100002.
7. **Baig R.B.N., Varma R.S.** Magnetically retrievable catalysts for organic synthesis. *Chem. Commun.* 2013. V. 49. N 8. P. 752-770. DOI: 10.1039/C2CC35663E.
8. **Baig R.B.N., Nadagouda M.N., Varma R.S.** Magnetically retrievable catalysts for asymmetric synthesis. *Coord. Chem. Rev.* 2015. V. 287. P. 137-156. DOI: 10.1016/j.ccr.2014.12.017.
9. **Mrówczyński R., Nan A., Liebscher J.** Magnetic nanoparticle-supported organocatalysts—an efficient way of recycling and reuse. *Rsc. Adv.* 2014. V. 4. N 12. P. 5927-5952. DOI: 10.1039/C3RA46984K.
10. **Karimi B.** Highly Efficient Aerobic Oxidation of Alcohols Using a Recoverable Catalyst: The Role of Mesoporous Channels of SBA-15 in Stabilizing Palladium Nanoparticles. *Angew. Chem. Internat. Ed.* 2006. V. 45. N 29. P. 4776-4779. DOI: 10.1002/anie.200504359.
11. **Shylesh S., Schünemann V., Thiel W.R.** Magnetically separable nanocatalysts: bridges between homogeneous and heterogeneous catalysis. *Angew. Chem. Internat. Ed.* 2010. V. 49. N 20. P. 3428-3459. DOI: 10.1002/anie.200905684.
12. **Iranmanesh M., Hulliger J.** Magnetic separation: its application in mining, waste purification, medicine, biochemistry and chemistry. *Chem. Soc. Rev.* 2017. V. 46. N 19. P. 5925-5934. DOI: 10.1039/C7CS00230K.
13. **Shylesh S., Schünemann V., Thiel W.R.** Magnetically separable nanocatalysts: bridges between homogeneous and heterogeneous catalysis. *Angew. Chem. Internat. Ed.* 2010. V. 49. N 20. P. 3428-3459. DOI: 10.1002/anie.200905684.
14. **Gerber R., Watmough M.** Magnetic separator equations. *IEEE Transact. on Magnetism.* 1982. V. 18. N 6. P. 1671-1673. DOI: 10.1109/TMAG.1982.1062146.
15. **Kozlova E.V., Skrypnikov A.V., Kozlov V.G.** Air magnetic separator for the preparation of forestry seed material and its theoretical justification. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. and Eng.* 2018. N 560. P. 6. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012070.
16. **Ciesla A.** Application of superconducting magnets to magnetic separation some selected aspects. *Magn. Elect. Sep.* 1991. V. 3. P. 219-240.
17. **Budanov V.V., Lomova T.N., Rybkin V.V.** Chemical kinetics. SPb.: Izd-vo "Lan". 2008. 288 p. (in Russian).
18. **Nevinityn V.Yu.** System analysis of chemical reactor as control object. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2017. V. 60. N 9. P. 92-99. DOI: 10.6060/tcct.2017609.5587.
19. **Ubodoev V.V.** Differential equations of the kinetics of some chemical reactions. *Vestn. Buryat. Gos. Un-ta. Matematika, Informatika.* 2016. N 3. P. 64-71 (in Russian).
20. **Lipatov A.M., Bolkisev A.A.** On the solution of systems of equations of chemical kinetics by explicit methods. *Sibir. Zhurn. Indust. Matem.* 2014. V. 17. N. 2. P. 74-86 (in Russian).
21. **Denisovets, A.A., Tyrtygin V.N.** Multivariate nonlinear regression model clean from hydrogenated fats suspension of the catalyst in a magnetic field. *Coll. of sci. art. based on the mater. of the XXII Internat. Sci. and Pract. Conf. Modern technologies of agricultural production: Grodno: GSAU.* 2019. P. 30-31 (in Belarus).

Поступила в редакцию (Received) 18.02.2021

Принята к опубликованию (Accepted) 30.03.2021