

## Многофакторное параметрическое моделирование процесса экстракции кверцетина из листьев ивы *Salix* семейства *Salicaceae*

Д.Б. Просвирников<sup>a</sup>, Р.Г. Сафин<sup>b</sup>, Г.Р. Арсланова<sup>c</sup>

Казанский национальный исследовательский технологический университет,  
ул. Карла Маркса, 68, Казань, Республика Татарстан

<sup>a</sup> prosvirnikov\_dmi@mail.ru, <sup>b</sup> safin@kstu.ru, <sup>c</sup> 94arslanovagulshat@mail.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6736-8788>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-5790-4532>,

<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6032-7502>

Статья поступила 27.08.2021, принята 14.09.2021

*В статье приведены результаты параметрического многофакторного моделирования процесса экстракции кверцетина из растительного сырья, а именно из листьев ивы Salix семейства Salicaceae. Описаны методики проведения экспериментальных исследований и идентификации кверцетина при помощи тонкослойной хроматографии. Представлена математическая обработка экспериментальных данных по выходу целевых компонентов, проводившаяся в соответствии с методикой параметрической идентификации статистических моделей многофакторных экспериментов в программной среде CurveExpert 1.4 с использованием частных форм биотехнического закона. Данная методика используется для обработки экспериментальных данных с получением математических выражений в экспоненциальной и показательной форме (реже — в линейной), законы которых имеют физический смысл, в отличие от полиномиальных моделей, полученных в результате регрессионного анализа. Составлена трехфакторная статистическая модель влияния концентрации экстрагента, продолжительности и температуры экстракции на выход кверцетина. Результаты моделирования показали эффективность применения метода параметрической идентификации, позволяющего получать модели зависимости выходных величин от множества факторов, при этом модели имеют низкую относительную погрешность и записаны с использованием математических конструктов, имеющих физический смысл. Было определено, что наибольшую степень влияния на процесс выхода кверцетина оказывает концентрация экстрагента, затем температура процесса и, в последнюю очередь, продолжительность экстракции. Итоговые погрешности по многофакторным моделям выхода кверцетина составляют: абсолютная погрешность модели 0,02 % а.с.в., относительная погрешность модели 3,26 %. Повышенная относительная погрешность, очевидно, связана со сложностью методов количественной оценки флавоноидов из растительного сырья, в частности кверцетина.*

**Ключевые слова:** экстракция; растительное сырье; параметрическое моделирование; биологически активные вещества; кверцетин.

## Multivariate parametric modeling of the extraction process of quercetin from the leaves of willow *Salix*, family *Salicaceae* genus

D.B. Prosvirnikov<sup>a</sup>, R.G. Safin<sup>b</sup>, G.R. Arslanova<sup>c</sup>

Kazan National Research Technological University; 68, Karl Marx St., Kazan, Russia

<sup>a</sup> prosvirnikov\_dmi@mail.ru, <sup>b</sup> safin@kstu.ru, <sup>c</sup> 94arslanovagulshat@mail.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6736-8788>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-5790-4532>,

<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6032-7502>

Received 27.08.2021, accepted 14.09.2021

*This article presents the results of parametric multivariate modeling of the extraction process of quercetin from plant materials, namely, from the leaves of willow Salix, family Salicaceae Genus. The experimental research methodology and the quercetin identification method using thin layer chromatography (TLC) are described. The paper presents mathematical processing of experimental data on the yield of target components, carried out in accordance with the method of parametric identification of statistical models of multi-factor experiments in the CurveExpert 1.4 software environment using particular forms of the biotechnical law. This technique is used to process experimental data with obtaining mathematical expressions in exponential and exponential form (less often in linear form), the laws of which have a physical meaning, in contrast to polynomial models obtained as a result of regression analysis. A three-factor statistical model of the influence of the concentration of the extractant, the duration and temperature of extraction on the yield of quercetin has been compiled. The simulation results have shown the effectiveness of the parametric identification method, which makes it possible to obtain models of the dependence of the output quantities on a variety of factors, while the models have a low relative error, and are written using mathematical constructs that have physical meaning. It is determined that the concentration of the extractant has the greatest influence on the quercetin yield process, then the process temperature and, last of all, the duration of the extraction. The final errors for multivariate models of quercetin yield are: the absolute error of the model is 0.02% d.m., the relative error of the model is 3.26%. The increased relative error is obviously associated with the complexity of methods for the quantitative assessment of flavonoids from plant materials, in particular quercetin.*

**Keywords:** extraction; plant raw materials; parametric modeling; biologically active substances; quercetin.

**Введение.** Процессы экстракции широко распространены в лесохимической, пищевой и фармацевтической (в том числе косметической) промышленности [1; 2]. Основной целью процессов экстракции является извлечение ценных компонентов, как правило, из растительного сырья [3]. Так в лесохимической промышленности с помощью процессов экстракции из древесного сырья и отходов лесозаготовки (сучья, зелень, кора) извлекаются смолы [4], фенольные соединения [5], дубильные вещества [6], биологически-активные вещества, например, бетулин [7], кверцетин [8]. В пищевой промышленности целевые компоненты из растительного сырья, такие как флавоноиды, фенолгликозиды, органические кислоты и др. применяются в приготовлении пищевых и кормовых добавок [9]. Это также тесно связано и с фармацевтической промышленностью, в которой подобные вещества должны использоваться в чистом виде для приготовления лекарственных средств [10; 11].

Сложность процессов экстракции заключается в правильном подборе технологических факторов на производствах, к основным из которых относятся: вид экстрагента (растворителя), его концентрация в водном растворе, температура и давление процесса экстракции, продолжительность, соотношение объемов материала и экстрагента (гидро модуль), размер частиц, физико-химические свойства исходного сырья, технологическая организация самого процесса экстракции (непрерывная, периодическая, перколяционная, в паровой фазе и т. д.) и мн. др.

Эти факторы должны обеспечивать максимальные выходы целевых веществ при минимальных энергетических и материальных затратах на производство.

Добиться таких результатов возможно лишь в случае полного контролирования и моделирования процесса, которые обеспечиваются знанием того, как те или иные факторы или их совокупность влияют на выходную величину (как правило, на выход целевых продуктов).

Многие исследователи используют попытки моделирования процессов экстракции (влияния факторов на выходную величину). Как правило, математические модели организовываются методами полнофакторного моделирования [12] или другими дисперсионными анализами экспериментальных данных, например, ANOVA [13]. Получаемые регрессионные математические модели зависимости выходной величины (например, выхода целевого вещества) от влияющих факторов (например, температура, концентрация растворителя) оформляются, как правило, в виде линейных усредненных моделей или полиномиальных выражений [14] и работают в определенных пределах факторов. По таким моделям невозможно оценить характер влияния факторов на выходную величину, а также истинный физический смысл данных уравнений. Это делает применимость таких моделей в узком ограниченном диапазоне изучаемых факторов.

Все физические процессы, наблюдаемые в промышленном производстве, имеют свой определенный характер. Например, выход целевых веществ при экс-

трагировании всегда будет увеличиваться до постоянного значения (физический рост процесса, который может быть описан экспоненциальным или степенным уравнением), или температура системы при отсутствии подвода тепла будет снижаться (физическая гибель процесса, которая также может быть описана с использованием экспоненциальных уравнений). Процессы экстракции не являются исключением в данном отношении. Более того, среди данных процессов наблюдаются и такие, которые сначала сопровождаются ростом, а затем гибелью, т. е. в начале процесса большую роль играет фактор, провоцирующий рост, а затем в процесс включается ингибирующий фактор.

Чтобы получить математические модели, адекватно описывающие физический смысл процесса, в котором участвует множество факторов, в работе предлагается метод параметрической идентификации многофакторных зависимостей, успешно зарекомендовавший себя во многих прикладных и исследовательских работах [15]. Применение данного метода описания физических процессов позволяет оптимизировать и контролировать технологические процессы на предприятиях лесохимической, пищевой и фармацевтической (в том числе косметической) промышленности.

В основе метода лежит статистическая оценка влияния каждого фактора процесса по отдельности на выходную величину с последующим ранжированием факторов по значимости. Наиболее значимый фактор влияет на менее значимый и т. д. Уравнения зависимости влияния факторов на выходную величину и коэффициентов, входящих в нее, идентифицируются путем определения характера зависимости (рост, гибель процесса или их совокупность), полученной на основе экспериментальных измерений. Причем идентификация проводится до тех пор, пока коэффициент корреляции не получится максимальным для данной модели. Идентификация производится в программном обеспечении CurveExpert 1.4 с использованием частных форм биотехнического закона [16]. Для каждой полученной модели однофакторной зависимости определяются статистические отклонения. После ранжирования факторов по значимости определяются зависимости статистических отклонений от наиболее значимых факторов с получением параметрических моделей. Такой подход позволяет учесть влияние более значимого фактора на менее значимый. После идентификации параметрических моделей производится сборка итогового уравнения, описывающего влияние всех факторов на выходную величину. По полученному уравнению однозначно можно сделать вывод о характере протекания процесса при изменении тех или иных факторов. Оценка адекватности получаемых моделей проводится путем сравнения расчетных значений выходной величины и экспериментальных значений с вычислением средних абсолютных и относительных отклонений.

**Объекты и методы экспериментальных исследований.** В настоящем исследовании использовались данные, полученные при экстракции биологически-активных веществ, а именно кверцетина, из листьев ивы *Salix* семейства *Salicaceae*. Выходная величина для параметриче-

ской идентификации статистической модели — выход кверцетина (% а.с.в.); влияющие факторы: концентрация экстрагента  $C_p$  (спирт этиловый) — 40; 60; 80 % в водном растворе; продолжительность экстракции  $\tau$  — 15; 30; 45 мин; температура экстрагента  $t_p$  — 25; 50; 75 °C.

Объектами исследования являются листья ивы *Salix* семейства *Salicaceae*, собранные в Республике Татарстан в период май-июнь 2020 г. Сушку сырья производили на воздухе, в тени и в хорошо проветриваемых помещениях. Для исследования использовали измельченное воздушно-сухое сырье, проходящее сквозь сито с диаметром отверстий 2 мм. Извлечение общего количества флавоноидов (в т. ч. кверцетина) проводили на установке для перколяционной экстракции [17] при технологических режимах, описанных выше. Соотношение «сырье – экстрагент» составляло 1:50. Идентификация флавоноидов проводилась по цианидиновой пробе [18]. После центрифугирования разделение смеси флавоноидов с определением кверцетина проводили методом ТСХ в спиртовых извлечениях в системе рас-

творителей n-бутанол — уксусная кислота ледяная — вода (4:1:2) на хроматографических пластинках «Sorbfil» с УФ детекцией. С извлечениями на пластинку наносили стандартный образец кверцетина фирмы Aldrich. Идентификацию пятен проводили, обрабатывая хроматограммы алюминия хлорида спиртовым раствором 5 %, а также выдерживая над парами аммиака. После идентификации кверцетина пластинки сканировали при помощи планшетного сканера HP Scanjet 3670 и осуществляли их цифровую обработку с помощью компьютерной программы «Визуализатор Sorbfil» (Краснодар), реализующей метод денситометрической визуализации [19] с получением спектров. Количественное определение кверцетина проводили методом абсолютной калибровки (внешнего стандарта) по градуировочному графику зависимости «масса вещества – площадь пика» (линейная аппроксимация) [20; 21].

**Результаты и обсуждение.** Для удобства моделирования и параметрической идентификации выхода кверцетина данные сведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Данные для моделирования и параметрической идентификации выхода кверцетина из листьев ивы

$C_p$ , %	$\tau$ , мин	$t_p$ , °C	$C_{кв}$ , % а.с.в.	$C_p$ , %	$\tau$ , мин	$t_p$ , °C	$C_{кв}$ , % а.с.в.
40	15	25	0.33	60	30	75	0.99
40	15	50	0.46	60	45	25	0.71
40	15	75	0.61	60	45	50	0.9
40	30	25	0.49	60	45	75	0.82
40	30	50	0.62	80	15	25	0.73
40	30	75	0.81	80	15	50	0.82
40	45	25	0.61	80	15	75	0.81
40	45	50	0.8	80	30	25	0.82
40	45	75	0.84	80	30	50	0.9
60	15	25	0.44	80	30	75	0.64
60	15	50	0.67	80	45	25	0.91
60	15	75	0.79	80	45	50	0.85
60	30	25	0.6	80	45	75	0.57
60	30	50	1.12	60	30	75	0.99

Для установления трехфакторной статистической модели (влияние концентрации экстрагента, продолжительности экстракции, температуры экстракции на выход кверцетина) необходимо выявить однофакторные зависимости.

Определим характер влияния концентрации экстрагента на выход кверцетина. Подбираем модель, определяем коэффициенты статистической модели путем идентификации:

User-Defined Model:  $y = a \cdot x^b \cdot \exp(-c \cdot x)$

Coefficient Data:

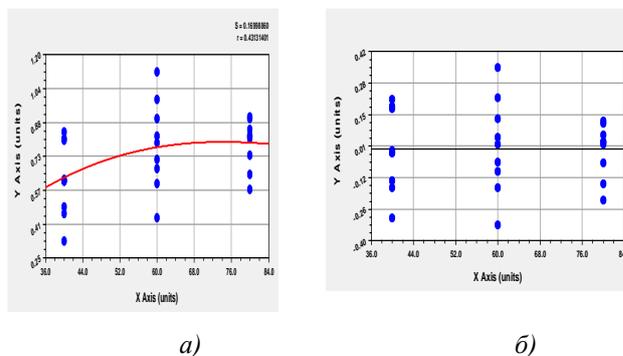
$a = 5.62275351892E-003$   
 $b = 1.49654686522E+000$   
 $c = 2.01721495518E-002$

Коэффициент корреляции для данной модели составляет 0,4313.

Выражение, описывающее влияние концентрации экстрагента на выход кверцетина:

$$C_{кв} = 0.00562C_p^{1.496} \exp(-x p 9656C_p) \quad (1)$$

На рис. 1 представлена модель (1) (а) и отклонения (б).



**Рис. 1.** Идентификация статистической модели, описывающей влияние концентрации экстрагента на выход кверцетина

Определим характер влияния продолжительности экстракции на выход кверцетина. Подбираем модель,

определяем коэффициенты статистической модели путем идентификации:

$$\text{User-Defined Model: } y = a * x^b * \exp(-c * x)$$

Coefficient Data:

$$\begin{aligned} a &= 1.18473251297\text{E}-001 \\ b &= 7.23712673525\text{E}-001 \\ c &= 1.93721951872\text{E}-002 \end{aligned}$$

Коэффициент корреляции для данной модели составляет 0,3951.

Выражение, описывающее влияние продолжительности экстракции на выход кверцетина

$$C_{\text{кв}} = 0.1184\tau^{0.723} \exp(-0.0193\tau) \quad (2)$$

На рис. 2 представлена модель (2) (а) и отклонения (б).

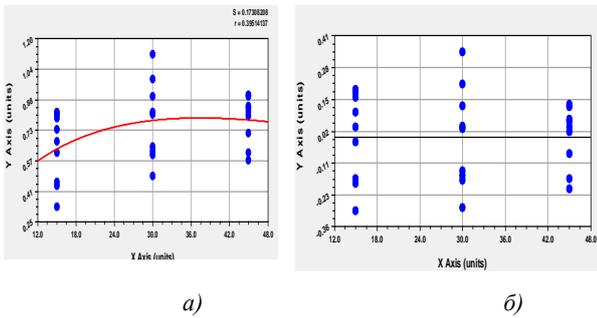


Рис. 2. Идентификация статистической модели, описывающей влияние продолжительности экстракции на выход кверцетина

Далее определим характер влияния температуры экстракции на выход кверцетина. Подбираем модель, определяем коэффициенты статистической модели путем идентификации:

$$\text{User-Defined Model: } y = a * x^b * \exp(-c * x)$$

Coefficient Data:

$$\begin{aligned} a &= 4.50799402508\text{E}-002 \\ b &= 9.48696012206\text{E}-001 \\ c &= 1.68702902156\text{E}-002 \end{aligned}$$

Таблица 2. Абсолютные отклонения для однофакторных статистических моделей

$C_p, \%$	$C_{\text{кв}}, \%$ а.с.в.	$\varepsilon, \%$ а.с.в.	$\tau, \text{мин}$	$C_{\text{кв}}, \%$ а.с.в.	$\varepsilon, \%$ а.с.в.	$t_p, \text{°C}$	$C_{\text{кв}}, \%$ а.с.в.	$\varepsilon, \%$ а.с.в.
40	0.33	-0.296	15	0.33	-0.298	25	0.33	-0.296
40	0.46	-0.166	15	0.46	-0.168	50	0.46	-0.333
40	0.61	-0.016	15	0.61	-0.0188	75	0.61	-0.1544
40	0.49	-0.136	30	0.49	-0.286	25	0.49	-0.136
40	0.62	-0.006	30	0.62	-0.156	50	0.62	-0.173
40	0.81	0.183	30	0.81	0.0333	75	0.81	0.045
40	0.61	-0.0167	45	0.61	-0.168	25	0.61	-0.0166
40	0.8	0.173	45	0.8	0.021	50	0.8	0.0066
40	0.84	0.213	45	0.84	0.0611	75	0.84	0.0755
60	0.44	-0.328	15	0.44	-0.188	25	0.44	-0.1866
60	0.67	-0.098	15	0.67	0.0411	50	0.67	-0.123
60	0.79	0.0219	15	0.79	0.1611	75	0.79	0.0255
60	0.6	-0.168	30	0.6	-0.176	25	0.6	-0.026
60	1.12	0.3519	30	1.12	0.3433	50	1.12	0.326
60	0.99	0.2219	30	0.99	0.213	75	0.99	0.2255
60	0.71	-0.058	45	0.71	-0.068	25	0.71	0.083
60	0.9	0.131	45	0.9	0.121	50	0.9	0.106

Коэффициент корреляции для данной модели составляет 0,4093.

Выражение, описывающее влияние температуры экстракции на выход кверцетина:

$$C_{\text{кв}} = 0.045t_p^{0.948} \exp(-0.0168t_p) \quad (3)$$

На рис. 3 представлена модель (3) (а) и отклонения (б).

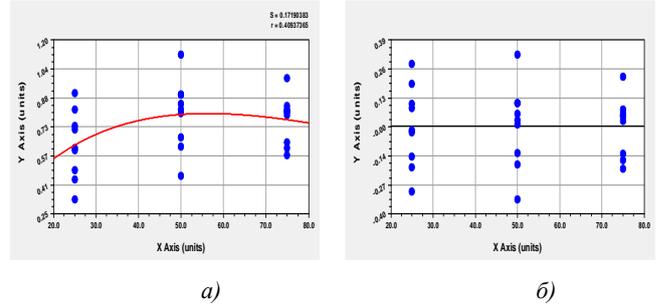


Рис. 3. Идентификация статистической модели, описывающей влияние температуры экстракции на выход кверцетина

Для удобства дальнейшей идентификации обобщенной статистической модели для каждого фактора были определены значения абсолютных отклонений. В табл. 2 представлены абсолютные отклонения по моделям (1), (2), (3).

Для оценки значимости однофакторных зависимостей ранжируем модели по коэффициенту корреляции по возрастанию:

- 1) продолжительность экстракции на выход кверцетина (модель 2) — 0.3951;
- 2) температура экстракции на выход кверцетина (модель 3) — 0.4093;
- 3) концентрация экстрагента на выход кверцетина (модель 1) — 0.4313.

Поскольку модель (2) имеет наименьший порядок ранжирования, оценим вклад в общую модель температуры экстракции  $t_p$ . Для этого построим зависимость вида  $\varepsilon_\tau = f(t_p)$ , где  $\varepsilon_\tau$  — отклонения по модели (2).

$C_p, \%$	$C_{KB}, \%$ а.с.в.	$\varepsilon, \%$ а.с.в.	$\tau, \text{мин}$	$C_{KB}, \%$ а.с.в.	$\varepsilon, \%$ а.с.в.	$t_p, \text{ }^\circ\text{C}$	$C_{KB}, \%$ а.с.в.	$\varepsilon, \%$ а.с.в.
60	0.82	0.0519	45	0.82	0.0411	75	0.82	0.055
80	0.73	-0.059	15	0.73	0.1011	25	0.73	0.103
80	0.82	0.03	15	0.82	0.1911	50	0.82	0.0266
80	0.81	0.0208	15	0.81	0.181	75	0.81	0.0455
80	0.82	0.0308	30	0.82	0.0433	25	0.82	0.1933
80	0.9	0.110	30	0.9	0.123	50	0.9	0.106
80	0.64	-0.149	30	0.64	-0.136	75	0.64	-0.124
80	0.91	0.120	45	0.91	0.131	25	0.91	0.2833
80	0.85	0.0608	45	0.85	0.0711	50	0.85	0.0565
80	0.57	-0.219	45	0.57	-0.2088	75	0.57	-0.194

Температура экстракции  $t_p$  выбрана в качестве влияющей переменной для отклонений по модели (2).

User-Defined Model:  $y = a * \exp(-b * x)$

Coefficient Data:

$$a = -1.10396398272E+001$$

$$b = 1.91049544432E-001$$

Полученное выражение:

$$\varepsilon_\tau = -11.039 \exp(-0.191 t_p). \quad (4)$$

На рис. 4 представлена модель (4) (а) и отклонения (б).

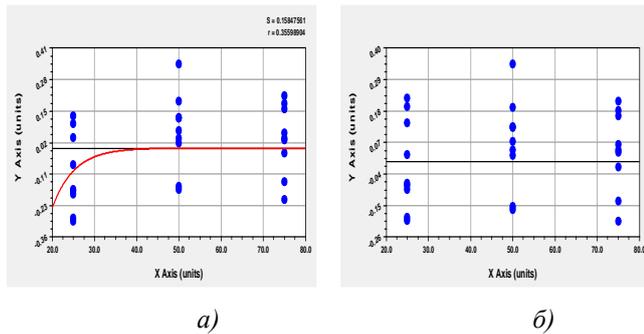


Рис. 4. Идентификация статистической модели, описывающей влияние температуры экстракции на отклонения по модели (2)

Влияющей переменной для модели (3) является концентрация экстрагента как более высокая величина по значимости. Построим зависимость вида

$$\varepsilon_{t_p, \tau} = f(C_p), \text{ где } \varepsilon_{t_p, \tau} \text{ — отклонения по модели (4).}$$

User-Defined Model:  $y = a * x^b * \exp(-c * x^d)$

Coefficient Data:

$$a = 8.39504727523E-001$$

$$b = -2.69714440078E-001$$

$$c = 9.39020948523E+003$$

$$d = -2.10526927565E+000$$

$$\varepsilon_{t_p, \tau} = 0.839 C_p^{-0.269} \exp(-9390.2 C_p^{-2.105}). \quad (5)$$

На рис. 5 представлена модель (5) (а) и отклонения (б).

Общая трехфакторная модель примет вид:

$$C_{KB} = 0.1184 \tau^{0.723} \exp(-x p 2384 \tau) - 11.039 \exp(-x p 039 t_p) + 0.839 C_p^{-0.269} \exp(-x p 6994 C_p^{-2.105}). \quad (6)$$

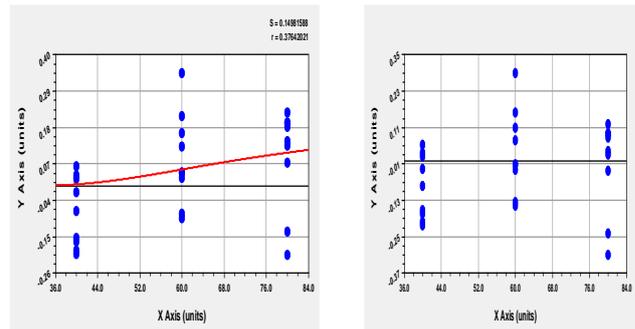


Рис. 5. Идентификация статистической модели, описывающей влияние концентрации экстрагента на отклонения по модели (5)

Относительная погрешность модели (6) представлена в табл. 3. Значения  $C_{KB}$  — расчетные значения выхода кверцетина по модели (6).

По полученной модели (6) можно оценить динамику экстракции биологически-активных веществ (в частности кверцетина) и понять, каким образом технологические факторы влияют на выход целевого компонента.

Так с увеличением времени выход кверцетина сначала увеличивается, что выражается математической компонентой  $0.1184 \tau^{0.723}$ , затем замедляется —  $\exp(-x p 2384 \tau)$ . Вклад данного фактора в процесс оценивается как увеличение выхода целевого компонента, но до определенного момента. С увеличением температуры выход кверцетина также увеличивается, о чем свидетельствует знак «-» перед убывающей экспоненциальной функцией. Вклад данного фактора оценивается как увеличение выхода и развитие процесса. С увеличением концентрации экстрагента выход кверцетина увеличивается, что показывает экспоненциальный конструкт  $\exp(x p 6994 C_p^{-2.105})$  (как  $C_p^{-0.269}$ ), но до определенного момента, так как присутствует компонента снижения  $0.839 C_p^{-0.269}$ , причем она носит характер не затухания, как экспоненциальная функция, а стремительной «гибели» процесса. То есть, повышение концентрации экстрагента в определенный момент увеличения выхода целевого продукта существенно влияет на его снижение. Вклад этого фактора заключается в увеличении выхода кверцетина, но до определенного момента.

**Таблица 3.** Относительная погрешность трехфакторной статистической модели выхода кверцетина из листьев ивы

Ср, %	$\tau$ , мин	tr, °C	$C_{кв}$ , % а.с.в.	$\bar{C}_{КВ}$ , % а.с.в.	$\varepsilon$ , % а.с.в.	$\Delta$ , %
40	15	25	0,33	0,540608	-0,21061	-63,8205
40	15	50	0,46	0,63297	-0,17297	-37,6021
40	15	75	0,61	0,633749	-0,02375	-3,89326
40	30	25	0,49	0,688626	-0,19863	-40,5358
40	30	50	0,62	0,780988	-0,16099	-25,9657
40	30	75	0,81	0,781767	0,028233	3,485559
40	45	25	0,61	0,691464	-0,08146	-13,3548
40	45	50	0,8	0,783826	0,016174	2,021733
40	45	75	0,84	0,784605	0,055395	6,594584
60	15	25	0,44	0,585925	-0,14593	-33,1649
60	15	50	0,67	0,678287	-0,00829	-1,23692
60	15	75	0,79	0,679067	0,110933	14,04218
60	30	25	0,6	0,733943	-0,13394	-22,3239
60	30	50	1,12	0,826305	0,293695	26,22273
60	30	75	0,99	0,827085	0,162915	16,45608
60	45	25	0,71	0,736782	-0,02678	-3,77211
60	45	50	0,9	0,829144	0,070856	7,87289
60	45	75	0,82	0,829923	-0,00992	-1,21016
80	15	25	0,73	0,637059	0,092941	12,73158
80	15	50	0,82	0,729421	0,090579	11,04616
80	15	75	0,81	0,730201	0,079799	9,851751
80	30	25	0,82	0,785078	0,034922	4,258839
80	30	50	0,9	0,87744	0,02256	2,506717
80	30	75	0,64	0,878219	-0,23822	-37,2217
80	45	25	0,91	0,787916	0,122084	13,41582
80	45	50	0,85	0,880278	-0,03028	-3,56212
80	45	75	0,57	0,881057	-0,31106	-54,5715

**Заключение.** По отдельности факторы влияют на выход целевого продукта примерно одинаково, нет явно преобладающих факторов (коэффициенты корреляции ненамного отличаются друг от друга). Однако наибольшую степень влияния на процесс выхода кверцетина оказывает концентрация экстрагента, затем температура процесса и в последнюю очередь продолжительность экстракции. Исходя из этого, технологические режимы экстракции необходимо оптимизировать в таком порядке.

Поскольку при физическом эксперименте факторы также влияют друг на друга, например, концентрация растворителя будет изменяться по времени и температу-

ре, установленной в эксперименте, замеры выходных значений уже содержат в себе результаты этих взаимовлияний, и поскольку модель строится на основе замеренных значений, эти двухфакторные влияния учтены в итоговой модели.

Итоговые погрешности по многофакторным моделям выхода кверцетина составляют: абсолютная погрешность модели 0,02 % а.с.в., относительная погрешность модели 3,26 %. Повышенная относительная погрешность очевидно связана со сложностью методов количественной оценки флавоноидов из растительного сырья, в частности кверцетина.

#### Литература

1. Сафина А.В., Арсланова Г.Р., Тимербаева А.Л., Зиятдинова Д.Ф. Анализ современного состояния технологий процесса экстракции биологически активных веществ из осины и ивы // *Деревообрабатывающая пром-сть*. 2019. № 4. С. 51-62.
2. Сафин Р.Г., Арсланова Г.Р., Валеев К.В., Ахметова Д.А., Тимербаева А.Л., Халитов Р.А. Обзор исследований в области извлечения биологически активных и дубильных веществ из древесины лиственницы // *Деревообрабатывающая пром-сть*. 2020. № 1. С. 15-25.
3. Сафина А.В., Тимербаев Н.Ф., Зиятдинова Д.Ф., Арсланова Г.Р. Экстракция ценных компонентов из лесосечных отходов // *Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал*. 2018. № 1. С. 109-119.
4. Конюхова О.М., Бахтин М.А., Канарский А.В. Биологические ресурсы салицина в иве (*Salicaceae*) // *Вестн. Казанского технологического ун-та*. 2016. Т. 19. № 16. С. 130-132.
5. Tawfeek N. Phenolic compounds from *Populus alba* L. and *Salix subserata* Willd. (*Salicaceae*) counteract oxidative stress in *Caenorhabditis elegans* // *Molecules*. 2019. V. 24. № 10. P. 1999.

## References

6. Shirmohammadli Y., Efhamisisi D., Pizzi A. Tannins as a sustainable raw material for green chemistry: A review // *Industrial Crops and Products*. 2018. V. 126. P. 316-332.
7. Zhao G., Yan W., Cao D. Simultaneous determination of betulin and betulinic acid in white birch bark using RP-HPLC // *Journal of pharmaceutical and biomedical analysis*. 2007. V. 43. P. 959-962.
8. Sultana B., Anwar F., Ashraf M. Effect of extraction solvent/technique on the antioxidant activity of selected medicinal plant extracts // *Molecules*. 2009. V. 14. P. 2167-2180.
9. Торшков А.А. Регуляция метаболического гомеостаза, повышение резистентности и реализации биоресурсного потенциала сельскохозяйственной птицы на основе использования в питании природных биологически активных веществ: автореф. дис. ... д-ра биолог. наук: 03.01.04. Дубровицы, 2014. 34 с.
10. Шкарина Е.И., Максимова Т.В., Никулина И.Н. О влиянии биологически активных веществ на антиоксидантную активность фито-препаратов // *Химико-фармацевтический журнал*. 2001. Т. 35. № 6. С. 40-47.
11. Петрук А.А. Фенольные соединения некоторых представителей рода *Salix* (Salicaceae) Азиатской России // *Химия растительного сырья*. 2011. № 4. С. 181-185.
12. Мазуркин П.М. Идентификация статистических устойчивых закономерностей // *Наука и мир*. 2013. № 3 (3). С. 28-33.
13. Timerbaev N.F., Prosvirnikov D.B., Sadrtidinov A.R. «Application of the method of statistical modeling and parametric identification for automation of the processes of wood treatment» IEEE International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, 2018. P. 1-5.
14. Мазуркин П.М. Закономерности простых чисел. Германия: Palmarium Academic Publishing, 2012. 280 с.
15. Мазуркин П.М. Биотехнический закон и примеры из техники и эконометрики // *Успехи современного естествознания*. 2009. № 9. С. 97-103.
16. Мазуркин П.М., Сафин Р.Г., Просвирников Д.Б. Статистическое моделирование процессов деревообработки. Казань: Изд-во КНИТУ, 2014. 336 с.
17. Singh J. Maceration, percolation and infusion techniques for the extraction of medicinal and aromatic plants // *Extraction technologies for medicinal and aromatic plants*. 2008. V. 67. P. 32-35.
18. Tabart J., Kevers C., Pincemail J., Defraigne J.O., Dommes J. Comparative antioxidant capacities of phenolic compounds measured by various tests // *Food chemistry*. 2009. V. 113 (4). P. 1226-1233.
19. Altemimi A., Watson D.G., Kinsel M., Lightfoot D.A. Simultaneous extraction, optimization, and analysis of flavonoids and polyphenols from peach and pumpkin extracts using a TLC-densitometric method // *Chemistry Central Journal*. 2015. V. 9 (1). P. 1-15.
20. Dedrie M., Jacquet N., Bombeck P.L., Hébert J., Richel A. Oak barks as raw materials for the extraction of polyphenols for the chemical and pharmaceutical sectors. A regional case study // *Industrial Crops and Products*. 2015. V. 70. P. 316-321.
21. Fernández-Agulló A., Freire M.S., González-Álvarez J. Effect of the extraction technique on the recovery of bioactive compounds from eucalyptus (*Eucalyptus globulus*) wood industrial wastes // *Industrial Crops and Products*. 2015. V. 64. P. 105-113.
1. Safina A.V., Arslanova G.R., Timerbaeva A.L., Ziatdinova D.F. Analysis of the current state of technology for the extraction of biologically active substances from aspen and willow // *Derevoobrabativaushaya promishlennost' (Woodworking industry)*. 2019. № 4. P. 51-62.
2. Safin R.G., Arslanova G.R., Valeev K.V., Ahmetova D.A., Timerbaeva A.L., Halitov R.A. Review of research in the field of extraction of biologically active and tannins from larch wood // *Derevoobrativaushaya promishlennost' (Woodworking industry)*. 2020. № 1. P. 15-25.
3. Safina A.V., Timerbaev N.F., Ziatdinova D.F., Arslanova G.R. Extraction of valuable components from logging waste // *Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal)*. 2018. № 1. P. 109-119.
4. Konyuhova O.M., Bahtin M.A., Kanarskij A.V. Salicin biological resources in willow (Salicaceae) // *Herald of Kazan Technological University (KNRTU)*. 2016. V. 19. № 16. P. 130-132.
5. Tawfeek N. Phenolic compounds from *Populus alba* L. and *Salix subserrata* Willd. (Salicaceae) counteract oxidative stress in *Caenorhabditis elegans* // *Molecules*. 2019. V. 24. № 10. P. 1999.
6. Shirmohammadli Y., Efhamisisi D., Pizzi A. Tannins as a sustainable raw material for green chemistry: A review // *Industrial Crops and Products*. 2018. V. 126. P. 316-332.
7. Zhao G., Yan W., Cao D. Simultaneous determination of betulin and betulinic acid in white birch bark using RP-HPLC // *Journal of pharmaceutical and biomedical analysis*. 2007. V. 43. P. 959-962.
8. Sultana B., Anwar F., Ashraf M. Effect of extraction solvent/technique on the antioxidant activity of selected medicinal plant extracts // *Molecules*. 2009. V. 14. P. 2167-2180.
9. Torshkov A.A. Regulation of metabolic homeostasis, increasing resistance and realizing the biological resource potential of poultry based on the use of natural biologically active substances in nutrition: avtoref. dis. ... d-ra biolog. nauk: 03.01.04. Dubrovicy, 2014. 34 p.
10. SHkarina E.I., Maksimova T.V., Nikulina I.N. On the influence of biologically active substances on the antioxidant activity of phyto-preparations // *Pharmaceutical Chemistry Journal*. 2001. V. 35. № 6. P. 40-47.
11. Petruk A.A. Phenolic compounds of some representatives of the genus *Salix* (Salicaceae) of Asian Russia // *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja (Chemistry of plant raw material)*. 2011. № 4. P. 181-185.
12. Mazurkin P.M. Identification of statistical stable patterns // *Science & World*. 2013. № 3 (3). P. 28-33.
13. Timerbaev N.F., Prosvirnikov D.B., Sadrtidinov A.R. «Application of the method of statistical modeling and parametric identification for automation of the processes of wood treatment» IEEE International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, 2018. P. 1-5.
14. Mazurkin P.M. Regularities of Prime numbers. Germaniya: Palmarium Academic Publishing, 2012. 280 p.
15. Mazurkin P.M. Biotechnical law and examples from engineering and econometrics // *Advances in current natural sciences*. 2009. № 9. P. 97-103.
16. Mazurkin P.M., Safin R.G., Prosvirnikov D.B. Statistical modeling of woodworking processes. Kazan': Izd-vo KNITU, 2014. 336 p.
17. Singh J. Maceration, percolation and infusion techniques for the extraction of medicinal and aromatic plants // *Extraction*

- technologies for medicinal and aromatic plants. 2008. V. 67. P. 32-35.
18. Tabart J., Kevers C., Pincemail J., Defraigne J.O., Dommes J. Comparative antioxidant capacities of phenolic compounds measured by various tests // *Food chemistry*. 2009. V. 113 (4). P. 1226-1233.
19. Altemimi A., Watson D.G., Kinsel M., Lightfoot D.A. Simultaneous extraction, optimization, and analysis of flavonoids and polyphenols from peach and pumpkin extracts using a TLC-densitometric method // *Chemistry Central Journal*. 2015. V. 9 (1). P. 1-15.
20. Dedrie M., Jacquet N., Bombeck P.L., Hébert J., Richel A. Oak barks as raw materials for the extraction of polyphenols for the chemical and pharmaceutical sectors. A regional case study // *Industrial Crops and Products*. 2015. V. 70. P. 316-321.
21. Fernández-Agulló A., Freire M.S., González-Álvarez J. Effect of the extraction technique on the recovery of bioactive compounds from eucalyptus (*Eucalyptus globulus*) wood industrial wastes // *Industrial Crops and Products*. 2015. V. 64. P. 105-113.