

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СВЕРХКРИТИЧЕСКОЙ ЭКСТРАКЦИИ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ ИЗ ЛАКРИЧНОГО КОРНЯ

Джураев Хайрулло Файзиевич

профессор,
Бухарский инженерно-технологический институт,
Республика Узбекистан, г. Бухара
E-mail: evrikiy@list.ru

Гафуров Карим Хакимович

доцент,
Бухарский инженерно-технологический институт,
Республика Узбекистан, г. Бухара

Жумаев Журабек

доцент,
Бухарский государственный университет,
Республика Узбекистан, г. Бухара

Мирзаева Шохиста Усмоновна

докторант,
Бухарский инженерно-технологический институт,
Республика Узбекистан, г. Бухара

MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF SUPERCRITICAL EXTRACTION OF BIOLOGICALLY ACTIVE SUBSTANCES FROM LICORICE ROOT

Khayrullo Juraev

Prof., Bukhara Engineering Technological Institute,
Republic of Uzbekistan, Bukhara

Karim Gafurov

Associate Professor, Bukhara Engineering Technological Institute,
Republic of Uzbekistan, Bukhara

Jurabek Jumaev

Associate Professor, Bukhara State University,
Republic of Uzbekistan, Bukhara

Shohista Mirzaeva

Doctoral student, Bukhara Engineering Technological Institute,
Republic of Uzbekistan, Bukhara

АННОТАЦИЯ

В данной работе на основе экспериментального исследования процесса извлечения экстрактов из лакричного корня с помощью сверхкритическим углекислым газом (СК-СО₂) получена обобщенная математическая модель процесса. Условия экспериментов были следующими: давление 7,5-9,5 МПа, температура 31-41⁰С, длительность экстракции 90-150 мин. Размер частиц принимались для того, чтобы получить максимальный выход. Полученное обобщенное уравнение позволяет с достаточной точностью определять выход экстракта лакричного корня в условиях СО₂-экстракции в исследуемом диапазоне изменения факторов. С помощью этих уравнений можно выявить степень влияния каждого исследуемого фактора на конечный результат, что необходимо для оптимизации процесса.

ABSTRACT

In this work, based on an experimental study of the process of extracting extracts from licorice root using supercritical carbon dioxide (SC-CO₂), a generalized mathematical model of the process is obtained. The experimental conditions were as follows: pressure 7.5-9.5 MPa, temperature 31-41⁰C, extraction duration 90-150 minutes. The particle size was taken in order to obtain the maximum yield. The resulting generalized equation allows to determine with sufficient accuracy the yield of licorice root extract under CO₂-extraction conditions in the investigated range of factors. Using these equations, it is possible to identify the degree of influence of each investigated factor on the final result, which is necessary for process optimization.

Ключевые слова: экстракт, корень лакрицы; сверхкритический диоксид углерода; давление; температура, время экстракции, математическая модель.

Keywords: extract, licorice root; supercritical carbon dioxide; pressure; temperature, extraction time, mathematical model.

Введение

В процессе экстракции биологически активных веществ из сырья растительного происхождения сверхкритическими флюидами (СКФ) участвуют различные индивидуальные соединения, в связи с чем возникает вопрос о влиянии тех или иных компонентов исходного сырья на процесс экстракции [16].

Для установления этого влияния проведены экспериментальные исследования для установления связи между изменением давления, температуры, времени экстракции и выходом экстрактивных веществ из сырья растительного происхождения (корни солодки).

Основными факторами, влияющими на экстракцию лакричного корня сверхкритическим CO_2 являются: температура и давление, вязкость экстрагента, степень измельчения и влажность сырья, время и гидродинамика процесса [17, 3, 4].

Методы планирования экспериментов позволяют наиболее экономичным и эффективным способом получать математические модели исследуемого процесса в реализованном диапазоне изменения многих факторов, влияющих на процесс [5, 6].

О месте планирования экспериментов можно получить четкое представление, если рассмотреть общую схему парного экспериментального исследования объекта с недостаточно проясненным механизмом процессов, протекающих в этом объекте.

Реализация интенсифицированного процесса экстракции лакричного корня связана с получением расчетных уравнений, позволяющих определить продолжительность процесса экстракции и рациональные параметры режима экстракции. С этой целью нами применен метод планирования многофакторных экспериментов [5, 6, 7].

Экспериментальная часть

Эксперименты проводили в лабораториях Бухарского инженерно-технологического института и Кубанского государственного технологического университета на установках, описание которых приведены [7,8].

В качестве основных факторов, оказывающих влияние на процесс экстракции лакричного корня, приняты: t - температура экстракции ($^{\circ}\text{C}$), τ - продолжительность экстракции (мин), P - давление (МПа).

Пределы варьирования факторов выбраны, исходя из анализа результатов предварительных экспериментов по изучению процесса CO_2 экстракции растительных материалов.

Выделение факторов и уровней их варьирования представлено в таблице 1.

Таблица 1.

Уровни изучаемых факторов

№ п/п	Факторы	Уровни				
		1	2	3	4	5
1	Температура экстрагента, t ($^{\circ}\text{C}$)	31	33	35	38	41
2	Время экстракции, τ (мин)	90	105	120	135	150
3	Давление экстрагента, P (МПа)	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5

В качестве искомым функций приняты выход экстракта $Y_{\text{вых}}$ (%),

В нашем случае, когда число факторов равно трем, при реализации плана эксперимента в виде

греко-латинского квадрата, необходимо поставить 25 опытов, варьируя факторы на пяти уровнях.

Реализация плана экспериментов со значениями факторов представлена в табл. 2.

Таблица 2.

Результаты воспроизведения плана эксперимента

№/№ п/п	t ($^{\circ}\text{C}$)	τ (мин)	P (МПа)	$Y_{\text{вых}}$, %
1	31	90	7,5	26,6
2	31	105	8	28,7
3	31	120	8,5	32,4
4	31	135	9	33,2
5	31	150	9,5	34,4
1	35	90	8,5	28,1
2	35	105	9	33,7
3	35	120	9,5	31,6
4	35	135	7,5	30,4
5	35	150	8	34,7

№/№ п/п	t (С°)	τ (мин)	P (МПа)	Y _{вых} , %
1	33	90	9,5	33,9
2	33	105	7,5	26,7
3	33	120	9	34,1
4	33	135	8,5	33,2
5	33	150	8	31,4
1	41	90	8	28,4
2	41	105	8,5	29,9
3	41	120	9	31,2
4	41	135	9,5	34,4
5	41	150	7,5	33,8
1	38	90	9	31,6
2	38	105	9,5	32,8
3	38	120	7,5	28,7
4	38	135	8	31,4
5	38	150	8,5	33,5

Структура матрицы такова, что при проведении всех опытов каждый уровень любого фактора встречается один раз с каждым уровнем всех остальных факторов, для этого каждый уровень каждого фактора задается в опытах столько раз, сколько принято уровней. Этим достигается осредненное действие

любого фактора, т.е. Обеспечивается тот самый эффект, который имеет место при бесконечно большом числе экспериментов со случайной вариацией всех факторов. Тем самым открывается возможность для применения методов математической статистики и достигается экономия в количестве экспериментов [3, 4, 5].

Таблица 3.

Экспериментальные значения частных функций

Функции	Уровни					Среднее значение
	1	2	3	4	5	
$Y_1(t)$	31,92	33,04	33,32	33,18	32,02	32,5
$Y_2(\tau)$	30,6	32,64	32,7	33,38	33,16	32,5
$Y_3(P)$	31,7	31,84	32,14	32,78	34,02	32,5

Из таблицы 3 видно, что средние значения пяти уровней каждой функции равны общим средним: $Y_{вых.ср}=32,5\%$;

Совпадение среднего значения с общим средним является критерием отсутствия ошибок в расчетах [5].

Эмпирические формулы для формулировки частных зависимостей выхода экстракта, конечной температуры и конечного давления в зависимости от параметров экстракции, начальной влажности растительного материала, температуры и скорости движения потока CO₂ получены в результате обработки данных методом наименьших квадратов [3, 4, 5].

Для 1 фактора – температура экстрагента $y=f(t)$:

$$y = 41,772 + 4,176 \cdot x - 0,058 \cdot x^2 \quad (1)$$

Для 2 фактора – время процесса $y=f(\tau)$:

$$y = 10,537 + 0,336 \cdot x - 0,0001 \cdot x^2 \quad (2)$$

Для 3 фактора – давление экстрагента $y=f(P)$:

$$y = 75,080 - 0,2211 \cdot x + 7257 \cdot x^2 \quad (3)$$

Расчетные значения частных функций представлены в таблице 4.

Таблица 4.

Расчетные значения частных функций

Функция	Уровни					Среднее значение
	1	2	3	4	5	
$y=f(t)$	31,98	32,9	33,38	33,2	32,0	32,6
$y=f(\tau)$	30,77	32,19	33,05	33,36	33,11	32,5
$y=f(P)$	31,74	31,76	32,13	32,87	33,97	32,5

Определение значимости частных функций.

Чтобы составить суждение о степени обоснованности принятых параметров, нами определено их значимость. В соответствии с положениями математической статистики и теории вероятностей, функции, описывающие процесс, подразделяют на значимые и незначимые. Если функция незначима, то интервал ее изменения не выходит за пределы допустимого разброса экспериментальных данных, т.е. находится в рамках доверительного интервала.

Определяем значимость частных функций зависимостей пользуясь коэффициентом нелинейной множительной корреляции R [5]:

$$R = \sqrt{1 - \frac{(N-1) \cdot \sum_1^N (Y_3 - Y_p)^2}{(N-k-1) \cdot \sum_1^N (Y_3 - Y_{cp})^2}} \quad (4)$$

где N – число описываемых точек ($N=5$); k – число действующих факторов ($k=1$); Y_3 – экспериментальный результат; Y_p – теоретический (расчетный) результат; Y_{cp} – среднее экспериментальное значение.

Значимость определяется по формуле [6]:

$$t_R = \frac{R\sqrt{N-k-1}}{1-R^2} \quad (5)$$

Значения коэффициентов корреляции R и его значимость t_R приведены в таблице 5.

Таблица 5.

Коэффициент корреляции R и его значимость t_R для частных функций

Функция	R	t_R	Значимость функции
$Y_1(t)$	0,988	$73,5 > 2$	значима
$Y_2(P)$	0,95	$15,46 > 2$	значима
$Y_3(\tau)$	0,99	$237 > 2$	значима

Для получения уравнения технологического процесса получения экстракта из лакричного корня CO_2 -экстракцией использована формула, предложенная М.М. Протодьяконовым [7]:

$$Y_{II} = \frac{\prod_{i=1}^n Y_i}{Y_{cp}^{n-1}} \quad (6)$$

где Y_{II} – обобщенная функция; Y_i – частная функция; $\prod_{i=1}^n Y_i$ – произведение частных функций; Y_{cp}^{n-1} – общее среднее всех учитываемых значений обобщенной функции, в степени на единицу меньше числа частных функций.

По формуле (6) определено обобщенное уравнение, описывающее процесс CO_2 экстрагирования лакричных корней.

$$Y_{вых} = \frac{(41,772 + 4,176 \cdot x - 0,058 \cdot x^2) \cdot (10,537 + 0,336 \cdot x - 0,0001 \cdot x^2)}{32,5^2 \cdot (75,080 - 0,2211 \cdot x + 7257 \cdot x^2)^{-1}} \quad (7)$$

Заключение. Полученное обобщенное уравнение позволяет с достаточной точностью определять выход экстракта лакричного корня в условиях CO_2 -экстракции в исследуемом диапазоне изменения факторов. С помощью этих уравнений можно выявить степень влияния каждого исследуемого фактора на конечный результат, что необходимо для оптимизации процесса.

Список литературы:

1. Дерканосова Н.М. и др. Моделирование и оптимизация технологических процессов пищевых производств. Учебное пособие. Воронеж: ВГТА, 2011.-195 с.
2. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. М. Изд-во. «Мир», 1981, С. 146-160.
3. Жалолов О.И, Косимов А.А. Оптимальные по порядку сходимости весовые кубатурные формулы типа Эрмита в пространстве $\bar{L}_2^m(K_n)$ // Узбекский математический журнал. –Ташкент, 2015. -№ 3. -С. 24- 33.
4. Жалолов О.И. Вычисление нормы функционала погрешности оптимальных интерполяционных формул в пространстве периодических функций С.Л.Соболева \tilde{V} . Проблемы вычислительной и прикладной математики. // Научный журнал. -№2.-2015 декабр.-Ташкент.-53-58 с.
5. Жалолов О.И, С.И.Ибрагимов, Б.Р. Абдуллаев. Оценка погрешности кубатурных формул общего вида над фактор- пространством Соболева // WORLD Science "Topical researches of the World science" —June 20 – 21, 2015, —Dubai, UAE).
6. Жалолов О.И, И.Ф. Жалолов. Об одной асимптотической оптимальной кубатурной формуле // «Молодой учёный» Международный научный журнал. № 10 (114). 2016.
7. Жалолов О.И., Абдуллаев Б.Р. Построение оптимальных квадратурных формул типа Эрмита в пространстве периодических функций С.Л.Соболева \tilde{V} . // «Молодой учёный» Международный научный журнал. № 11 (145). 2017.

8. Жалолов О.И., Боборахимова М.И. Алгоритм построения дискретного аналога одного оператора $D_4[\beta]$ // «Молодой учёный» Международный научный журнал. № 11 (145).2017.
9. Жалолов О.И. Верхняя оценка нормы функционала погрешности кубатурной формулы типа Эрмита в пространстве С.Л. Соболева // Проблемы вычислительной и прикладной математики. Научный журнал. -№ 3. 2017. С. 70-78.
10. Жалолов О.И., Хаятов Х.У. Понятие SQL и реляционной базы данных // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2020. № 6 (75).
11. Кадырова Р.Х. Совершенствование процесса выпаривания экстракта лакричного корня // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Москва, 1990, 9-10 с.
12. Касьянов Г.И., Медведев А.М., Гафуров К.Х. Пути использования диоксида углерода как растворителя // Научно-технический журнал «Развитие науки и технологий». 2019. №5. -С.54-59.
13. Мальшев В.П. Математическое планирование металлургического и химического эксперимента. – Алма-Ата: Наука, 1977. С. 36.
14. Нечаев А.П., Шуб И.С. Технологии пищевых производств. –М.: Колос, 2005. 768 с.
15. Патент РФ №2163827. Способ экстрагирования материалов / Абрамов Я.К. и др. 2001 г.
16. Gafurov K.Kh., Ibragimov U.M., Fayziev Sh.I. Statistical-mathematical model of the process of extraction of pumpkin seeds by CO₂-extraction // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. # 1-2 2017. -P.59-63.
17. Guo, Y.; Tong, Z.; Tong, P.; Sun, J. Pilot study on treatment process of licorice products wastewater.China Water Wast. 2010, 26, 58–62.