

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет  
имени И. Т. Трубилина»

Евразийская технологическая платформа  
«Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности  
АПК – продукты здорового питания»



**КубГАУ**

Кубанский государственный  
аграрный университет

## СОВРЕМЕННЫЕ АСПЕКТЫ ПРОИЗВОДСТВА И ПЕРЕРАБОТКИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ

*Сборник статей*

*по материалам VII Международной научно-практической конференции*

*6 декабря 2023 года*

Краснодар  
КубГАУ  
2023

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет  
имени И. Т. Трубилина»

Евразийская технологическая платформа  
«Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности  
АПК – продукты здорового питания»

# СОВРЕМЕННЫЕ АСПЕКТЫ ПРОИЗВОДСТВА И ПЕРЕРАБОТКИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ

*Сборник статей*

по материалам VII Международной научно-практической конференции  
посвященной 20-летию кафедры технологии хранения и переработки  
животноводческой продукции Кубанского ГАУ

6 декабря 2023 года

Краснодар  
КубГАУ  
2023

УДК 664.8.

## МАССОПЕРЕНОС ПРИ ФИЛЬТРАЦИИ СВЕРХКРИТИЧЕСКОЙ CO<sub>2</sub> ЧЕРЕЗ ЗЕРНИСТЫЙ СЛОЙ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

**Х. Ф. Джураев д.т.н. профессор, Ш. У. Мирзаева к.т.н., доцент**

(Бухарский инженерно-технологический институт, Бухарский государственный университет, г. Бухара, Узбекистан)

***Аннотация:** Разработана упрощенная математическая модель экстракции растительных ингредиентов сверхкритической CO<sub>2</sub>. Она сводится к двум системам гиперболических уравнений, относящихся к основным характеристикам процесса, а именно, 1) концентрации масла в флюиде в микроскопических каналах зернистого слоя частиц и 2) выделение начального запаса масла из частиц.*

***Ключевые слова:** сверхкритическая экстракция, масличные культуры, математическая модель, гиперболические уравнения, флюиды, мицелла, микрофибриллы, макрофибриллы, диффузия, полидиспертность.*

На современном этапе осуществления экономических реформ в Узбекистане особый приоритет отдается модернизации производства [1]. При этом большое значение имеет анализ, моделирование, расчет и выбор оптимальных систем.

В результате осуществления мер по рационализации издержек производства, внедрению энергосберегающих технологий обеспечено снижение себестоимости производимой продукции в среднем на 11,2 %, а энергоемкости ВВП – на 15,3 %.

Несмотря на нестабильность конъюнктуры мирового рынка, обеспечен рост объемов экспорта на 10,9 % и получено положительное сальдо

внешнеторгового оборота в размере 1,3 млрд. долларов США. Свыше 72 % всего объема экспорта приходилось на несырьевые товары.

Подводя итог сделанному за истекшие года, сегодня есть все основания сказать – нами осуществлена огромная по масштабам и глубине работа по обновлению и реформированию страны, достижению стабильных и устойчивых темпов роста и макроэкономической сбалансированности экономики. Несмотря на продолжающийся мировой финансово-экономический кризис, в отчетном году валовой внутренний продукт вырос на 8 процентов, объем производства промышленной продукции – на 8 процентов, продукции сельского хозяйства – почти на 7, строительно-монтажных работ – почти на 18 процентов. Согласно рейтингу авторитетного Всемирного экономического форума Узбекистан, входит в пятерку стран с самой быстро развивающейся экономикой в мире. Узбекистан стал одной из 14 стран, получивших награды за достижение Целей развития тысячелетия в области обеспечения продовольственной безопасности государствами-членами Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (ФАО) [1].

Растительные материалы, которые подвергаются экстракции состоят из капиллярно-пористых систем, которые составляют их ткани. Ткани слагаются из сотен клеток, являющихся основными функциональными единицами высших растений. Между клетками разных по специализации тканей наблюдается существенное различие. Такое различие позволяет, пользуясь морфологическими признаками, устанавливать специализацию тканей. Специализация основной ткани обуславливает развитие в них внутриклеточных структур, обеспечивающих синтез запасных веществ клетки, в том числе липидов (масла). Специфической особенностью растительной клетки является наличие у неё оболочки, неспособной пропускать твердые частицы и из окружающей среды в клетку питательные вещества могут попасть в клетку только в растворенном виде. Под оболочкой клетки расположена цитоплазма, в неё погружены ядро клетки и другие органеллы различного строения и функций.

Форму клетки определяет клеточная оболочка, она придает клеткам и тканям растений механическую прочность, защищает цитоплазматическую мембрану от разрушения под влиянием гидростатического давления, развиваемого внутри клетки. В состав клеточной оболочки входят клетчатка, гемицеллюлоза, целлюлоза, пектиновые вещества, липиды и белки. Они выделяются из цитоплазмы и претерпевают превращения на поверхности плазмалеммы. Остов клеточной оболочки составляют переплетенные микро- и макрофибриллы целлюлозы. Молекулы целлюлозы объединены в микрофибриллу, микрофибриллы объединены в макрофибриллу. Макрофибриллы, мицеллы и микрофибриллы соединены в пучки водородными связями, что в конечном итоге образует зернистые слои растительных материалов.

Целью данного исследования является создание и рассмотрение математических моделей массопереноса при фильтрации сверхкритической  $\text{CO}_2$  через зернистый слой обрабатываемого растительного материала. Этот процесс, т.е. фильтрация через зернистый слой растительного материала, представляет собой довольно – таки сложный многофакторный процесс, осуществление которого как в лабораторных, так и в промышленных масштабах требует значительных временных затрат. Математические модели дают возможность выбора наиболее оптимальных условий (ресурсо- и энергосбережение) ведения процесса для достижения поставленных целей [4-6].

Рассмотрение подходов к математическому описанию взаимодействий потоков сверхкритических флюидов (СКФ) с зернистыми слоями растительных материалов и измерению фазовых равновесий экстрагируемых целевых ингредиентов в чистых и модифицированных СКФ и выбор методов анализа обнаруживает два основных подхода (7) к описанию диффузионного и конвективного массопереноса при фильтрации флюида через зернистый слой клеточных структур: модели «разрушенных ячеек» ВИС и «служащего ядра» SC. По-видимому, модель SC является лучшей, т.к. содержит один свободный параметр – диффузионное сопротивление межклеточных каналов, тогда как в модели ВИС таких параметров 2 или 3, в зависимости от ее модификации.

Следует отметить, что до сих пор не проведен критериальный анализ этих моделей, нет детального параметрического анализа процессов экстракции, не учитывается полидисперсность сырья, не оптимизированы процессы массопереноса через слой обрабатываемого растительного материала в отношении качества получаемого ингредиента. Нет четких алгоритмов промышленных экстракционных технологий, основанных на результаты лабораторных опытов.

Рассмотрим математическую модель массопереноса на примере молотых семян арбуза. В процессе экстракции масло, содержащееся в косточках, растворяется в СКФ, диффундирует по межклеточным каналам к границам частиц зернистого слоя, отсюда уносится фильтрационным потокам СК-СО<sub>2</sub>.

Согласно модели SC в частицах зернистого слоя выделяются две зоны: в ядре масло из растительных клеток ещё не начало вырабатываться, а межклеточные каналы заполнены СК СО<sub>2</sub> с равновесной концентрацией растворенного масла  $\theta_z$ ; в зоне истощения масло из ячеек полностью выработано, а концентрация в межклеточных каналах изменяется от  $\theta_z$  на подвижной границе  $z=f(t)$  до меньшего значения  $\theta_\alpha$  при  $z=\alpha$ . Перепад концентраций  $\theta_z - \theta_\alpha$  является движущей силой диффузионного переноса масла по межклеточным каналам от ядра к поверхности частицы. Доказано (8), что диффузионное сопротивление области истощения много больше сопротивления диффузионного пограничного слоя, возникающего во внутриводном пространстве на границе частицы и процесс диффузии в истощенной зоне, можно считать квазистационарным. Это позволяет отождествлять величины  $\theta_\alpha$  и C выразить через разность концентраций  $\theta_z - C$  скорость движения R фронта истощения и диффузионный поток q, кг/м<sup>2</sup> с единицы поверхности частицы во внутриводное пространство

$$-(a - R)R \frac{\partial R}{\partial t} = \frac{\varepsilon D a}{(\theta)_0} (\theta_z - C) \quad (1)$$

$$q = \frac{\varepsilon D R}{(a - R)a} (\theta_z - C) \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  – объемная доля межклеточных каналов внутри частицы,

D – коэффициент молекулярной диффузии,

$\alpha$  – радиус частицы, м.

Проведением критериального анализа процесса экстракции было показано, что в типичных ситуациях емкостными и дисперсионными эффектами во внутривещном пространстве можно пренебречь в сравнении с емкостью частиц засыпки и конвективным переносом. Следовательно, уравнение для концентрации с раствора масла в СКФ при его фильтрации через зернистый слой выглядит так:

$$v \frac{\partial C}{\partial Z} = 3 \frac{1-e}{a} q \quad (3)$$

Величина  $(1-e) \alpha^{-1}$  представляет собой площадь поверхности частиц засыпки в единице объема пористого слоя. Уравнения (1) и (3) совместно дадут систему уравнений для определения неизвестных функций  $C(Z,t)$  и  $R(Z,t)$

$$-R(a - R) \frac{\partial R}{\partial t} = \frac{\varepsilon D a}{(\theta)_0} (\theta_z - C) \quad (4)$$

$$v \frac{\partial R}{\partial t} = 3 \frac{\varepsilon D (1-e) E}{a^2 (a-R)} (\theta_z - C) \quad (5)$$

Уравнения (4) и (5) представляют собой результирующую формулировку модели экстракции масла из монодисперсного зернистого слоя. Переход с сохранением прежних обозначений к безразмерным переменным  $C, R, t, Z$  за счет нормировки их на  $\theta_z, a, t_{sc}, Z_{sc}$  соответственно.

$Z_{sc} \frac{va^2}{3\varepsilon(1-e)}, t_{sc} = \frac{a^2(\theta)_0}{\varepsilon D \theta_z}$ , позволяет получить следующего задачу для нахождения  $C, R$

$$-R(1 - R) \frac{\partial R}{\partial t} = 1 - C, R(\theta, Z) = 1 \quad (6)$$

$$(1 - R) \frac{\partial C}{\partial Z} = R(1 - C), C(t, 0) = 0 \quad (7)$$

Задача допускает аналитическое решение, которое можно использовать для расчета динамики экстракции масла в зернистом слое заданной высоты  $H$ . Отношение добытого к моменту времени  $t$  масла к его начальным запасам определяется универсальной зависимостью  $Y(\tau, \bar{H})$ ,

$$\gamma = \frac{y}{\rho}, \quad \tau = \frac{vt}{\rho H}, \quad \bar{H} = \frac{3H(1-e)}{la^2v} \varepsilon D, \quad (8)$$

здесь  $y(t)$ , кг/м<sup>3</sup> – масса извлеченного масла за время  $t$ , отнесенная к объему зернистого слоя;  $\rho = (\theta)_0(1 - e)(1 - \varepsilon)$  – масса масла в единице объема зернистого слоя до начала процесса.

До сих пор мы рассматривали монодисперсный зернистый слой, состоящий из сферических частиц одного размера. Следующим шагом в моделировании процессов СК экстракции реального растительного сырья (например, косточки арбуза) является учет полидисперсности зернистого слоя. Для этого необходимо иметь данные о распределении частиц слоя по размерам. Она задается с помощью плотности  $f(a)$  объемного распределения частиц, так что величина  $f(a) da$  представляет собой отношение суммарного объема частиц с размерами в диапазоне  $a - (a+da)$ , к суммарному объему всех частиц.

Очевидно, что глубина проработки частиц зависит в данном случае не только от времени и пространственной координаты, как для монодисперсного слоя, но и от размера,  $a$  данной частицы,  $R=R(t, Z, a)$ . В то же время концентрация масла  $C=C(t, Z)$  в фильтрационном потоке остается функцией только  $t$  и  $Z$ . Уравнение (4), описывающее продвижение границы истощения, очевидно сохраняет свой вид и в случае полидисперсного слоя. Здесь необходимо учитывать уже не одно, а семейство уравнений, зависящих от  $a$ , как от параметра. Для нахождения общего потока масла во внутриворонное пространство необходимо просуммировать потоки от каждой из частиц. Тогда уравнение (3) для концентрации примет вид

$$v \frac{\partial C}{\partial Z} = (1 - e)\varepsilon D(\theta_2 - C) \int_0^{\infty} \frac{R}{a-R} f(a) \frac{da}{a^2} \quad (9)$$

Таким образом, для нахождения функций  $R(t, Z, a)$  и  $C(t, Z)$  имеется параметрическое семейство уравнений (4) и дифференциально – интегральное уравнение (9).

Выяснено, что для зернистого слоя с явно выраженной полидисперсностью, процесс СКЭ имеет двухстадийный характер, присущий модели BIG. Следовательно, учет полидисперсности в модели SC позволяет объяснить резкую смену темпа извлечения без привлечения дополнительных



гипотез, лежащих в основе модели BIG. Для подтверждения адекватности полидисперсной модели была проведена серия лабораторных опытов по извлечению масла из молотых косточек арбуза для различных распределений частиц по размерам. Наблюдалось во всех случаях удовлетворительное совпадение опытных и теоретических кривых темпа выхода масла [9,10-16]. Эти экспериментальные данные будут обсуждаться в дальнейших публикациях.

#### Список литературы:

1. <https://www.gazeta.uz/ru/2017/02/07/strategy/>
2. Сафаров А.Ф., Гафуров К.Х., Шомуродов Т.Р. Перспективы применения сверхкритической флюидной экстракции в пищевой промышленности Узбекистана // научно-технический журнал «Химия и химическая технология», 2013, №3. - С.65-69.
3. Сафаров А.Ф., Гафуров К.Х. Применение сжиженного углекислого газа как растворителя для получения экстрактов из растительного сырья: (Монография) - Бухара: Изд-во - Бухара, 2014. - С.117.
4. Р.Н.Максудов, А.Г.Егоров, А.Н.Мазо и др. Математическая модель экстрагирования семян масличных культур сверхкритическим CO<sub>2</sub>. Сверхкритич. флюиды: Теория и практика, 2008, № 2, С. 20.
5. Р.Н.Максудов. Автореферат док. дисс.: Казань, КТУ, 2012.
6. Касьянов Г.И. Новые пути использования диоксида углерода (в пищевой промышленности) // Теория и практика суб-и сверхкритической флюидной обработки сельскохозяйственного сырья. Краснодар. НИИ хранения и переработки сельскохозяйственной продукции-Краснодар, 2009-С.32-36.
7. Касьянов Г.И., Щербаков В.Г., Франков Е.П., Карпенко М.В. Получение CO<sub>2</sub>-экстракта из подсолнечной лузги. // Известия вузов. Пищевая технология. № 5-6. 2010.- С.113-114.
8. Касьянов Г.И., Силинская С.М., Ольховатов Е.А. Экономико-математическое обоснование применимости процесса CO<sub>2</sub>-экстракции в условиях действующего предприятия // Современная наука и инновации. 2017. № 3 (19). С. 109-114.
9. Гаджиева А.М., Касьянов Г.И. Эффективная технология комплексной переработки томатов // Известия вузов. Пищевая технология. № 1, 2013. - С.76-79.

10. Сагайдак Г.А., Касьянов Г.И. Математическое описание процесса СО<sub>2</sub>-экстракции (получение СО<sub>2</sub>-экстрактов из смесей сухих пряностей) // Теория и практика суб-и сверхкритической флюидной обработки сельскохозяйственного сырья / Краснодар. НИИ хранения и переработки сельскохозяйственной продукции -Краснодар, 2009-С 99-102.

11. Varivoda A.A., Kenijz N.V., Zaitseva T.N., Kulikov D.A., Ginzburg N.A. Analysis and features of methods for low-calorie dessert sauce production. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020; 012157 DOI:10.1088/1755-1315/613/1/012157.

12. Варивода А. А., Особенности технологии производства сухих продуктов из растительного и животного сырья, Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина. – Краснодар : КубГАУ, 2021, Библиогр.: с. 133-135.

13. Bugaets N.A., Tereshchenko I.V., Lyubimova L.V., Usatkov S.V., Shantyz A.Kh., Miroshnichenko P.V., Prediction model of microbiological and organoleptic indicators of salads during storage with the processing by extremely low frequency electromagnetic fields/ //BIO Web Conf.Volume 17, 2020. International Scientific-Practical Conference “Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources”.

14. Bugaets N.A., Tereshchenko I.V. Lyubimova L.V. Usatkov S.V.Shantyz A.Kh., Miroshnichenko P.V, A model for predicting microbiological and organoleptic indicators of salads during storage with the use of chitosan.//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Volume 422, Issue 1, 10 January 2020.

15. М. Ю.Тамова, Е. В. Барашкина, Р.А. Журавлев, Н.Р. Третьяквa, А.Х. Шантыз, И.С. Коба, Детоксикационные свойства комбинированных пищевых волокон, полученных из вторичного сырья свеклосахарного производства, // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология, 2019. – С. 107-110.

16. В.А.Антипов, А.Х.Шантыз, Е.В.Громыко, А.В.Егунова, С.А.Манукало, Йод в ветеринарии //Монография. Краснодар: КубГАУ, 2011. – 306 с.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИДРАТОПЕКТИНА ИЗ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ В ТЕХНОЛОГИИ ПРОДУКТОВ ЗДОРОВОГО ПИТАНИЯ Л. Г. Влащик, С. С. Ляшенко, А. В. Тарасенко .....	341
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КСАНТАНОВОЙ КАМЕДИ В ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВАХ Т. Д. Паршкова .....	345
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ ПРОИЗВОДСТВА ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ М. Г. Киселев, И. В. Симакова.....	349
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕТРАДИЦИОННОГО РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ БЕЗГЛЮТЕНОВЫХ ЗАВАРНЫХ ПИРОЖНЫХ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ПИЩЕВОЙ ЦЕННОСТИ Н. Г. Иванова, А. С. Солнцева .....	355
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ САХАРОЗАМЕНИТЕЛЕЙ В ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА МУЧНЫХ КОНДИТЕРСКИХ ИЗДЕЛИЙ О. П. Храпко, С. А. Концедайло .....	360
ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА МАЙОНЕЗА НЕПРЕРЫВНЫМ СПОСОБОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА В. Н. Андреев, В. В. Демичев.....	364
КЛЮКВА КАК ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ИНГРЕДИЕНТ ДЛЯ МУЧНЫХ КОНДИТЕРСКИХ ИЗДЕЛИЙ Е. В. Щербакова, Е. С. Шацкая.....	369
КОНЦЕПЦИЯ РЕЦЕПТУРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ БЕЗАЛКОГОЛЬНЫХ НАПИТКОВ ДЛЯ ЗДОРОВОГО ПИТАНИЯ НА БАЗЕ СМЕСИ СУХОГО РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ Е. А. Ольховатов, В. О. Сымулов .....	374
ЛИОФИЛЬНАЯ СУШКА СУПОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ Е. В. Зубкова, Н. В. Кенийз .....	378
МАСЛО ИЗ СЕМЯН ЧИА, КАК ПРОДУКТ ЗДОРОВОГО ПИТАНИЯ А. Н. Остриков, А. В. Терёхина .....	381
МАССОПЕРЕНОС ПРИ ФИЛЬТРАЦИИ СВЕРХКРИТИЧЕСКОЙ CO <sub>2</sub> ЧЕРЕЗ ЗЕРНИСТЫЙ СЛОЙ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ Х. Ф. Джураев, Ш. У. Мирзаева.....	384
МЕТОДЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА МАСЛООБРАЗОВАНИЯ Ф. Х. Смольникова, Г. К. Наурзбаева, Н. Ж. Батырханова.....	392