

## ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ МЕТОД ИМПУЛЬСНОЙ СО<sub>2</sub>-ЭКСТРАКЦИИ

**С.М. СИЛИНСКАЯ, Е.В. ИНОЧКИНА**

*Краснодарский филиал Финансового университета при Правительстве РФ,  
350051, Российская Федерация, г. Краснодар,  
ул. Шоссе Нефтяников/ул. им. Федора Лузана, 32/34.*

Математические модели эффективно используются для исследования экономических явлений, с сочетанием математических и кибернетических методов. Исследование экономических явлений осуществляется с помощью арсенала экономико-математических моделей, которые значительно расширились с помощью кибернетического подхода к моделированию. В настоящее время не существует единой классификации экономико-математических моделей экстракционных технологий, которые будут созданы в обозримом будущем. Существующие модели практически не позволяют охватить все существующее многообразие социально-экономических задач организации экстракционных производств, объектов и процессов, описываемых различными методами, с одной стороны, а с другой стороны, процесс создания новых моделей настолько динамичный, что потребуются специальный механизм их сводки, далее даже получив объемный материал классификации и механизм его постоянного пополнения, будем иметь классификатор, которым будет крайне затруднительно пользоваться. Для выполнения поставленной цели потребуются использовать совокупность математических соотношений, уравнений, неравенств и т.п., описывающих основные закономерности, присущие изучаемому экстракционному процессу, объекту или системе.

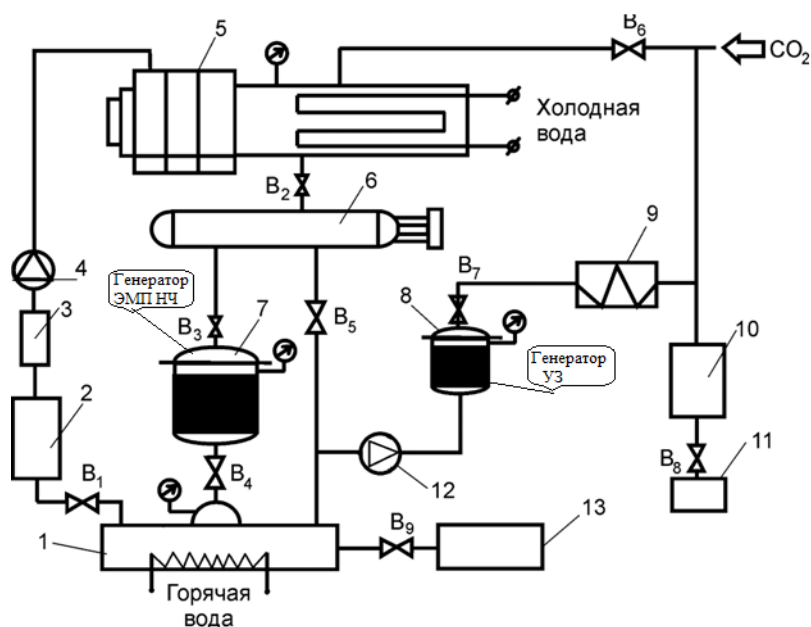
**Ключевые слова:** математические модели, процесс экстракции, массообмен.

Сущность интенсификации массообменных процессов с помощью воздействий ЭМП НЧ состоит в ускорении внешнего массообмена, обуславливаемого: ведением процесса во взвешенном слое частиц в жидкости, в создаваемом пульсациями режиме псевдооживления; уменьшением фильтрационного гидравлического сопротивления слоя твёрдых частиц в жидкости при пульсациях; увеличением интенсивности внешнего массообмена, вызываемого пульсационным смыванием взвешенных частиц; снижением толщины пограничного слоя у массообменных поверхностей при пульсациях; относительным перемещением твёрдых частиц, вызываемым пульсациями; увеличением градиента концентрации при пульсационном изменении направления обтекания частиц и другими факторами. Многие из них вытекают

из реализации соответствующих математических моделей и теоретического исследования механизма процесса.

Усовершенствованная установка для газожидкостной экстракции растительного сырья состоит из испарителя, газгольдера, водоотделителя, насосов высокого давления, конденсатора, накопителя  $\text{CO}_2$ , субкритического экстрактора, сверхкритического экстрактора, теплообменника, сепаратор и сборников  $\text{CO}_2$ -экстракта.

Заявленное устройство предназначено для извлечения ценных компонентов из растительного сырья способами суб и сверхкритической  $\text{CO}_2$ -экстракции. Оно отличается от ранее известных устройств возможностью последовательного извлечения экстрактивных веществ из растительного сырья диоксидом углерода в суб и сверхкритическом состоянии. Субкритическая экстракция проводится при давлении 5,4...6,4 МПа и температуре 18...25 °С. Сверхкритическая экстракция проводится при давлении 8...40 МПа и температуре 35...65 °С. На рисунке 1 приведена схема созданного авторами проекта комбинированного  $\text{CO}_2$ -экстракционного модуля.



1-испаритель, 2-газгольдер, 3-водоотделитель; 4,12 –насосы высокого давления, 5-конденсатор, 6-накопитель  $\text{CO}_2$ , 7-субкритический экстрактор, 8-сверхкритический экстрактор, 9-теплообменник, 10-сепаратор; 11,13-сборники  $\text{CO}_2$ -экстракта.  $V_1$ – $V_9$  – вентили.

Рисунок 1 – Комбинированный  $\text{CO}_2$ -экстракционный модуль

Перед началом работы в устройство из баллона через вентиль В<sub>6</sub> в конденсатор 5 подается очищенный от примесей газообразный диоксид углерода. Внутри конденсатора циркулирует холодная вода или тосол с температурой 5...7 °С, при которой происходит ожижение газообразного СО<sub>2</sub>. Через вентиль В<sub>2</sub> сжиженный газ поступает в накопитель 6, где экстрагент термостатируется и затем используется в качестве растворителя.

В субкритическом режиме устройство работает следующим образом:

Предназначенное для экстрагирования растительное сырье измельчается и лепесткуется на вальцах в лепесток толщиной 1-2 мм для придания лучших дренажных свойств сырью. Подготовленное таким образом сырье загружается в сетчатую кассету и помещается внутрь экстрактора 7. Экстрактор герметизируется с помощью самоуплотняющего люка и внутрь экстрактора через вентиль В<sub>3</sub> подается жидкий диоксид углерода из сборника-накопителя 6. В течение первых 20 мин растительное сырье в сетчатой кассете пропитывается жидким СО<sub>2</sub>, а затем через вентиль В<sub>4</sub> направляется в испаритель 1. Внутри корпуса испарителя циркулирует горячая вода с температурой 50...60 °С. При такой температуре жидкий СО<sub>2</sub> мгновенно вскипает и через вентиль В<sub>1</sub> в виде газа поступает в газгольдер 2. Газообразный СО<sub>2</sub>, пройдя через водоотделитель, с помощью насоса высокого давления, подается в конденсатор 5. Цикл субкритической экстракции может многократно повторяться. Освобожденный от растворителя СО<sub>2</sub>-экстракт через вентиль В<sub>9</sub> подается в сборник 13.

Необходимость второго этапа экстракции (сверхкритической) объясняется тем, что на первом этапе субкритической экстракции из сырья в СО<sub>2</sub>-экстракт перешла только часть легколетучих ароматических и вкусовых компонентов, а жирное масло и часть витаминов остались в шроте.

В сверхкритическом режиме устройство работает следующим образом:

Сетчатая кассета со шротом, после первого этапа экстракции, помещается внутрь сверхкритического экстрактора 8. Жидкий диоксид углерода из накопителя 6 через вентиль В<sub>5</sub> подается в испаритель 1, где за счет повышенной температуры (35...65 °С) СО<sub>2</sub> переходит во флюидное, сверхкритическое

состояние. Флюидный газ, с помощью насоса высокого давления, подается в нижнюю часть сверхкритического экстрактора 8 и через вентиль В<sub>7</sub> и теплообменник 9 поступает в сепаратор 10. В сепараторе 10 происходит разделение газовой мисцеллы на газовую фазу и СО<sub>2</sub>-экстракт. Газовая фаза через вентиль В<sub>6</sub> поступает в конденсатор 5 на компримирование.

Процесс в экстракторе заменяют реальный объект его математической моделью. Изменение концентрации экстрагируемого вещества в цилиндрическом экстракторе радиусом R можно описать уравнением Фурье–Кирхгофа

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \omega \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{D}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial C}{\partial r} \right) \quad (1)$$

где  $t$  – время;  $r, z$  – радиальная и продольная координаты;  $D$  – коэффициент радиальной (поперечной) диффузии;  $\omega$  – скорость течения в колонне.

В случае пульсирующего течения в колонне скорость течения наряду с постоянной составляющей будет иметь периодическую

$$\omega = \omega_0(1 + A \cos \omega t) \quad (2)$$

В (2) форма импульса принята косинусоидальной. Вопрос о влиянии формы импульса на интенсивность процесса и о выборе оптимальной формы имеет особое значение.

При переходе в (1) к безразмерным координатам применяются преобразования

$$\begin{aligned} \tau = F_0 = \frac{t_v}{R^2 \text{Pr}_D} = \frac{Dt}{R^2}; \quad X = \frac{1}{Pe_D} \frac{z}{R}; \\ \rho = \frac{r}{R}; \quad Pe_D = \frac{2R\omega_0}{D}; \quad Sh = \frac{wA}{\omega_0} \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\tau$  – температура,  $F_0 = \frac{a_0 \tau}{v^2}$  – число Фурье,  $v$  – плотность несущей среды.

В качестве граничных условий могут быть приняты в общем случае условия первого–третьего рода. Следует отметить условия, специфичные для данной задачи. К ним относится условие непроницаемости стенок аппарата

$$\left. \frac{\partial C}{\partial r} \right|_{r=R} = 0, \quad (4)$$

а также условие симметрии поля концентрации на оси аппарата

$$\left. \frac{\partial C}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad (5)$$

Можно также указать начальное условие

$$C(r, z, 0) = C_0 \quad (6)$$

и условие первого рода в начальном сечении на входе  $C(r, 0, \tau) = C_n$  или выходе  $C(r, l, \tau) = C_B$  (здесь  $l$  – длина экстрактора). В общем случае последнее условие может быть записано в виде

$$C(r, 0, \tau) = \varphi(\tau) \quad (7)$$

т. е. концентрация вещества на входе является известной функцией времени.

Инспекционный анализ уравнения пульсирующей экстракции даёт связь между комплексами

$$Nu_D = f(Re_D, Re_{п}, Re_0, Sh, F_0, Pr_D), \quad (8)$$

где  $Nu_D$ ,  $Re_D$ ,  $Sh$ ,  $F_0$  и  $Pr_D$  — соответственно критерии Нуссельта, Пекле, Струхалия, Фурье и Прандтля;  $Re_{п}$  и  $Re_0$  — критерии Рейнольдса, вычисленные по пульсационной и средней расходной скорости потока жидкости. Имея в виду, что  $Sh = Re_{п}/Re_0$ , один из критериев  $Re_{п}$ ,  $Re_0$  или  $Sh$  может быть исключён из (8).

Под действием пульсаций экстрагирующей жидкости в колонне твёрдые частицы, из которых извлекается экстрагируемое вещество, приходят во взвешенное состояние и гидравлическое сопротивление столба уменьшается, фильтрационная способность колонны возрастает, улучшаются условия смывания твёрдых частиц жидкостью, возрастает  $D$  и интенсифицируется процесс экстракции.

Можно оценить эффективность производства при различных сценариях развития завода по производству  $CO_2$ -экстрактов. Процесс разработки и использования модели из методических соображений удобно представить в

виде определенных этапов. Этапы моделирования – это виды работ. Моделирование можно представить как набор отдельных работ или их совокупностей. Степень детализации этих работ, сам набор их видов зависят от преследуемых целей. Следует выделить этапы моделирования, необходимые для практического использования при решении конкретных производственных задач.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бурда А.Г., Бурда Г.П. Экономико-математические методы и модели. – Краснодар: КубГАУ, 2015. – 40 с.
2. Введение в математическое моделирование. / Под ред. П.В. Трусова. – М.: Логос, 2005. - 440 с.
3. Касьянов Г.И., Мякинникова Е.И., Коробицын В.С. О целесообразности использования CO<sub>2</sub>-экстрактов в производстве мороженого//Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов. 2015. № 3 (32). С. 19-23.
4. Сязин И.Е., Касьянов Г.И. Особенности криообработки пищевых продуктов с использованием диоксида углерода //Холодильная техника. 2015. № 1. С. 39-42.

## REFERENCES

1. Burda A.G., Burda G.P. Ekonomiko-matematicheskie metody i modeli. – Krasnodar: KubGAU, 2015. – 40 s.
2. Vvedenie v matematicheskoe modelirovanie. / Pod red. P.V. Trusova. – M.: Logos, 2005. - 440 s.
3. Kasyanov G.I., Myakinnikova E.I., Korobitsyn V.S. O tselesoobraznosti ispolzovaniya SO<sub>2</sub>-ekstraktov v proizvodstve morozhenogo//Tekhnologiya i tovarovedenie innovatsionnykh pishchevykh produktov. 2015. № 3 (32). S. 19-23.
4. Syazin I.E., Kasyanov G.I. Osobennosti krioobrabotki pishchevykh produktov s ispolzovaniem dioksida ugleroda //Kholodilnaya tekhnika. 2015

*ECONOMIC-MATHEMATICAL METHODS PULSED CO<sub>2</sub>- EXTRACTION***S.M. SILINSKAYA, E.V. INOCHKINA**

*Krasnodar branch of the Financial University under the government of Russia,  
32/34, Highway Neftyanikov/ Fedora Luzana st., , Krasnodar, Russian Federation, 350051*

Mathematical models are used effectively for the study of economic phenomena, with a combination of mathematical and cybernetic methods. The study of economic phenomena is carried out using the Arsenal of economic and mathematical models that greatly expanded through the cybernetic approach to modeling. Currently there is no uniform classification of economic-mathematical models on the extraction technologies that will be developed in the foreseeable future. Existing models make it almost impossible to cover all the existing diversity of socio-economic objectives of the organization extractive industries, objects and processes described by different methods, on the one hand, and on the other hand, the process of creating new models is so dynamic that you will need a special mechanism for their reports, then even with the volume of material classification and the mechanism of its constant replenishment, we will have a classifier, which will be extremely difficult to use. To accomplish this goal you will need to use a set of mathematical relationships, equations, inequalities, etc. describing the basic laws inherent to the studied extraction process, object or system.

**Key words:** mathematical models, the extraction process, mass transfer.