

УДК 664  
ББК 36.81  
М-52

*Меретуков Заур Айдамирович, кандидат технических наук, докторант кафедры технологии, машин и оборудования пищевых производств Майкопского государственного технологического университета, e-mail: [zamer@radnet.ru](mailto:zamer@radnet.ru);*

*Кошевой Евгений Пантелеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой машины и аппараты пищевых производств Кубанского государственного технологического университета, e-mail: [Koshevoi@kubstu.ru](mailto:Koshevoi@kubstu.ru).*

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАТИКА СЖИМАЕМОСТИ СМЕСИ РАСТИТЕЛЬНОГО МАТЕРИАЛА С ДИОКСИДОМ УГЛЕРОДА (рецензирована)**

*Целью данной работы является получение на основании математического моделирования, численных значений основных параметров процесса деформирования смеси растительного материала и двуокиси углерода.*

*Ключевые слова: растительный материал, фазовый переход, экструзия, двуокись углерода, коэффициентов объемного расширения.*

*Meretukov Zaur Aydamirovich, Candidate Of Technical Sciences, assistant professor of Technology, Machines and Food Industry Equipment Department, Maikop State Technological University, e-mail: [zamer@radnet.ru](mailto:zamer@radnet.ru);*

*Koshevoi Eugene Panteleevich, Doctor Of Technical Sciences, Professor, Honoured Scientist of the Russian Federation, head of the Department of machines and equipment for food industry, Kuban State Technological University, e-mail: [Koshevoi@kubstu.ru](mailto:Koshevoi@kubstu.ru).*

## **MATHEMATICAL MODELLING OF THE STATICS OF COMPRESSIBILITY OF VEGETABLE MATERIAL AND CARBON DIOXIDE MIXTURE**

*The aim of this article is to obtain numerical values of key parameters of the deformation process of plant material and carbon dioxide mixture on the basis of mathematical modeling.*

*Key words: plant material, the phase transition, extrusion, carbon dioxide, thermal expansion coefficient.*

Получение пористых гранул в экструдере представляется эффективным способом подготовки растительных материалов к экстракции. Осуществить это возможно за счет «взрывного» характера расширения гранул на выходе из матрицы при интенсивном фазовом переходе, содержащегося в материале жидкого компонента.

Для обеспечения низких температур протекания процесса расширения экструдруемого материала предлагается использовать в качестве жидкого компонента двуокись углерода. Она вводится в обрабатываемый материал в виде твердой фазы, смешиваясь под атмосферным давлением на входе в экструдер [1]. Двуокись углерода специально вводится для достижения лучшего эффекта «взрыва» при подготовке материала к экстракции методом экструзии. При этом влага не учитывается, так как в данном случае ее влияние не существенно.

В экструдере при движении материала в винтовом канале происходит увеличение давления в предматричной зоне. В случае отсутствия устройств для отвода тепла, материал увеличивает свою температуру. При этом, из-за увеличения давления и температуры на обрабатываемый материал, происходит фазовый переход  $\text{CO}_2$ . Важно оценить плотность смеси растительного материала и двуокиси углерода, находящейся в межчастичном пространстве обрабатываемого материала при режимах экструдирования (температуре и давлении).

Чтобы изучить изменение плотности смеси растительного материала и двуокиси углерода в жидкой и паровой фазе в шнековом канале экструдера примем рабочую температуру  $T = 298\text{K}$  и широкий диапазон изменения давления в докритической области.

Для расчетов фазовых превращений в такой системе рекомендуется применять кубическое уравнение состояния Ван-дер-Ваальса в виде:

$$z^3 - (B + 1)z^2 + Az - AB = 0, \quad (1)$$

где  $B = \frac{bP}{RT}$  и  $A = \frac{aP}{(RT)^2}$

Известно предложение [2] применять для описания поведения твердофазных материалов (полимеров) модифицированное уравнение состояния Ван-дер-Ваальса

$$(P + \pi)(v - \omega) = R'T \quad (2)$$

где  $\pi$  – внутреннее давление ( $\pi = a/v^2 \approx a/b^2$ , предполагается, что  $\pi$  не зависит от объема);  $\omega$  – константа ( $\omega = b$ ).

С целью проверки применимости данного уравнения для моделирования поведения смесей растительного материала и двуокиси углерода преобразуем уравнение (2) к виду

$$v = \frac{R'T}{P + \pi} + \omega \quad (3)$$

и обработаем полученные экспериментальные данные по ромашке аптечной [3]. Результаты представлены на рисунке 1.

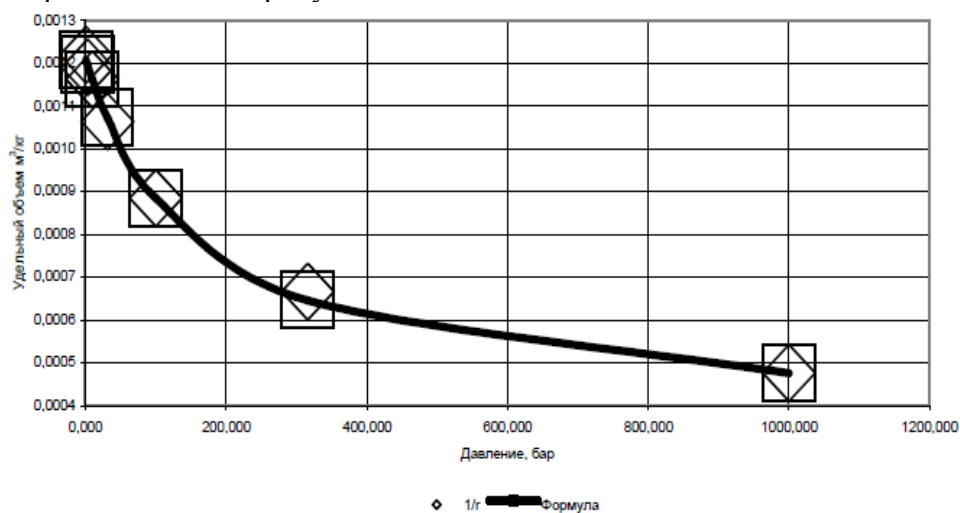


Рис. 1. Зависимость удельного объема ромашки аптечной от давления  
 ◇ - экспериментальные данные; □ - расчетные значения

При обработке получены следующие значения коэффициентов уравнения (2):  $\omega = 0,000357$ ;  $R'T = 0,137986$ ;  $\pi = 161,1565$ . Из рисунка 1 видна высокая точность описания, как экспериментальных значений, так и характера зависимости.

Для описания поведения смеси растительного материала с двуокисью углерода использовали уравнение состояния Ван-дер-Ваальса (1). При этом, следуя приведенному в работе [4] анализу фазовых переходов в прессуемом материале вводили некоторые допущения [3].

В начале были выполнены расчеты коэффициента сжимаемости при варьировании состава смеси и давления по уравнению (1).

Полученные данные по коэффициентам сжимаемости позволили выполнить расчеты плотности при варьировании состава смеси и давления для двух температур 298K и 308K. Результаты этих расчетов представлены на рисунках 2 и 3.

Характер зависимостей на рисунках 2 и 3 совпадает, в указанном диапазоне существенного влияния температура не оказывает.

Низкая плотность характерна для двуокиси углерода, и она резко возрастает уже при доле растительного материала в смеси 0,05-0,06.

При низких давлениях с ростом доли растительного материала в смеси плотность даже несколько понижается, однако с ростом давления плотность смеси растет, особенно при повышении доли материала в смеси до предельных значений.

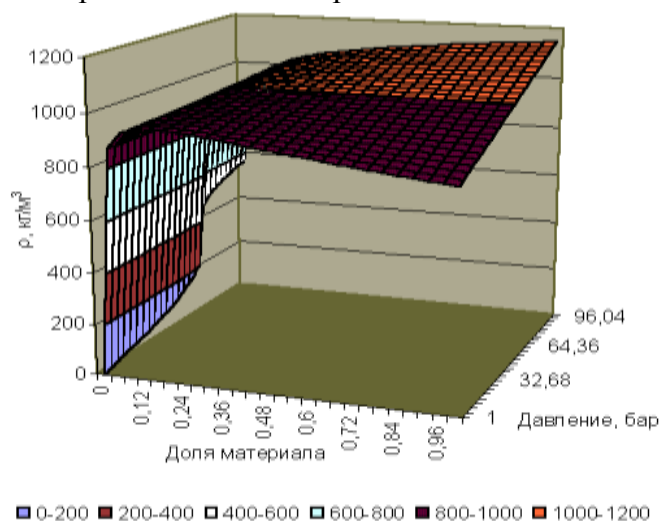


Рис. 2. Зависимость плотности от состава смеси растительный материал - двуокись углерода и давления при температуре 298K

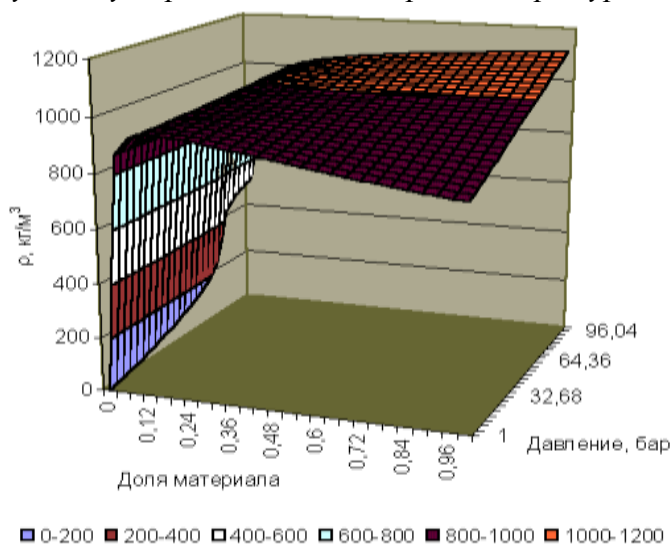


Рис. 3. Зависимость плотности от состава смеси растительный материал– двуокись углерода и давления при температуре 308K

Полученная модель поведения смеси в виде уравнения состояния позволяет оценить значение коэффициента объемного расширения от давления

$$\alpha_{pv} = \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_T = -\frac{1}{v} \left( \frac{\partial v}{\partial P} \right)_T \quad (4)$$

Для коэффициента объемного расширения от давления твердофазного растительного материала без подачи двуокиси углерода зависимость можно представить в виде

$$\alpha_{pv} = \frac{1}{(P + \pi) + (\phi / R'T)(P + \pi)^2}, \text{ бар}^{-1} \quad (5)$$

Выполненные расчеты по плотности смеси позволили рассчитать коэффициенты объемного расширения от давления. Аппроксимируя кубическими сплайнами расчетные данные по плотности и взяв производную и выполнив расчеты в соответствии с уравнением (4) получили возможность построить зависимости коэффициентов объемного расширения от состава смеси твердофазного растительного материала и двуокиси углерода при различных давлениях для двух температур 298K и 308K. Результаты расчетов представлены на рисунках 4 и 5.

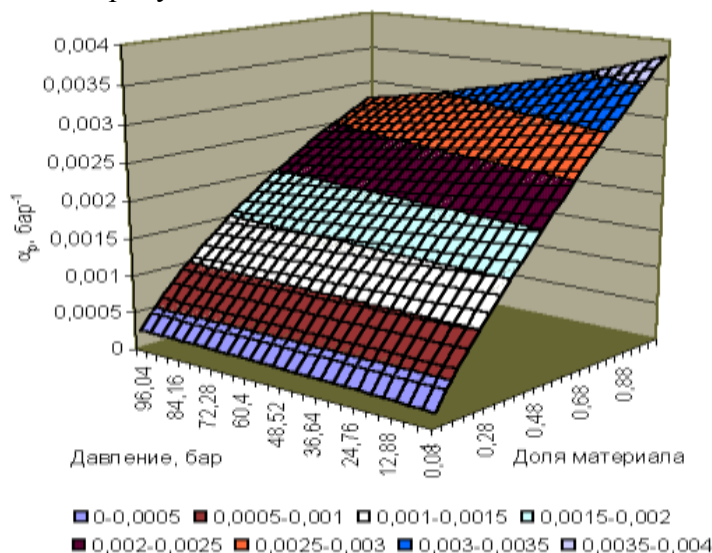


Рис. 4. Зависимость коэффициентов объемного расширения от состава смеси растительный материал – двуокись углерода и давления при температуре: 298K

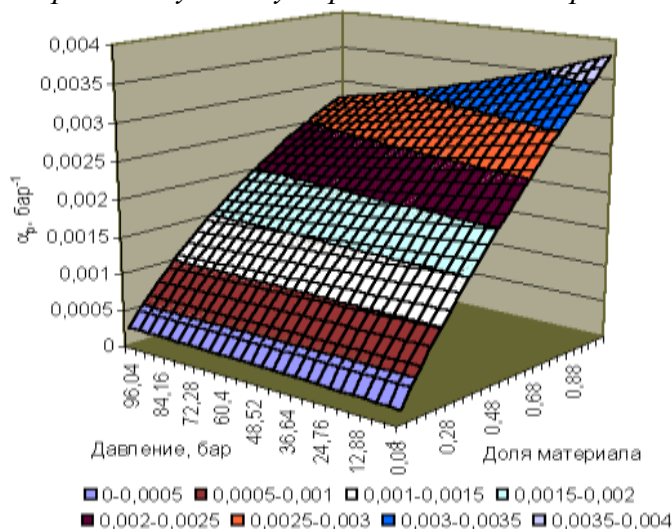


Рис. 5. Зависимость коэффициентов объемного расширения от состава смеси растительный материал – двуокись углерода и давления при температуре 308K

Для обеих температур характер зависимостей и значения коэффициентов объемного расширения, как видно из рисунков 4 и 5, практически одинаковые. Наибольший рост коэффициентов объемного расширения отмечается с ростом доли растительного материала в смеси.

С ростом давления отмечается некоторое снижение коэффициентов объемного расширения. С учетом связи  $\alpha_{pv} = \alpha_{p3}$  и размерностей согласование с данными, полученными при испытании экструдера [3], хорошее.

В результате проведенного моделирования получены численные значения основных параметров процесса деформирования смеси растительного материала и

двуокиси углерода. Можно отметить, что при небольшой доли в смеси двуокиси углерода можно получить свойства, требуемые для ведения процесса экструдирования смеси с последующим ее расширением.

#### **Литература:**

1. Установка для подготовки растительного материала к  $\text{CO}_2$ -экстракции: свидетельство на полезную модель №36830 / Кошевой Е.П., Меретуков З.А., Меретуков М.А., Латин Н.Н. Бюл. №9, 2004.

2. Бернхардт Э. Переработка термопластичных материалов: пер. с англ. М.: Химия, 1965. 748 с.

3. Меретуков З.А. Совершенствование подготовки растительного сырья к экстракции способом экструдирования: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12. Майкоп, 2004. 24 с.

4. Корнильев Н. Б., Груздев И. Э. Гидродинамический анализ течения высоковязких пищевых масс в шнековом канале // Известия вузов. Пищевая технология. 1975. №4. С. 104-107.