

*ИЗОТЕРМЫ СОРБЦИОННОЙ ВЛАЖНОСТИ ЭКСТРУДАТОВ  
НА ОСНОВЕ ФАСОЛИ*

**Т.В. ПЕТРОВА<sup>1</sup>, И.Ю. БАКАЛОВ<sup>1</sup>, М.М. РУСКОВА<sup>1</sup>, Н.Г. ТОШКОВ<sup>2</sup>,  
М.Ю. ТАМОВА<sup>3</sup>, Н.Д. ПЕНОВ<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Институт пищевых исследований и разработок,  
4000, Болгария, Пловдив, бул. Вассил Априлов, 154,  
электронная почта: dorrapetrova@abv.bg;*

<sup>2</sup>*Университет пищевых технологий,  
4000, Болгария, Пловдив, бул. Марица, 26,  
электронная почта: prepov@yahoo.com*

<sup>3</sup>*Кубанский государственный технологический университет,  
350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2.*

Определено равновесное влагосодержание для экструдатов на основе фасоли, полученных в различных условиях обработки при  $t=25^{\circ}\text{C}$  и шести значениях активности воды в диапазоне от 0,113 до 0,843, с помощью гравиметрического метода. Изотерма сорбции имеет на графике S-образную форму. Для анализа экспериментальных данных были использованы уравнения Чанга-Пфоста, Хэнси, Освина и Хэндерсона. Уравнение Освина являлось наиболее подходящим для описания зависимости между равновесным влагосодержанием и активностью воды. Содержание влаги монослоя экструдата было определено уравнением Брунауэра-Эммета-Тэллера.

**Ключевые слова:** сорбционная активность, экструдаты на основе фасоли, модифицированные (видоизмененные) уравнения Чанга-Пфоста, Хэнси, Освина и Хэндерсона.

Знание сорбционных характеристик является ключевым в получении пригодных пищевых продуктов, моделировании процессов сушки, конструкции сушильного оборудования, расчете изменений влагосодержания, которое может меняться в процессе хранения, и для выбора упаковочных материалов [1,2].

Зависимость между равновесным влагосодержанием (РВС) и активностью воды ( $a_w$ ) в продуктах при постоянной температуре выражается изотермой сорбции [3].

Примеры из литературы наводят на предположение, что существует зависимость между равновесным влагосодержанием и активностью воды [4].

Равновесное влагосодержание может быть определено как приближенное предельное значение влагосодержания материала после воздействия внешней среды, процесс которого протекает бесконечно во времени.

Активность воды определяется как отношение давления паров воды над данным продуктом к давлению паров над чистой водой при одной и той же температуре. Данное понятие является одной из основных переменных в технологии консервирования пищевых продуктов [5].

Существует возможность получения изотермы сорбционной влажности для процессов адсорбции и десорбции. В первом случае, образец получает воду из воздушной среды с высокой относительной влажностью, и во втором случае, образец выделяет влагу в воздух с низкой относительной влажностью [6,7].

Вычисление изменений значений сорбционной влажности экструдатов на основе фасоли важно при правильном выборе условий хранения. Сорбционные характеристики различных пищевых продуктов в настоящее время находятся в свободном доступе. Однако в литературе представлены ограниченные сведения о взаимосвязи равновесного влагосодержания и равновесной относительной влажности экструдированных продуктов.

Значение влагосодержания в монослое и соответствующая активность воды ( $a_{wm}$ ) являются важными параметрами при хранении пищевых продуктов и их порче.

Высокие значения  $a_w$  приводят к повышению скорости реакции в силу более высокой растворимости и повышенной мобильности. Если продукт чувствителен к окислению ненасыщенных жиров, продолжительность хранения уменьшается в соответствии с уменьшением  $a_w$  по отношению к  $a_{wm}$ . [6,8].

Целью данной работы являлось экспериментальное обоснование изотермы сорбции экструдатов из фасоли при 25°C; определить наиболее подходящее уравнение для описания изотермы и рассчитать влагосодержание монослоя.

Экспериментальные сырье и методы.

1. Сырье. Пшеница однозернянка и гречиха, выращенные и доставленные из деревни Ломец в части города Троян, Болгария. Фасоль сорта "Bivolare" выращена в Родопских горах, Болгария.

Семена фасоли, однозернянки и гречиха были измельчены с помощью молотковой мельницы и пропущены через стандартные сита для получения гомогенизированной субстанции. Муку из фасоли, однозернянки и гречихи смешали в соотношении 50:40:10 (вес/вес/вес). Образцы приготовленной смеси смешали с дистиллированной водой, чтобы получить различные значения влагосодержания (табл.1). Влажные материалы были помещены и хранились в запечатанных полиэтиленовых пакетах в течение 12 ч. в холодильнике при  $t=5^{\circ}\text{C}$ . Затем перед экструзией образцы в течение следующих 2 часов были доведены до комнатной температуры.

2. Экструзия. Образцы подверглись экструзии в лабораторном одношнековом экструдере (Brabender 20 DN, Germany) при различных параметрах процесса (табл. 4). Цилиндр экструдера (476,5 мм в длину и 20 мм в диаметре) содержит 3 секции и отдельно регулирующую формующую головку с электронагревателями.

Температура в зоне подачи и температура в зоне замера поддерживалась соответственно  $100^{\circ}\text{C}$  и  $140^{\circ}\text{C}$ . Скорость подающего шнека была зафиксирована на уровне 50 об/мин., диаметр штампа составлял 3 мм.

Таблица 1 – Условия протекания процесса экструзии

| № образца | Влажность [%] | Температура в цилиндре [ $^{\circ}\text{C}$ ] | Скорость вращения шнека [об/мин] | Степень сжатия винта |
|-----------|---------------|---|----------------------------------|----------------------|
| 1         | 16            | 160   | 160                              | 3:1                  |
| 2         | 28            | 160   | 160                              | 3:1                  |
| 3         | 22            | 120   | 160                              | 3:1                  |
| 4         | 22            | 200   | 160                              | 3:1                  |
| 5         | 22            | 160   | 120                              | 3:1                  |
| 6         | 22            | 160   | 200                              | 3:1                  |
| 7         | 22            | 160   | 160                              | 1:1                  |
| 8         | 22            | 160   | 160                              | 5:1                  |
| 9         | 22            | 160   | 160                              | 3:1                  |

3. Процедура. Равновесное влагосодержание определяли при  $t=25^{\circ}\text{C}$ . Был применен гравиметрический метод [9]. Для адсорбционного процесса экструдаты были дегидрированы в вакуумной сушильной камере при  $24^{\circ}\text{C}$  в

течение 24 часов (начальная влажность составила не более 1 % сухих веществ). Затем взвешенные образцы были помещены в гидростаты с насыщенными растворами солей (LiCl, CH<sub>3</sub>COOK, MgCl<sub>2</sub>, NaBr, NaCl, KCl), используемые для получения постоянной относительной влажности среды [10,11,12]. При значениях высокой активности воды ( $a_w > 0,7$ ) в гидростаты был помещен кристаллический тимол для предотвращения микробиологической порчи экструдатов [13]. Гидростаты находились в термостате при температуре  $25 \pm 0,1^\circ\text{C}$ . Образцы взвешивались (весы, погрешность  $\pm 0,0001$  г) каждые три дня. Измерение происходило до тех пор, пока разница трех последующих результатов отличалась не более чем на 0,001 г. Содержание влаги в каждом образце определяли с помощью электронных весов "Sartorius" (температура  $100^\circ\text{C}$  до постоянного веса). Равновесное влагосодержание определяли с помощью трех измерений.

Анализ данных. Соотношение  $PBC/a_w$  было проверено путем применения следующих модифицированных уравнений:

$$\text{Чанг-Пфост} \quad \ln(a_w) = -A \cdot \exp(-B \cdot M) \quad (1)$$

$$\text{Хэлси} \quad a_w = -\exp\left(-A \cdot M^B\right) \quad (2)$$

$$\text{Освин} \quad M = A \cdot \left(\frac{a_w}{1 - a_w}\right)^B \quad (3)$$

$$\text{Хэндерсон} \quad \ln(1 - a_w) = -A \cdot M^B \quad (4)$$

где  $M$  - это влагосодержание (%);  $a_w$  активность воды (десятичная система);  $A, B$  - коэффициенты.

Программа нелинейной регрессии методом наименьших квадратов была использована, чтобы найти соответствующие уравнения экспериментальным данным. Пригодность уравнений оценивали и сравнивали с использованием средней относительной погрешности (MRE, %), стандартной ошибки влажности (SEM) и разницы ( $e$ ) [14]:

$$MRE = \frac{100}{N} \sum \left| \frac{M_i - \hat{M}_i}{M_i} \right| \quad (5)$$

$$SEM = \sqrt{\frac{\sum (M_i - \hat{M}_i)^2}{df}} \quad (6)$$

$$e = M_i - \hat{M}_i \quad (7)$$

Влагосодержание монослоя ( $M_m$ ) было рассчитано с помощью уравнения Брунауэра-Эммета-Тэллера (БЭТ) [15] и экспериментальные данные активности воды возросли до 0.45 [6]:

$$M = \frac{M_m C a_w}{(1 - a_w)(1 - a_w + C a_w)} \quad (8)$$

где  $C$  - коэффициент.

Значение равновесного влагосодержания (РВС) соответствует содержанию влаги в монослое  $a_{wm}$ , которое было определено в уравнении (8) после подстановки  $M = M_m$  [16]:

$$a_{wm} = \frac{\sqrt{C} - 1}{C - 1} \quad (9)$$

Результаты и обсуждение.

На рисунке 1 приведены экспериментальные данные, полученные после адсорбции выполненного экструдата на основе фасоли при температуре 25 °С. Полученные средние значения РВС основаны на трехкратных измерениях для соответствующей активности воды. Сорбционные изотермы имеют профили S-образной формы, аналогичные для нативного материала [17]. Согласно классификации БЭТ полученные изотермы типичны для экструдатов типа II. Подобные изотермы для пищевых материалов были описаны в литературе [18, 19].

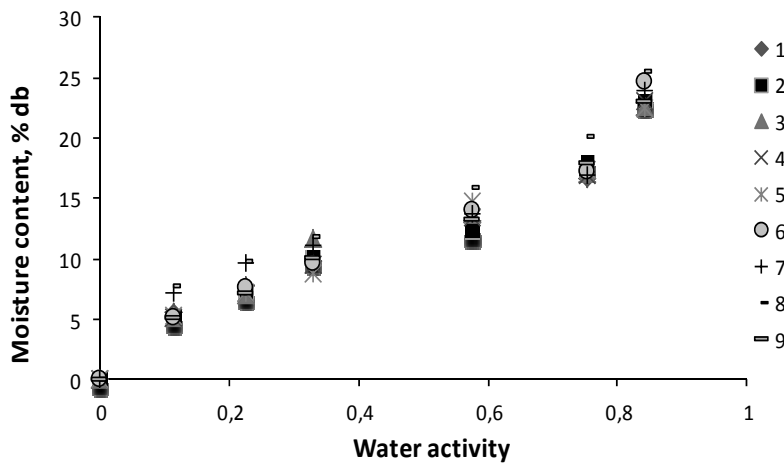


Рисунок 1 – Адсорбционные изотермы экструдатов на основе фасоли при 25°C

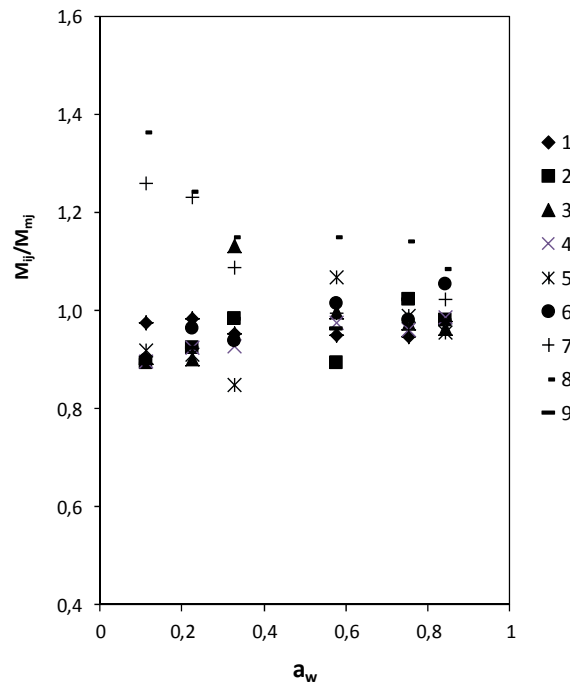


Рисунок 2 – Изменение соотношения между измеренным содержанием влаги и выборочное среднее содержание влаги ( $M_{ij} / M_{MJ}$ ) с изменением активности ВОДЫ

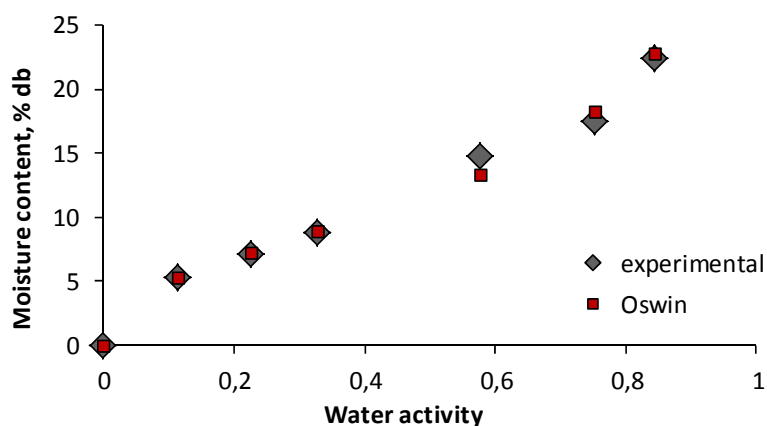


Рисунок 3 – Адсорбционные изотермы экструдатов на основе фасоли (образец 5) при 25°С по уравнению Освина

Таблица 2 – Равновесное влагосодержание (M, % d.b.), полученное путем адсорбции при различных значениях активности воды (aw в десятичной системе) для экструдатов на основе фасоли при 25°С

| $a_w$            | 0.113 | 0.225 | 0.328 | 0.576 | 0.753 | 0.843 |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <i>Образец 1</i> |       |       |       |       |       |       |
| $M^*$            | 5.55  | 7.71  | 9.79  | 13.10 | 16.65 | 22.95 |
| $S.D.^{**}$      | 0.003 | 0.004 | 0.001 | 0.01  | 0.004 | 0.01  |
| <i>Образец 2</i> |       |       |       |       |       |       |
| $M^*$            | 5.08  | 7.25  | 10.12 | 12.31 | 18.02 | 23.04 |
| $S.D.^{**}$      | 0.01  | 0.01  | 0.01  | 0.02  | 0.004 | 0.01  |
| <i>Образец 3</i> |       |       |       |       |       |       |
| $M^*$            | 5.13  | 7.09  | 11.67 | 13.76 | 17.16 | 22.61 |
| $S.D.^{**}$      | 0.01  | 0.01  | 0.04  | 0.03  | 0.01  | 0.03  |
| <i>Образец 4</i> |       |       |       |       |       |       |
| $M^*$            | 5.10  | 7.25  | 9.54  | 13.47 | 16.91 | 23.14 |
| $S.D.^{**}$      | 0.01  | 0.08  | 0.17  | 0.08  | 0.02  | 0.09  |
| <i>Образец 5</i> |       |       |       |       |       |       |
| $M^*$            | 5.22  | 7.13  | 8.72  | 14.74 | 17.43 | 22.43 |
| $S.D.^{**}$      | 0.1   | 0.07  | 0.097 | 0.095 | 0.11  | 0.07  |
| <i>Образец 6</i> |       |       |       |       |       |       |
| $M^*$            | 5.11  | 7.57  | 9.66  | 13.98 | 17.28 | 24.73 |
| $S.D.^{**}$      | 0.01  | 0.12  | 0.09  | 0.098 | 0.09  | 0.09  |
| <i>Образец 7</i> |       |       |       |       |       |       |
| $M^*$            | 7.15  | 9.66  | 11.18 | 13.74 | 16.92 | 24.01 |
| $S.D.^{**}$      | 0.15  | 0.12  | 0.11  | 0.11  | 0.19  | 0.10  |
| <i>Образец 8</i> |       |       |       |       |       |       |
| $M^*$            | 7.75  | 9.74  | 11.83 | 15.87 | 20.10 | 25.50 |
| $S.D.^{**}$      | 0.1   | 0.08  | 0.16  | 0.09  | 0.05  | 0.1   |
| <i>Образец 9</i> |       |       |       |       |       |       |
| $M^*$            | 5.07  | 7.25  | 10.12 | 13.29 | 18.02 | 23.04 |
| $S.D.^{**}$      | 0.14  | 0.11  | 0.15  | 0.16  | 0.11  | 0.12  |

\* Среднее из трех повторных опытов

\*\* Стандартные отклонения, основанные на трех повторных опытах

Коэффициенты для четырех уравнений, значения средней относительной погрешности (MRE,%), стандартной ошибки влажности (SEM) представлены в таблице 3. Значения MRE и SEM, полученные уравнением Освина были меньше. Поэтому мы рекомендуем модифицированное уравнение Освина для описания изотерм экструдатов на основе фасоли.

Таблица 3 – Расчетные значения коэффициентов (A, B), относительной погрешности (MRE,%), а также стандартной ошибки влажности (SEM) для экструдатов на основе фасоли.

| Образец № | Параметр   | Уравнения   |          |         |           |
|-----------|------------|-------------|----------|---------|-----------|
|           |            | Chung-Pfost | Halsey   | Oswin   | Henderson |
| 1         | <i>A</i>   | 4.6688      | 66.6997  | 11.9496 | 0.0041    |
|           | <i>B</i>   | 0.1529      | -1.8917  | 0.3599  | 2.0127    |
|           | <i>MRE</i> | 6.68        | 6.33     | 3.79    | 5.31      |
|           | <i>SEM</i> | 1.21        | 0.96     | 0.86    | 1.42      |
| 2         | <i>A</i>   | 4.2300      | 44.6163  | 11.8118 | 0.0062    |
|           | <i>B</i>   | 0.1449      | -1.7374  | 0.3885  | 1.8563    |
|           | <i>MRE</i> | 6.89        | 7.08     | 4.59    | 6.13      |
|           | <i>SEM</i> | 1.15        | 1.24     | 0.81    | 1.30      |
| 3         | <i>A</i>   | 4.7617      | 44.6253  | 12.1375 | 0.0057    |
|           | <i>B</i>   | 0.1511      | -1.7168  | 0.3767  | 1.8703    |
|           | <i>MRE</i> | 6.96        | 11.98    | 7.78    | 7.42      |
|           | <i>SEM</i> | 1.37        | 2.40     | 1.42    | 1.46      |
| 4         | <i>A</i>   | 4.2853      | 45.7687  | 11.7611 | 0.0060    |
|           | <i>B</i>   | 0.1468      | -1.7511  | 0.3881  | 1.8745    |
|           | <i>MRE</i> | 5.42        | 7.87     | 3.69    | 4.65      |
|           | <i>SEM</i> | 1.07        | 1.23     | 0.76    | 1.22      |
| 5         | <i>A</i>   | 4.3614      | 43.5452  | 11.7823 | 0.0063    |
|           | <i>B</i>   | 0.1476      | -1.7296  | 0.3926  | 1.8528    |
|           | <i>MRE</i> | 5.19        | 7.42     | 3.39    | 5.08      |
|           | <i>SEM</i> | 0.79        | 1.66     | 0.86    | 0.85      |
| 6         | <i>A</i>   | 3.9856      | 42.7941  | 12.1460 | 0.0065    |
|           | <i>B</i>   | 0.1357      | -1.7015  | 0.3986  | 1.8196    |
|           | <i>MRE</i> | 7.19        | 8.56     | 4.61    | 4.92      |
|           | <i>SEM</i> | 1.42        | 1.34     | 1.02    | 1.56      |
| 7         | <i>A</i>   | 6.1306      | 230.6497 | 13.3418 | 0.0012    |
|           | <i>B</i>   | 0.1599      | -2.2897  | 0.2939  | 2.4080    |
|           | <i>MRE</i> | 8.78        | 6.08     | 5.61    | 7.35      |
|           | <i>SEM</i> | 1.66        | 1.13     | 1.43    | 1.92      |
| 8         | <i>A</i>   | 6.2202      | 218.5031 | 14.5953 | 0.0012    |
|           | <i>B</i>   | 0.1465      | -2.1936  | 0.3135  | 2.3189    |
|           | <i>MRE</i> | 3.56        | 3.50     | 1.95    | 4.95      |
|           | <i>SEM</i> | 0.82        | 0.66     | 0.52    | 1.22      |
| 9         | <i>A</i>   | 4.3723      | 44.1768  | 11.9688 | 0.0061    |
|           | <i>B</i>   | 0.1457      | -1.7242  | 0.3921  | 1.8534    |
|           | <i>MRE</i> | 4.91        | 7.99     | 3.73    | 4.78      |
|           | <i>SEM</i> | 0.82        | 1.43     | 0.63    | 0.96      |



Рисунок 3 отражает экспериментальные результаты при 25°C одного из образцов (образец 5) вместе с предсказанной кривой на основе наиболее подходящего уравнения, а именно Освина. Влажосодержание монослоя  $M_m$ , и соответствующая активность воды  $a_{wm}$  представлены в таблице 4. Значения влажосодержания монослоя образцов экструдатов варьируется от 6.47 до 10.18 % d.b. Мы рекомендуем значение  $a_{wm}$  в диапазоне от 0.2 до 0.3 как оптимальное для хранения экструдатов на основе фасоли.

Таблица 4 – Значения влажосодержания монослоя образцов ( $M_m$ , % d.b.) и соответствующей относительной влажности ( $a_{wm}$  в десятичной системе) для экструдатов на основе фасоли

| Образец № | $M_m$ | $a_{wm}$ |
|-----------|-------|----------|
| 1         | 7.45  | 0.207    |
| 2         | 8.22  | 0.252    |
| 3         | 10.18 | 0.300    |
| 4         | 7.49  | 0.228    |
| 5         | 6.47  | 0.183    |
| 6         | 7.67  | 0.229    |
| 7         | 8.07  | 0.151    |
| 8         | 8.41  | 0.146    |
| 9         | 8.22  | 0.253    |

#### Заключение.

Равновесное влажосодержание экструдатов на основе фасоли определено гравиметрическим методом при 25°C. К экспериментальным данным было подобрано четыре уравнения. Уравнение Освина является наиболее точным для описания взаимосвязи равновесного влажосодержания и активности воды. Влажосодержание монослоя находится в диапазоне от 6.47 до 10.18 %. Мы рекомендуем следующие значения активности воды в диапазоне от 0.2 до 0.3 как наиболее оптимальные для хранения экструдатов на основе фасоли.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Балул Х., Бодриу Х., Кечао Х. Изотермы десорбционной-адсорбционной влажности и изостерические теплоты сорбции тунисских оливковых листьев (*Olea еигораеа* L.) // Промышленные и сельскохозяйственные культуры и продукты 28 (2008) №2, 162-176.

2. Морейра Р., Ченло Ф., Торрес М., Прието Д. Адсорбция воды и десорбция изотермы каштановых и пшеницы муки // Промышленные и сельскохозяйственные культуры и продукты 32 (2010) №3, 252-257.

3. Иглесиас Х., Чириф Д., Фонтена Ф. Температурная зависимость изотерм сорбции воды от пищевых материалов // Журнал Food Science 51 (1986) 551-553.

4. Ван дер Берг С., Бруин С. Активность воды и ее оценка в пищевых системах: теоретические аспекты. В: Л.Б. Роэклэнд и Д.Ф. Стюарт, активность воды: факторы, влияющие на качество еды, Academic Press, Лондон, 1981, 189-200.

5. МакМинн В., Маги Т. Изучение влияния температуры на характеристики сорбционной влажности картофеля // Журнал пищевой инженерии 22 Process (1999) 113-128.

6. Белл Л., Лабуза Т. В: Сорбция влажности: практические аспекты измерения изотермы и ее использования, Американская ассоциация зерновых химиков, Сент-Пол, штат Миннесота, 2000, 33-56.

7. Рукорел Ф., Рукорел Д., Кеннет С. Адсорбция порошков и пористых твердых тел: принципы, методология и приложения, Academic Press, Сан Диего, 1999.

8. Меньков Н., Динков К., Дуракова А., Тошков Н. Сорбционные характеристики зерна гречихи // болгарский журнал сельскохозяйственной науки 15 (2009) №4, 281-285.

9. Спайс У., Вольф В. Критическая оценка методов определения изотермы сорбционной влажности. В: Роклэнд, Л. и Бичат Л., водная активность: теория и приложения к пище, Марсель Деккер, Нью-Йорк, 1987, 215-234.

10. Гринспен Л. Влажностные неподвижные точки бинарных насыщенных водных растворов // Журнал исследований Национального бюро стандартов - Секция А. Физика и химия 81 А (1977) 89-96.

11. Марулис З., Цами Е., Маринос-Курис Д., Саравакос Г. Применение модели GAB к изотерме влажности для сухофруктов // Журнал пищевой инженерии 7 (1988) 63-80.

12. Вайсер Н. Влияние температуры на изотермы. В: Ле Магер, М. и Джелен П., пищевые производства и технологические применения, Elsevier, Нью-Йорк, 1986, 189-200.

13. Вольф В., Спайс В., Юнг Г. Стандартизация изотерм измерений (стоимость проекта 90 и 90 бис). В: Стиматос, Д. и Мултон, Д., Свойства воды в пищевых продуктах в отношении качества и стабильности Nijhoff, Publishers, Dordrecht, 1985, 661-679.

14. Чен С., Мори Р. Сравнение четырех EMC / ERH уравнений // Труды Американского общества инженеров сельского хозяйства 32 (1989) 983-989.

15. Брунауэра С., Эммет П., Теллер Е. Адсорбция газов в мультимолекулярных слоях // Журнал Американского химического общества 60 (1938) 309-319.

16. Иглесиас Н., Чириф Д. БЭТ Значения монослоя в обезвоженных продуктах питания и пищевые компоненты // *Lebensmittel-Wissenschaft und -Technologie* 9 (1976) 107-113.

17. Меньков Н., Дуракова А., Крастева А. Изотермы сорбционной влажности муки фасоли при различных температурах // *Электронный журнал окружающей среды, сельского хозяйства и пищевой химии* 4 (2005) № 2, 892-898.

18. Меньков Н. Изотермы сорбционной влажности семян чечевицы при различных температурах // *Журнал пищевой инженерии* 44 (2000) 205-211.

19. Меньков Н., Дуракова А., Крастева А. Изотермы сорбционной влажности ореховой муки при различных температурах // *Биотехнология и биотехнологические оборудование* 18 (2004) №3, 201-206.

#### REFERENCES

1. Bahloul N., Boudhrioua N., Kechaou N. Moisture desorption-adsorption isotherms and isosteric heats of sorption of tunisian olive leaves (*Olea europaea* L.) // *Industrial Crops and Products* 28 (2008) №2, 162-176.

2. Moreira R., Chenlo F., Torres M., Prieto D. Water adsorption and desorption isotherms of chestnut and wheat flours // *Industrial Crops and Products* 32 (2010) №3, 252-257.

3. Iglesias H., Chirife J., Fontan F. Temperature dependence of water sorption isotherms of food materials // *Journal of Food Science* 51 (1986) 551-553.

4. Van der Berg C., Bruin S. Water activity and its estimation in food systems: theoretical aspects. In: L.B. Rockland and G.F. Stewart, *Water Activity: Influences on Food Quality*, Academic Press, London, 1981, 189-200.

5. McMinn W., Magee T. Studies on the effect of temperature on the moisture sorption characteristics of potatoes // *Journal of Food Process Engineering* 22 (1999) 113-128.

6. Bell L., Labuza T. In: *Moisture sorption: Practical aspects of isotherm measurement and use*, American Association of Cereal Chemists, St. Paul, MN, 2000, 33-56.

7. Rouquerol F., Rouquerol J., Kenneth S. *Adsorption by powders and porous solids: principles, methodology and applications*, Academic Press, San Diego, 1999.

8. Menkov N., Dinkov K., Durakova A., Toshkov N. Sorption characteristics of buckwheat grain // *Bulgarian Journal of Agricultural Science* 15 (2009) №4, 281-285.
9. Spiess W., Wolf W. Critical evaluation of methods to determine moisture sorption isotherms. In: Rockland, L. and Beuchat L., *Water activity: theory and applications to food*, Marcel Dekker, New York, 1987, 215-234.
10. Greenspan L. Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions // *Journal of Research of the National Bureau of Standards – Section A. Physics and Chemistry* 81 A (1977) 89-96.
11. Maroulis Z., Tsami E., Marinos-Kouris D., Saravacos G. Application of the GAB model to the moisture sorption isotherms for dried fruits // *Journal of Food Engineering* 7 (1988) 63-80.
12. Weisser H. Influence of temperature on sorption isotherms. In: Le Maguer, M. and Jelen, P., *Food engineering and process applications*, Elsevier, New York, 1986, 189-200.
13. Wolf W., Spiess W., Jung G. Standardization of isotherm measurements (cost-project 90 and 90 bis). In: Stamatos, D. and Multon, J., *Properties of water in foods in relation to quality and stability*, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, 1985, 661-679.
14. Chen C., Morey R. Comparison of four EMC/ERH equations // *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 32 (1989) 983-989.
15. Brunauer S., Emmett P., Teller E. Adsorption of gases in multimolecular layers // *Journal of the American Chemical Society* 60 (1938) 309-319.
16. Iglesias H., Chirife J. B.E.T. Monolayer values in dehydrated foods and food components // *Lebensmittel-Wissenschaft und – Technologie* 9 (1976) 107-113.
17. Menkov N., Durakova A., Krasteva A. Moisture sorption isotherms of common bean flour at several temperatures // *Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry* 4 (2005) № 2, 892-898.
18. Menkov N. Moisture sorption isotherms of lentil seeds at several temperatures // *Journal of Food Engineering* 44 (2000) 205-211.
19. Menkov N., Durakova A., Krasteva A. Moisture sorption isotherms of walnut flour at several temperatures // *Biotechnology & Biotechnological Equipment* 18 (2004) №3, 201-206.

*MOISTURE SORPTION ISOTHERMS OF BEAN-BASED EXTRUDATES*

**T.V. PETROVA<sup>1</sup>, I.Y. BAKALOV<sup>1</sup>, M.M. RUSKOVA<sup>1</sup>, N.G. TOSHKOV<sup>2</sup>,  
M.YU TAMOVA<sup>3</sup>, N.D. PENOV<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Food Research and Development Institute?  
154, Vassil Aprilov Blvd, Plovdiv, Bulgaria, 4000,  
e-mail: dorrapirova@abv.bg.*

<sup>2</sup>*University of Food Technologies ,  
26, Maritza Blvd, Plovdiv, Bulgaria, 4000,  
e-mail: npenov@yahoo.com*

<sup>3</sup>*Kuban State Technological University  
2, Moskovskaya st., Krasnodar, Russian Federation, 350072.*

The equilibrium moisture contents were determined for bean-based extrudates produced under different processing conditions at a temperature of 25°C and six water activities in the range of 0.113 – 0.843 using a static gravimetric method. The sorption isotherms have S-shape profiles. Four models – Chung-Pfost, Halsey, Oswin, and Henderson equations were applied for analyzing the experimental data. The Oswin model was most suitable for describing the relationship between equilibrium moisture content and water activity. The monolayer moisture content of the extrudate was estimated using the Brunauer-Emmett-Teller equation. The optimal storage water activity was proposed.

**Key words:** sorption isotherms; Bean-based extrudates; Modified Chung-Pfost, Halsey, Oswin, and Henderson models.