

## **ПЕРАПРАЦОЎКА І ЗАХАВАННЕ СЕЛЬСКАГАСПАДАРЧАЙ ПРАДУКЦЫІ**

УДК 664.723

*В. А. ШАРШУНОВ, А. А. СМОЛЯК, А. В. ЕВДОКИМОВ*

### **РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ВЛАГООБМЕНА ПРИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ПРОРАЩЕННОГО ЗЕРНА В КОМБИНИРОВАННОЙ СУШИЛКЕ-ДИСПЕРГАТОРЕ**

*Могилевский государственный университет продовольствия*

*(Поступила в редакцию 04.04.2011)*

Перспективным направлением расширения ассортимента хлебобулочных изделий является производство хлеба с добавлением муки, полученной из пророщенных зерновых культур, в которых рационально используются все питательные вещества, заложенные в зерно природой. Данный продукт по пищевой и биологической ценности превосходит все традиционные сорта хлеба и является важнейшим источником пищевых волокон, витаминов, микроэлементов и аминокислот [1].

В настоящее время на предприятиях мукомольной и хлебопекарной отрасли из высоковлажного зернового сырья (пророщенного зерна) продукты получают методом кратковременного воздействия мощного инфракрасного излучения с последующим измельчением, в случае необходимости, на вальцовых станках. Значительно более эффективным направлением совершенствования как технологий, так и самого оборудования является совмещение сушки и измельчения в одном технологическом процессе переработки зерна. Данный процесс является более эффективным, поскольку позволяет значительно сократить продолжительность обработки материала по сравнению с традиционными способами, а значит снизить энергоемкость и себестоимость процесса.

Термомеханическая обработка зерна в сушилке-диспергаторе представляет собой нестационарный массообменный процесс, при котором одновременно изменяется влажность продукта и размер его частиц. Многофакторность процесса делает затруднительным теоретическое описание изменения влажности частиц зерна во времени. При исследовании совмещенных технологических процессов измельчения и сушки часто необходимо знать влажность дисперсных частиц в процессе термомеханической обработки продукта. Однако надежных методов для расчета процесса влагообмена в таких задачах практически нет, что объясняется сложной физической картиной протекания процессов.

Изменение влажности зерна в процессе сушки тесно связано с распределением температурного поля в зерновке. Аналитическое определение поля влагосодержания связано с необходимостью решения системы дифференциальных уравнений А. В. Лыкова [2, 3]. Сложные зависимости между параметрами сушки и коэффициентами уравнения тепло- и влагопереноса затрудняют его решение.

В доступных литературных источниках [4, 5] приведены исследования влажности обрабатываемого материала от времени пребывания, без учета изменения размеров его частиц, причем влажность материала редко превышает 20%, влажность же пророщенного зерна может превышать 45%.

Поэтому аналитическое описание зависимости влажности муки из пророщенного зерна, получаемой в процессе термомеханической обработки в сушилке-диспергаторе, от различных факторов на основе обработки экспериментальных данных с использованием теории подобия является актуальной научной и практической задачей.

Цель работы – получение расчетной зависимости для определения влажности получаемого пищевого порошка в зависимости от времени его обработки в комбинированной сушилке-диспергаторе.

**Материалы и методы исследования.** На кафедре «Прикладная механика» Могилевского государственного университета продовольствия разработана экспериментальная установка, позволяющая одновременно проводить сушку и измельчение зерновых культур и получать готовые пищевые добавки в виде порошка.

Объект исследования – проращенное зерно ржи, обработанное в сушилке-диспергаторе при температуре сушильного агента 80–100 °С. Использование сушилок взвешенного слоя с малым временем пребывания в зоне термообработки позволяет вести сушку даже при более высоких температурах без потери качества готового продукта, сохраняя при этом биологически ценные вещества исходного сырья.

Основной частью конструкции сушилки-диспергатора является вихревая камера со встроенным роторным измельчителем, выполненным в виде пакета ножей. Схема и описание принципа работы экспериментальной установки, позволяющей совмещать в одном рабочем объеме измельчение и сушку высоковлажных пищевых материалов, подробно изложены в работе [6].

В качестве контрольно-измерительной аппаратуры при проведении исследований на экспериментальной установке использовали следующие приборы и оборудование:

анемометр testo–435, обладающий функцией цифрового регистратора, применяли для измерения давления, скорости и объемного расхода воздушного потока на входе, выходе и во внутреннем пространстве установки. Прибор позволяет проводить измерение давления с точностью до 0,01 Па, а скорости воздушного потока – с точностью до 0,1 м/с;

логгер testo 177–Т4 применяли для определения температуры газодисперсной смеси в экспериментальной установке. Данный прибор имеет четыре внешних измерительных канала. Разрешение прибора составляет 0,1 °С. Погрешность логгера в диапазоне измеряемых температур составила ±0,5% от измеряемой величины;

электронный анализатор влажности Sartorius MA 45 применяли для определения значений начальной и конечной влажности перерабатываемого продукта. Характеристики прибора позволяют отслеживать изменение веса пробы с точностью до 0,001 г, а дискретность показаний отсчета влажности – с точностью до 0,01%;

электронные весы Adventurer (фирма OHAUS) использовали для взвешивания материала, характеризующего удерживающую способность  $q_0$  вихревой камеры. Точность показаний прибора составляет 0,01 г.

В табл. 1 приведены сведения по значениям технологических параметров процесса термомеханической обработки зерна в сушилке-диспергаторе.

Таблица 1. Параметры процесса термомеханической обработки

Начальная влажность материала, %	Начальная температура сушильного агента, °С	Удельная производительность установки, кг/м <sup>3</sup> ·ч	Частота вращения роторного измельчителя, об/мин	Удельный расход воздуха, м <sup>3</sup> /кг
33, 36, 39, 42, 45	80, 90, 100	1364, 1591, 1818, 2046, 2273	1845, 1920, 1995, 2070, 2145, 2595	29; 25; 22; 19,5; 17,6

Удельную производительность установки определяли по формуле  $G_{уд} = \frac{G}{V_{в.к}}$ , где  $G$  – часовая производительность установки по готовому продукту, кг/ч;  $V_{в.к}$  – объем вихревой камеры установки, м<sup>3</sup>.

**Результаты и их обсуждение.** В процессе нестационарной диффузии влаги для каждой точки тела влажность определяется суммой бесконечного ряда, по аналогии с теорией нестационарной теплопроводности [7]:

$$w = \sum_{n=1}^{\infty} C_i \cdot e^{-\mu_i Fo}, \quad (1)$$

где  $w$  – безразмерная влажность материала;  $Fo$  – диффузионное число Фурье;  $C$  – коэффициент, зависящий от условий массоотдачи с поверхности частиц и координат точки;  $\mu$  – коэффициент, зависящий от условий массоотдачи с поверхности частиц.

Безразмерная влажность определяется как

$$w = \frac{W_k - W_p}{W_n - W_p} \quad (2)$$

( $W_k$ ,  $W_n$ ,  $W_p$  – конечная, начальная и равновесная влажность продукта соответственно, %).

Предельной влажностью, к которой стремится влажность высушиваемого продукта, является равновесная влажность  $W_p$ . Таким образом разность  $W_k - W_p$  в выражении (2) представляет собой конечную избыточную влажность, а  $W_n - W_p$  – начальную избыточную влажность.

Диффузионное число Фурье определяется из выражения

$$Fo = \frac{a_m t}{d^2}, \quad (3)$$

где  $a_m$  – коэффициент диффузии влаги, м<sup>2</sup>/с;  $t$  – время пребывания частицы в установке, с;  $d$  – определяющий размер обрабатываемого материала, м.

При некотором значении числа Фурье для математического описания процесса достаточно первого члена ряда:

$$w = C e^{-\mu Fo}. \quad (4)$$

Такой режим массопроводности (молекулярной диффузии) называют упорядоченным режимом, или, по аналогии с теплопроводностью, регулярным режимом.

Равновесную влажность продукта, в зависимости от относительной влажности воздуха, определяли по специальным таблицам [8]. Относительная влажность отработанного сушильного агента определена с использованием ( $h-d$ ) диаграммы при известных начальных и конечных значениях температур сушильного агента и параметрах воздушной среды измеренной в процессе сушки.

Время пребывания частицы  $t$ , входящее в число Фурье  $Fo$ , определяли опытным путем по величине удерживающей способности  $q_0$  [9]:

$$t = \frac{q_0}{G}. \quad (5)$$

Под удерживающей способностью  $q_0$  понимают максимальное количество материала с известной плотностью частиц, которое может находиться во взвешенном состоянии в аппарате при данном расходе газа. Величину параметра  $q_0$  определяли путем взвешивания материала, оставшегося в вихревой камере после прекращения процесса его обработки [9].

Термомеханическая обработка зерна в сушилке-диспергаторе отличается от процесса сушки тем, что происходит постоянное уменьшение размера частиц за счет механического воздействия роторного измельчителя, в связи с чем возникает вопрос о выборе определяющего размера частицы в числе Фурье. В качестве определяющего представляется необходимым принимать средний диаметр частицы. Исследования, проведенные другими авторами [10, 11], показывают, что изменение диаметра частиц во времени с большой вероятностью описывается экспоненциальной функцией. Для указанной функции определяющий размер вычисляется как среднелогарифмическая величина:

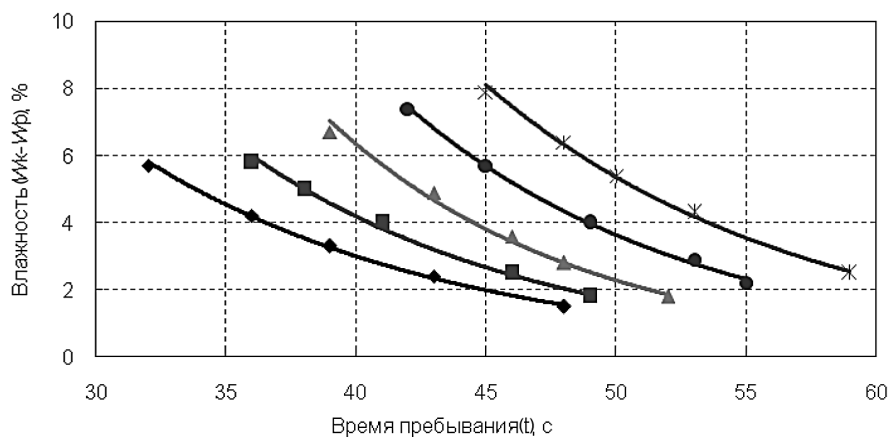
$$d = (d_n - d_k) / (\ln d_n / d_k), \quad (6)$$

где  $d_n$  – эквивалентный начальный диаметр зерна, м;  $d_k$  – медианный диаметр получаемых частиц [12], м.

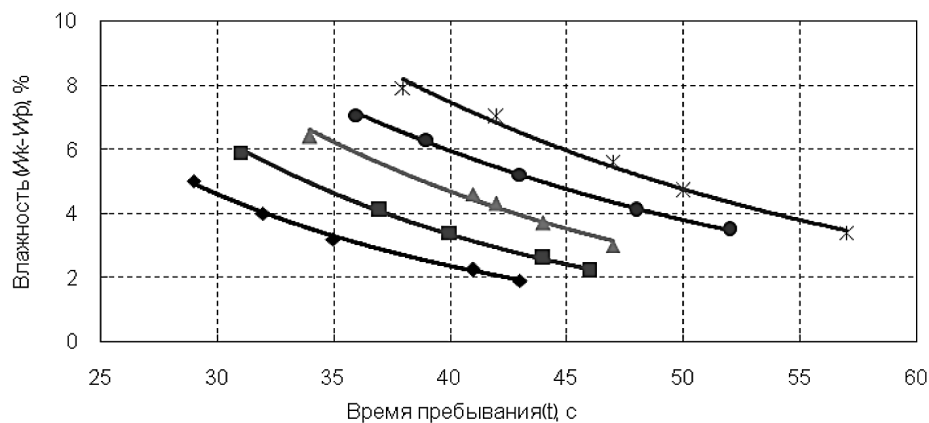
Значение коэффициента диффузии влаги  $a_m$  зависит от влажности материала, структурных особенностей зерна, температуры сушки [13]. Проанализировав доступные литературные источники [3, 8, 13–17], условно приняли значение коэффициента  $a_m$  постоянным и для перерабатываемого продукта равным  $8,33 \cdot 10^{-8}$  м<sup>2</sup>/с. Подобное допущение сделано на основании того, что температура продукта в процессе переработки изменяется в небольшом интервале (21 ÷ 36 °С) и далека от

температуры выходящего сушильного агента, поэтому считаем значение коэффициент  $a_m$  постоянным для данных условий термообработки.

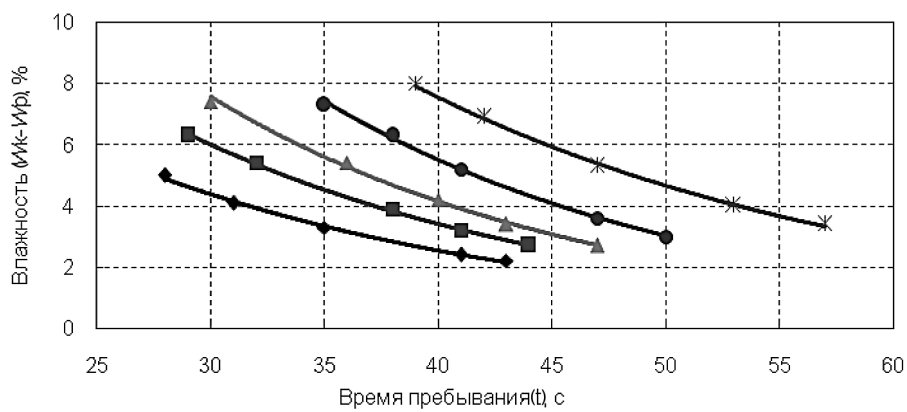
На рис. 1 представлены графики, описывающие изменение конечной избыточной влажности материала в зависимости от времени пребывания  $W_k - W_p = f(t)$ , для различной начальной влажности продукта, при разной температуре сушильного агента.



а) температура сушильного агента 80 °С



б) температура сушильного агента 90 °С



в) температура сушильного агента 100 °С

◆ 1 ■ 2 ▲ 3 ● 4 ✖ 5

Рис. 1. Зависимость изменения избыточной влажности материала от времени пребывания: 1 – начальная влажность материала 33%; 2 – 36%; 3 – 39%; 4 – 42%; 5 – 45%

На рис. 1 видно, что все кривые  $W_k - W_p = f(t)$  имеют одинаковый характер. Анализ показывает, что время пребывания обрабатываемых частиц в установке  $t$  уменьшается с увеличением температуры сушильного агента и увеличивается с увеличением начальной влажности материала при прочих равных условиях. При более высокой производительности установки время пребывания начинает снижаться.

Обобщение результатов эксперимента через безразмерные переменные в виде зависимости безразмерной влажности конечного продукта от диффузионного числа Фурье, которое представляет собой безразмерное время,  $w = f(Fo)$  представлено на рис. 2.

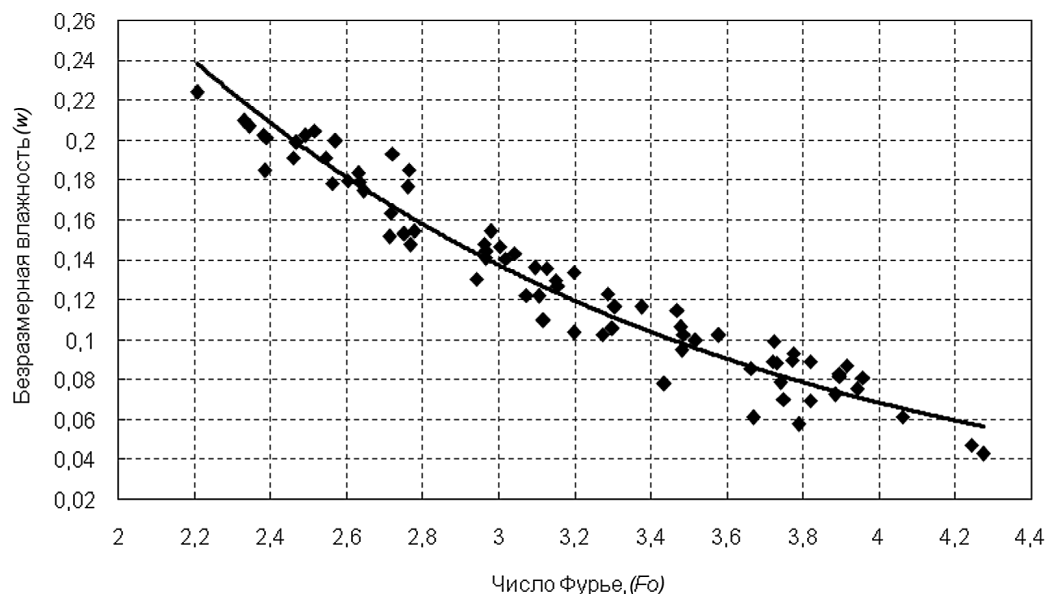


Рис. 2. График зависимости безразмерной влажности продукта от диффузионного числа Фурье

Эта зависимость хорошо аппроксимируется одной функцией такого вида (4):

$$W = 1,1e^{-0,695Fo} \quad (7)$$

Величина достоверности аппроксимации экспериментальных данных составила  $R^2 = 0,92$ .

Полученная зависимость влажности материала от времени его пребывания в установке учитывает уменьшение размера частиц проращенного зерна в процессе его термомеханической обработки.

Данное критериальное уравнение получено при следующих исходных параметрах материала и процесса: начальная влажность продукта  $W_n = 33 \div 45\%$ ; температура сушильного агента  $t = 80 \div 100$  °С; удельная производительность по готовому продукту  $G_{уд} = 1364 \div 2273$  кг/м<sup>3</sup>·ч; удельный расход воздуха  $V_{уд} = 17,6 \div 29$  м<sup>3</sup>/кг.

### Выводы

Процесс термомеханической обработки зерна в сушилке–диспергаторе, представляющий совмещенный процесс измельчения и сушки, со временем приобретает упорядоченный (регулярный) режим молекулярной диффузии влаги в частице.

В качестве определяющего размера частицы при обработке опытных данных совмещенного процесса измельчения и сушки рекомендуется использовать среднелогарифмический диаметр частицы, определяемый по формуле (6).

Зависимость влажности материала, получаемого в результате термомеханической обработки зерна от времени пребывания, описывается критериальным уравнением (7). Данное выражение позволит правильно назначать технологические режимы работы установки с целью получения порошка требуемого качества и свойств.

## Литература

1. Драчева, Л. В. Пути и способы обогащения хлебобулочных изделий / Л. В. Драчева // Хлебопечение России. – 2002. – № 2. – С. 20–21.
2. Мазяк, З. Ю. Тепло- и массоперенос в пористых телах при переменных потенциалах в среде / З. Ю. Мазяк. – Львов: Вища школа, 1979. – 120 с.
3. Сушка пищевых растительных материалов / Г. К. Филоненко [и др.]. – М.: Пищевая промышленность, 1971. – 439 с.
4. Никулин, В. И. Время пребывания продукта в проточном виброкипящем слое / В. И. Никулин, Ю. З. Альтшулер, А. С. Гинзбург // Изв. вузов. Пищевая технология. – 1984. – № 6. – С. 79–82.
5. Сокольский, А. И. Исследование процесса сушки сыпучих материалов в аппарате с активными гидродинамическими режимами / А. И. Сокольский, С. В. Федосов, В. А. Зайцев // Интенсификация процессов механической переработки сыпучих материалов: межвуз. сб. науч. тр. – Иваново, 1988. – С. 123–124.
6. Шаршунов, В. А. Разработка направлений совершенствования оборудования для получения порошковых пищевых добавок из пророщенного зерна / В. А. Шаршунов, В. А. Шуляк, А. В. Евдокимов // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2009. – № 4. – С. 114–119.
7. Лыков, А. В. Тепломассобмен: справ. / А. В. Лыков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.
8. Стабников, В. Н. Процессы и аппараты пищевых производств / В. Н. Стабников, В. М. Лысянский, В. Д. Попов. – М.: Агропромиздат, 1985. – 503 с.
9. Исследование процесса сушки витаминных препаратов на вихревой сушилке / А. А. Соколовский [и др.] // Химико-фармацевтический журнал. – 1987. – № 2. – С. 43–46.
10. Яшков, В. В. Методика расчета гранулометрического состава материала в совмещенном процессе сушки и измельчения в мельницах ударно-отражательного действия / В. В. Яшков, С. В. Федосов, В. Н. Блиничев // Интенсификация процессов механической переработки сыпучих материалов: межвуз. сб. науч. тр. – Иваново, 1987. – С. 97–99.
11. Мизонов, В. Е. О расчете дисперсного состава сыпучих материалов при измельчении / В. Е. Мизонов, В. П. Жуков, С. Г. Ушаков // Теоретические основы химической технологии. – 1987. – Т. XXI, № 6. – С. 427–429.
12. Коузов, П. А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов / П. А. Коузов. – Л.: Химия, 1987. – 264 с.
13. Гинзбург, А. С. Технология сушки пищевых продуктов / А. С. Гинзбург. – М.: Пищевая промышленность, 1976. – 248 с.
14. Атаназевич, В. И. Сушка зерна / В. И. Атаназевич. – М.: ДеЛи принт, 2007. – 480 с.
15. Технология переработки зерна / Я. Н. Куприц [и др.]; под ред. Г. А. Егорова. – М.: Колос, 1977. – 376 с.
16. Гинзбург, А. С. Массообменные характеристики пищевых продуктов: Справочник / А. С. Гинзбург, И. М. Савина. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. – 280 с.
17. Зверев, С. В. Физические свойства зерна и продуктов его переработки / С. В. Зверев, Н. С. Зверева. – М.: ДеЛи принт, 2007. – 176 с.

*V. A. SHARSHUNOV, A. A. SMOLYAK, A. V. EVDOKIMOV*

### **CALCULATION OF MOISTURE EXCHANGE PARAMETERS IN THE PROCESS OF THERMOMECHANICAL TREATMENT OF GRAINS IN A COMBINED DRYER-DISPERGATOR**

#### **Summary**

As a result of experimental research of grain thermomechanical processing in a dryer-dispergator combining in one working volume material crushing and drying it is established that eventually molecular diffusion of moisture in particles acquires a regular mode character. The criterial equation describing product moisture depending on the period of staying in the machine is received.