УДК 532.72; 669.015.23

ОПИСАНИЕ ЭКСТРАКЦИИ ВЛАГИ ИЗ ЗЕРНИСТЫХ НАСЫПОК ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ АКУСТО-КОНВЕКТИВНОГО ПОТОКА

Жилин А.А., Федоров А.В.

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск, Россия

АННОТАЦИЯ

Обобщена математическая технология, основанная на использовании уравнения диффузии, записанного в цилиндрической системе координат, и примененная ранее при моделировании процесса экстракции влаги из зернистого силикагеля, для случая описания осушения неошелушенного корейского риса. Определен коэффициент диффузии для неошелушенного корейского риса, что позволило воссоздать динамику распределения влаги в цилиндрической засыпке. Проведенные численные расчеты для различных значений начальной влажности удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, полученными при сушке неошелушенного риса в акусто-конвективной сушилке ИТПМ СО РАН. Качественно и количественно продемонстрирована значительная интенсификация процесса акусто-конвективной сушки по сравнению с естественной сушкой.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших задач в пищевой промышленности и сельском хозяйстве является хранение зерновых культур. Для выполнения этой задачи из злаков необходимо извлечение свободной влаги находящейся внутри зерен, имеющих развитую каппилярно-пористую структуру. Традиционные технологии экстракции влаги из зерновых культур основаны на подводе тепла к осушаемому материалу, что при последующем хранении способствует тлению зерна и потере ценных качеств и свойств. Решить данную проблему можно перейдя к сушке акусто-конвективным способом, которая осуществляется без подвода тепла при комнатной температуре. Данный подход позволяет осуществлять экстракцию влаги, из пористого скелета зерновых культур помещая осушаемый материал в высокоинтенсивное акустическое поле. Проведенные эксперименты по сушке неошелушенного корейского риса в работе [1] показывают значительную интенсификацию процесса экстракции влаги. Применим математическую технологию, предложенную в [2], к математическому моделированию процесса экстракции влаги из неошелушенного корейского риса.

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В качестве исследуемого объекта рассматривалась засыпка риса с начальной влажностью W_0, заключенная во влагопроницаемый контейнер цилиндрической формы с радиусом R и длиной l. Контейнер помещался в рабочую часть акусто-конвективной сушильной установки (АКСУ) ИТПМ СО РАН. В момент времени $t = 0$ осуществляется пуск АКСУ и исследуемый материал начинает подвергаться воздействию высокоинтенсивных акустических волн. Параметры акусто-конвективного потока в рабочей части АКСУ согласно [1] соответствовали частоте 415 Гц при интенсивности 167 дБ. Следует определить динамику экстракции влаги из засыпки риса в последующие моменты времени ($t > 0$) и определить коэффициент диффузии и массообмена, сравнить его с результатами, полученными в работе [1] при оценке отдельного зерна риса.

Для математического описания процесса экстракции влаги из цилиндрической засыпки зерен риса привлекается двухмерное уравне-

ние диффузии влаги, записанное в цилиндрической системе координат

$$\frac{\partial W}{\partial t} = D\left(\frac{\partial^2 W}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial W}{\partial r} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2}\right) \quad (1)$$

где D – коэффициент диффузии; r и z – пространственные координаты.

Уравнение (1) дополняется начальным и граничными условиями:

$$\text{при } t = 0,\ W(0,r,z) = W_0,\ \text{для } (r,z) \in [0,R]\times[0,l];$$

$$\text{при } r = 0,\ \frac{\partial W(t,0,z)}{\partial r} = 0;$$

$$\text{при } r = R,\ \frac{\partial W(t,R,z)}{\partial r} = -\alpha(W - W_K)S_{\text{бок}}; \quad (2)$$

$$\text{при } z = 0,\ \frac{\partial W(t,r,0)}{\partial r} = \alpha(W - W_K)S_{\text{торец}};$$

$$\text{при } z = l,\ \frac{\partial W(t,r,l)}{\partial r} = -\alpha(W - W_K)S_{\text{торец}},$$

где W_K – влажность в окружающем воздухе; а – коэффициент влагоотдачи; $S_{\text{бок}}$ и $S_{\text{торец}}$ – площадь боковой и торцевой поверхностей образца.

Таким образом, физическая задача об экстракции влаги из цилиндрической засыпки риса свелась к нахождению решения начально-краевой задачи (1–2). По аналогии с [2] для ее численного решения используется метод прямых, а для решения получаемой при этом системы обыкновенных дифференциальных уравнений применяется метод, основанный на формуле дифференцирования назад [3].

Для лучшего представления результатов осуществляется переход к безразмерным переменным. Характерный размер длины принимается равный радиусу цилиндрической засипки риса R, времени – продолжительность каждого эксперимента $t_{\text{эксп}}$. Коэффициент диффузии D обезразмеривался по отношению к величине $R^2/t_{\text{эксп}}$, а коэффициент влагоотдачи а к R^{-3}.

Прежде чем приступить к численным расчетам, необходимо определить коэффициент влагоотдачи а. В работе [2] было показано, что коэффициент влагоотдачи при акусто-конвективной сушке зависит от частоты акусто-конвективного потока. С помощью полученного авторами интерполяционного полинома описывающего зависимость а от частоты, для частоты 415 Гц определяем, что а = 10657 м$^{-3}$ или в безразмерном виде 0,036. В литературе при термо-конвективной сушке в качестве аналогичного показателя используется коэффициент конвективного массопереноса. Так в [4] для необработанного риса он равнялся $3{,}789\cdot10^{-7}$ м/с, в нашем случае при сушке акусто-конвективным способом он соответствует $1{,}883\cdot10^{-5}$ м/с. Для сравнения можно представить так же и коэффициент конвективного массопереноса для винограда определенный в работе [5] при термо-конвективной сушке равный $8{,}05\cdot10^{-8}$ м/с. Как видно, при акусто-конвективной сушке имеет место значительное ускорение экстракции влаги в виде увеличения коэффициента конвективного массопереноса.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ

На первом этапе было необходимо определить коэффициент диффузии. Он был определен путем решения последовательности прямых задач. Для достижения этой цели были взяты результаты по динамике экстракции влаги одного эксперимента продолжительностью 90 мин, за это время влажность уменьшилась от 0,228 до 0,185. На рис. 1 представлен результат сравнения экспериментальных данных и ряд численных расчетов для разных значений коэффициента диффузии. Видно, что при D = 1,5 достигается оптимальное согласование экспериментальных и численных данных. В размерном виде коэффициент диффузии засыпки корейского неошелушенного риса при сушке акусто-конвективным способом равен $6{,}25\cdot10^{-8}$ м^2/с, для сравнения приведем коэффициент диффузии из работы [2] для зернистого силикагеля он составлял $1\cdot10^{-7}$ м^2/с.

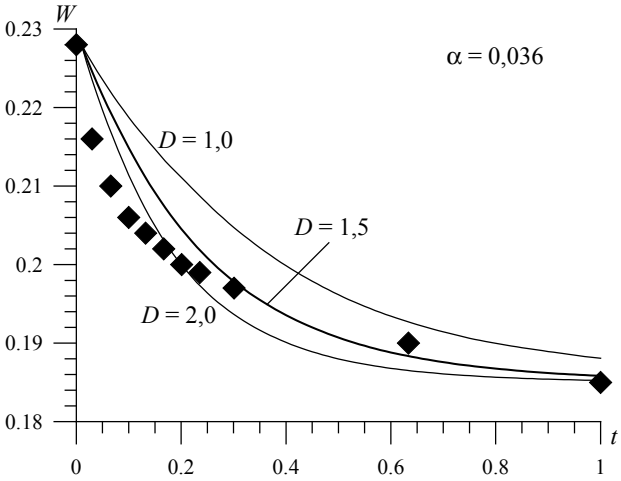

Рис.1 Определение коэффициента диффузии.

Уменьшение коэффициента диффузии для риса вероятно связано с наличием растительной оболочки неошелушенного риса. В работе [6] представлены результаты экспериментов по сушке необработанного риса конвективным способом при температуре 40 ºС, а в [7] проведена обработка этих экспериментов и получен коэффициент диффузии который равнялся $9{,}04\cdot10^{-12}$ м^2/с. Следовательно акусто-конвективное воздействие значительно интенсифицирует процесс сушки. Это выражается в росте D почти на четыре порядка.

На рис. 2 представлено распределение влаги в засыпке корейского риса на разные моменты времени, от $t = 0$ до 1, что соответствует продолжительности эксперимента $t_{эксп}$. Расчеты проведены при найденных коэффициенте влагоотдачи и диффузии. Видно, что основной вклад в осушение засыпки риса вносит миграция влаги к боковой поверхности. Этот факт объясняется преобладанием площади боковой поверхности засыпки над площадью торцевой, их соотношение составляет $2\cdot l$ к 1 или в нашем случае при $l = 20$ имеем 40 к 1. По мере развития процесса приповерхностные эффекты в распределении влажности сглаживаются и превышение влажности во внутренних областях образца над краевыми уже не столь значительно.

Все дальнейшие расчеты выполнялись с определенным выше коэффициентом диффузии и соответствующему режиму работы АКСУ коэффициенту влагоотдачи.

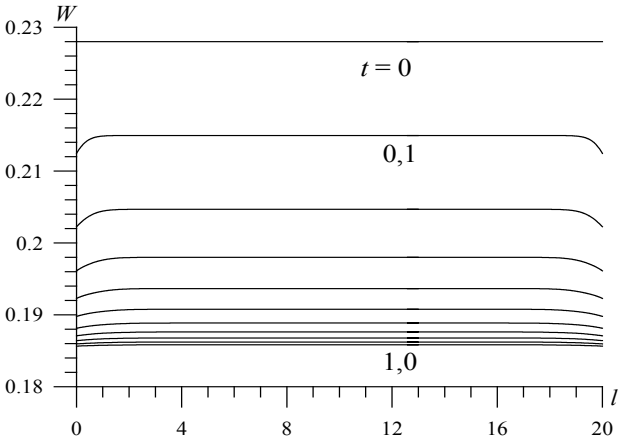

Рис.2 Динамика изменения влаги в засыпке риса.

ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ ОБРАЗЦА

Проверим, как предложенная математическая модель с определенными коэффициентами описывает экспериментальные данные для разных значений начальной влажности зерен риса. На рис. 3 представлено сравнение экспериментальных данных [1] для четырех значений начальной влажности 0,236; 0,204; 0,181 и 0,156 с результатами численных расчетов. Отметим, что для случая $W_0 = 0{,}236$ продолжительность сушки в эксперименте составляла $t_{эксп} = 30$ мин, а для остальных $t_{эксп} = 12$ мин. Видно, что результаты расчетов по предлагаемой математической модели удовлетворительно описывают экспериментальные данные как для различных значений начальной влажности, так и для разной продолжительности акусто-конвективного воздействия на осушаемую засыпку риса.

На рис. 4 для сопоставления скоростей экстракции влаги в конвективном и акусто-конвективном режиме представлены кинетические характеристики режима сушки риса в помещении при комнатной температуре в течение 5 дней. По объему экстрагированной влаги он соответствует сушке в акусто-конвективном потоке в течение 12 мин. Таким образом, за счет акусто-конвективного воздействия время сушки уменьшилось в 600 раз по сравнению с сушкой в естественных условиях.

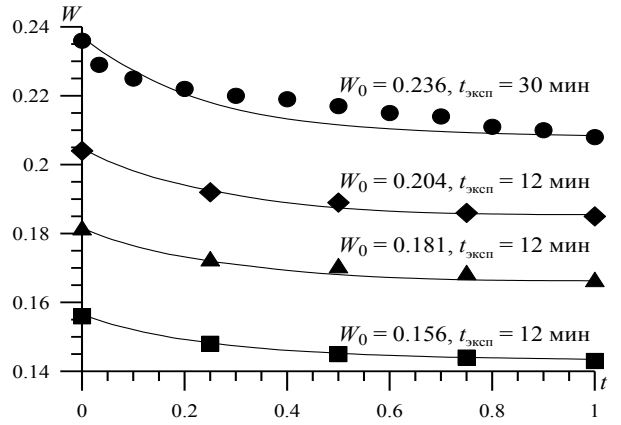

Рис.3 Влияние начальной влажности на динамику сушки.

Для математического описания процесса сушки риса при комнатной температуре и условиях естественной конвекции необходимо было подобрать коэффициент влагоотдачи, так

как данный режим не был изучен ранее в [2]. Проведенные численные эксперименты показали, что наиболее оптимальным значением для режима естественной сушки неошелушенного корейского риса является безразмерный коэффициент влагоотдачи 0,01, что соответствует размерному значению a = 2963 м$^{-3}$. В работе [4] этот параметр имел на порядок меньшее значение, что обусловлено, возможно, различными сортами риса и наличием теплоподвода в [4].

Все дальнейшие расчеты выполнялись с определенным выше коэффициентом диффузии и соответствующему режиму работы АКСУ коэффициенту влагоотдачи.

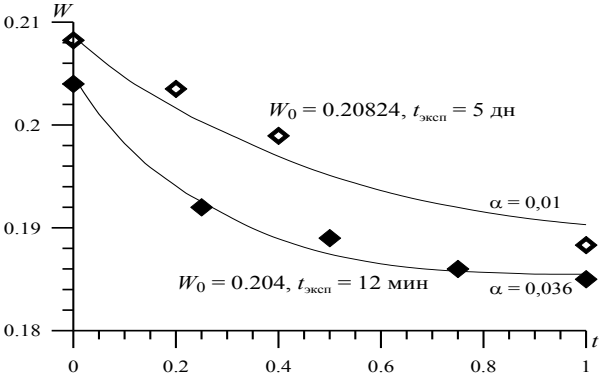

Рис.4 Сопоставление по скорости сушки.

ВЫВОДЫ

- Показано, что математическая технология, применённая в [2] для описания экстракции влаги из зернистого силикагеля, может быть использована для описания осушения неошелушенного корейского риса. Определен коэффициент диффузии для неошелушенного корейского риса, что позволило воссоздать динамику распределения влаги в цилиндрической засыпке корейского риса.
- Проведенные численные расчеты для различных значений начальной влажности удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.
- Качественно и количественно продемонстрирована значительная интенсификация процесса акусто-конвективной сушки по сравнению с естественной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коробейников Ю.Г., Трубачеев Г.В., Федоров А.В., Чу К.М., Жеонг Д.М., Ким Ю.И. Экспериментальное исследование акусто-конвективной сушки неошелушенного корейского риса // Инженерно-физический журнал. – 2008. – Т. 81, № 4. – С. 652 – 655. Korobeinikov Yu.G., Trubacheev G.V., Fedorov A.V., Choo K.M., Jeong D.M., Kim Y.I. (2008) “Experimental investigation of acoustic-convective drying of paddy Korean rise”, Inzhenerno-fizicheskii zhurnal, Vol.81, no.4, pp.652-655.
2. Жилин А.А., Федоров А.В., Коробейников Ю.Г. Исследование процессов пропитки и сушки зернистого силикагеля // Инженерно-физический журнал. – 2011. – Т. 84, № 5. – С. 897 – 906. Zhilin A.A., Fedorov A.V., Korodeinikov Yu.G. (2011) “Investigation of the processes of impregnation and drying of granular silica gel”, Inzhenerno-fizicheskii zhurnal, Vol.84, no.5, pp.897-906.
3. Berzins M, Dew P.M. and Furzeland R.M. Developing software for time-dependent problems using the method of lines and differential-algebraic integrators // Appl. Numer. Math. – 1989. – No 5. – P. 375 – 397.
4. Wilton Pereira da Silva, Jürgen W. Precker, Cleide M.D.P.S. e Silva, Josivanda Palmeira Gomes Determination of effective diffusivity and convective mass transfer coefficient for cylindrical solids via analytical solution and inverse method: Application to the drying of rough rice // Journal of Food Engineering. – 2010. – Vol. 98. – P. 302 – 308.
5. Wilton Pereira da Silva, Cleide M.D.P.S. e Silva, Jürgen W. Precker, Josivanda Palmeira Gomes, Pedro L. Nascimento, Laerson D. da Silva Diffusion models for the description of seedless grape drying using analytical and numerical solutions // Agricultural Sciences. – 2012. – Vol. 3, No. 4. – P. 545 – 556.
6. Hacihafizoglu O., Cihan A., Kahveci K., Lima A.G.B. A liquid diffusion model for thin-layer drying of rough rice // European Food Research and Technology. – 2008. – Vol. 226, No. 4. – P. 787 – 793.
7. Wilton Pereira da Silva, Cleide M.D.P.S. Silva, Diogo D.P.S. Silva, Cleiton D.P.S. Silva Numerical Simulation of the Water Diffusion in Cylindrical Solids // International Journal of Food Engineering. – 2008. – Vol. 4, Iss. 2, Art. 6.

© Жилин А.А., Федоров А.В.