

УДК 663.5

UDC 663.5

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ДИФфуЗИИ ПРИ ФЕРМЕНТАТИВНОМ
РАЗВАРИВАНИИ ПШЕНИЧНОЙ КРУПКИ****EXPERIMENTAL STUDY OF DIFFUSION OF
ENZYMATIC COOKING WHEAT GRANULES**

Черепов Сергей Владимирович
аспирант
*Майкопский государственный технологический
университет, г. Майкоп, Россия*

Cherepov Sergey Vladimirovich
postgraduate student
*Maikop State Technological University, Maikop,
Russia*

В статье рассмотрен процесс разваривания пшеничной крупки, проведенный в производственных условиях и ферментативного разваривания в лабораторных условиях. Приведены значения коэффициентов диффузии при увлажнении пшеницы, а также результаты моделирования процесса разваривания с использованием уравнения нестационарной диффузии методом сеток по неявной схеме. Модель учитывает изменение концентрации влаги в частице во времени и пространстве, изменение температуры процесса и отрыв наружных крахмальных слоев

The article describes the process of cooking wheat granules conducted under production conditions of cooking and enzymatic cooking in laboratory conditions. It gives the values of moisture diffusion coefficients and the results of modeling the process of cooking using the equation of non-stationary diffusion method of nets for the implicit scheme. The model takes into account the changes in the moisture concentration of particles in space and time, the temperature change process and avulsion of starch outer layers

Ключевые слова: ФЕРМЕНТАТИВНОЕ
РАЗВАРИВАНИЕ, ПШЕНИЧНАЯ КРУПКА,
КОЭФФИЦИЕНТ ДИФфуЗИИ, ДИФфуЗИЯ

Keywords: ENZYMATIC OF COOKING, WHEAT
GRANULES, DIFFUSION COEFFICIENT,
DIFFUSION

Показатели качества ректифицированного спирта зависят от вида сырья и всех технологических операций: степени помола, режима водно-тепловой обработки, разваривания, осахаривания и брагоректификации.

В настоящей статье в качестве объекта исследования взята пшеничная крупка (рисунок 1), полученная на спиртзаводе ООО «КХ Восход» (республика Адыгея, г. Майкоп) и проведено в лабораторных условиях экспериментальное исследование процесса разваривания пшеничной крупки при 90 °С при добавлении фермента альфа-амилазы.

Пшеница перед поступлением в производство пропущена через воздушно-ситовое и магнитное сепарирование, так как в зерне, поступающем на варку, не допускается содержание сорных примесей более 1 %, а металлические примеси не допускаются совсем. Зерно из емкости суточного запаса производственным элеватором подавалось в приемный бункер, из которого через магнитный сепаратор поступало на

автоматические весы в расходный бункер и на молотковую дробилку. Грубый помол подавался на вальцевый станок для получения тонкого помола в пределах 80 % прохода через миллиметровое сито. Внешний вид пшеничной крупки приведен на рисунке 1. Помол направлялся в первый чанок замеса, куда подавалась вода и пар, и происходило смешение крупки с водой в пропорции 1:3 (1 кг зерна на 2,5-3 литра воды), в зависимости от крахмалистости зерна. С помощью вытяжного вентилятора частицы крахмала направлялись также через циклон во второй чанок замеса в виде водной эмульсии за счет орошения.

Рисунок 1 – Пшеничная крупка,
полученная на спиртзаводе
ООО «КХ Восход»
(республика Адыгея, г. Майкоп)



Замес из первого чанка переходил во второй чанок замеса через установленные решетки, во избежание попадания в варочный агрегат, иногда образующихся «галушек». Подготовленный, предзапаренный (т.е. частично набухшие и клейстеризованные клетки крахмала) замес подавался плунжерным насосом через контактную головку вместе с паром из парового коллектора в варочный агрегат непрерывного действия. В варочном агрегате замес обрабатывался под избыточным давлением 3,6-3,8 атм до температуры 138 °С. В этих условиях растворялся крахмал, размягчались и частично растворялись клеточные стенки сырья, и при последующем выдувании сырья в паросепаратор происходило разрушение клеточной структуры вследствие перепада давления в аппаратах, после

чего подавалось в трубчатый разварник, перетекая на разных уровнях из одной колонны в другую. Цикл длился около часа. В паросепараторе происходило отделение массы от вторичного пара. Далее разваренная масса поступала в заторный чан – осахариватель с температурой около 100 °С. Масса в осахаривателе охлаждалась до 58 °С, продолжительность осахаривания 5-10 мин. В настоящее время на спиртзаводе используют следующие ферментные препараты: альфамил 2500 L (L-амилаза) применяют для разжижения замеса и осахаривания, глюкоамилазу используют для осахаривания частично расщепленных полимеров крахмала с образованием глюкозы, пролайв и вискостар способствуют расщеплению белков. Полнота осахаривания определялась по йодной пробе. Если окраска не изменялась, то масса осахарена хорошо, красноватая окраска указывает на избыток декстринов, сине-фиолетовая – остался неосахаренный крахмал. Осахаренная масса поступала в бродильное отделение через теплообменник. Зрелая бражка подавалась в передаточный чан, из которого питалась бражная колонна брагоректификационного отделения.

Нами полученная на спиртзаводе пшеничная крупка была просеяна через сито диаметром 1 мм, затем через сито диаметром 0,9 мм. Были взяты частицы, оставшиеся на сите диаметром 0,9 мм. Они подвергнуты ферментативному развариванию. При 40 °С эти частицы увлажнены водой и добавлен фермент (альфа-амилаза), затем нагреты до температуры 90 °С и выдержаны в течение 20, 40 и 60 мин. Расход фермента был рассчитан в соответствии с нормами на 1 т условного крахмала, приведенными в каталоге поставщика (г. Рязань): на 1 г навески – 0,0007 мл фермента.

Фотографии, выполненные под микроскопом, приведены на рисунке 2. На рисунках а) и в) представлен внешний вид края частицы крупки через 20 и 40 минут разваривания соответственно. На рисунках б) и г) изображена водная среда с крахмальными гранулами, окружающая

частицы крупки при 20 и 40 минутах соответственно. На рисунке а) наблюдается отрыв наружных слоев. На рисунке в) представлены нерастворимые в процессе ферментативного разваривания элементы оболочек зерна. На рисунке б) четко видны крахмальные гранулы, выброшенные из частицы крупки в результате их набухания и отрыва. С течением времени крахмальные гранулы под воздействием температуры растворяются в окружающей среде (воде), о чем свидетельствует рисунок г). Фотографии, полученные через 60 минут оказались практически идентичными фотографиям при разваривании за 40 минут. Поэтому был сделан вывод о том, что разваривание пшеничной крупки размером 1 мм прошло в течение 40 минут.

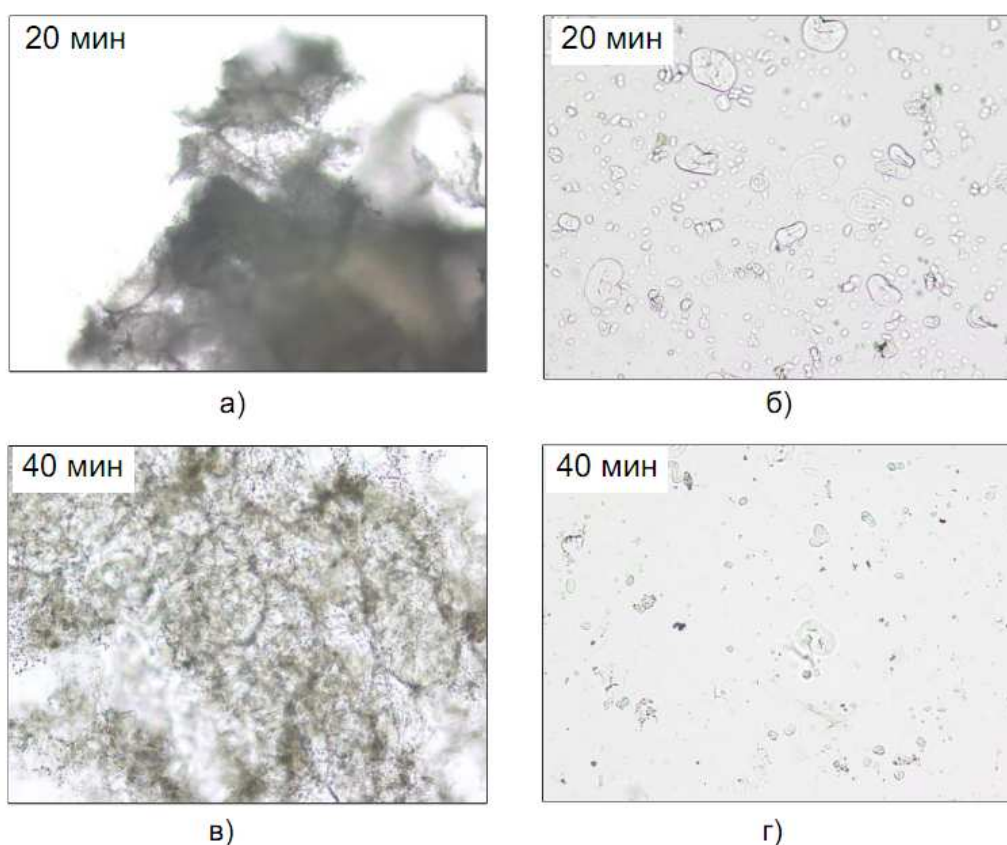


Рисунок 2 – Микрофотографии разваривания пшеничной крупки

Для моделирования и идентификации процесса разваривания, проведенного в лабораторных и производственных условиях, необходимо

знание коэффициента диффузии влаги внутрь частиц пшеничной крупки. Анализ известных литературных данных по коэффициентам диффузии при увлажнении пшеницы (целого зерна, обрубленного зерна, ядер, гранул) показал, что экспериментальное определение коэффициентов диффузии при увлажнении проведено для сравнительно невысоких температур от 10 до 98,3 °С. В этом диапазоне они подчиняются уравнению Аррениуса и мало зависят от формы частичек и типа сырья. Экспериментальные данные обработаны по уравнению нестационарной диффузии для правильных геометрических форм (бесконечная пластина, бесконечный цилиндр, шар), которое решено аналитически и упрощено для регулярного режима [1].

В таблице 1 приведены литературные экспериментальные данные коэффициента диффузии при увлажнении пшеницы.

Таблица 1 – Коэффициент диффузии при увлажнении пшеницы

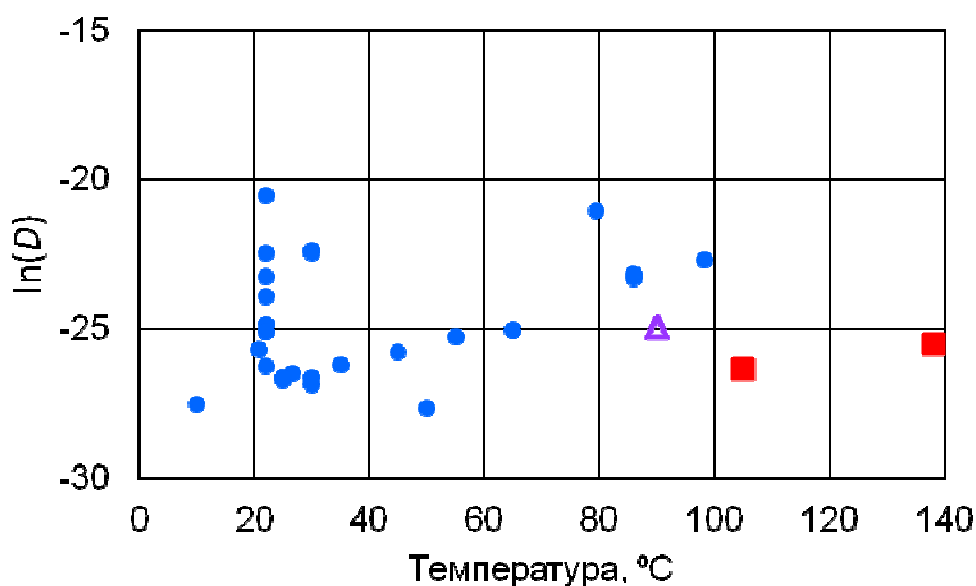
Источник	Сорт пшеницы	Температура, °С	Коэффициент диффузии, $D \cdot 10^{10}$, м ² /с
2	Эндосперм	22	
	Grandin		0,8
	Amidon		0,55
	Renville		0,73
	Jagger		0,91
	TAM107		1,4
	Madsen		0,6
	Rely		0,46
	Penawawa		0,55
	Vanna		0,57
2	Околоплодник	22	
	Grandin		0,13
	Amidon		0,16
	Renville		0,13
	Jagger		0,13
	TAM107		0,042
	Madsen		0,19
	Rely		0,32
	Penawawa		0,42
	Vanna		0,29
3	Aotea (эндосперм)	22	1,8
4	Otane	22	12
5	Thatcher	20,8-79,5	0,069-7,2

6	Thatcher	25	0,018-0,031	
7	Ponca	26,7-98,3	0,027-2,456	
	Vernum	30-86	0,022-0,752	
	Seneca	26,7-98,3	0,031-1,409	
	Brevor	30-86	0,027-0,891	
8	Ядро пшеницы	10	0,011	
		50	0,1	
9	Ядро пшеницы	25	0,028	
		35	0,0418	
		45	0,0624	
		55	0,106	
		65	0,136	
10	Обрушенное зерно	22	0,62	
			Grandin	0,41
			Amidon	0,55
			Renville	0,70
			Jagger	1,09
			TAM107	0,48
			Madsen	0,47
			Rely	0,44
			Penawawa	0,44
			Vanna	0,44
10	Целое зерно	22	0,18	
			Grandin	0,17
			Amidon	0,17
			Renville	0,19
			Jagger	0,05
			TAM107	0,20
			Madsen	0,23
			Rely	0,29
			Penawawa	0,29
			Vanna	0,25

Моделирование процесса разваривания проведено численно методом сеток по неявной схеме для крупки, толщиной 1 мм. Математическая модель и порядок решения изложены в работах [11, 12]. Учитывая, что задача является симметричной, число координатных слоев принято равным 100 для полутолщины крупки 0,5 мм. Шаг интегрирования по времени принят равным 3 с. Результаты моделирования представлены на рисунке 3.

Приведенные выше экспериментальные данные коэффициентов диффузии при увлажнении и полученные нами при разваривании и ферментативном разваривании показаны в виде зависимости $\ln(D)$ от

температуры. Приведенные значения коэффициентов диффузии показывают, что в диапазоне температур 20-70 °С структура материала не претерпевает сильных изменений и, как видно из рисунка 3, данные по коэффициентам диффузии удовлетворительно описываются уравнением Аррениуса. Большие значения коэффициентов диффузии при 22 °С получены методом ЯМР [3, 4] и для эндосперма [2]. При разваривании процессы насыщения зерновой крупки влагой протекают при более высоких температурах вплоть до 155 °С. Получить экспериментальные данные по коэффициентам диффузии при таких температурах не представляется возможным. Между тем по развариванию зерна накоплен обширный материал на предприятиях спиртовой промышленности.

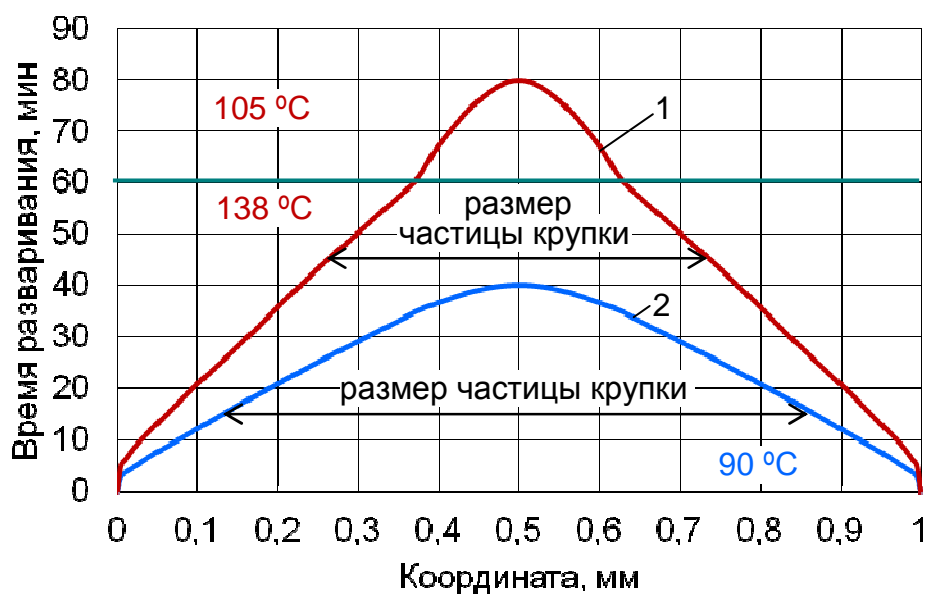


- при увлажнении при температурах до 100 °С;
- при разваривании в производственных условиях (105 и 138 °С);
- ▲ при ферментативном разваривании в лабораторных условиях (90 °С)

Рисунок 3 – Зависимость $\ln(D)$ от температуры

Проведенные эксперименты по развариванию свидетельствуют о том, что при повышении температуры величина коэффициента диффузии

снижается. Причиной этого является изменение структуры крахмальных гранул при высокой температуре. В производственном эксперименте в течение 60 минут поддерживалась температура, равная 138 °С. За это время происходили основные структурные изменения частиц, которые сохранялись в течение последующих 20 минут при температуре 105 °С. При разваривании коэффициент диффузии оказался равным $8,273 \cdot 10^{-12}$ м²/с при 138 °С и $3,641 \cdot 10^{-12}$ м²/с при 105 °С. Значение коэффициента диффузии при ферментативном разваривании в лабораторных условиях составило $1,462 \cdot 10^{-11}$ м²/с при 90 °С, что выше, чем при разваривании при 105 °С. Это объясняется влиянием фермента альфа-амилазы, который приводит к частичному осахариванию крахмала в частицах.



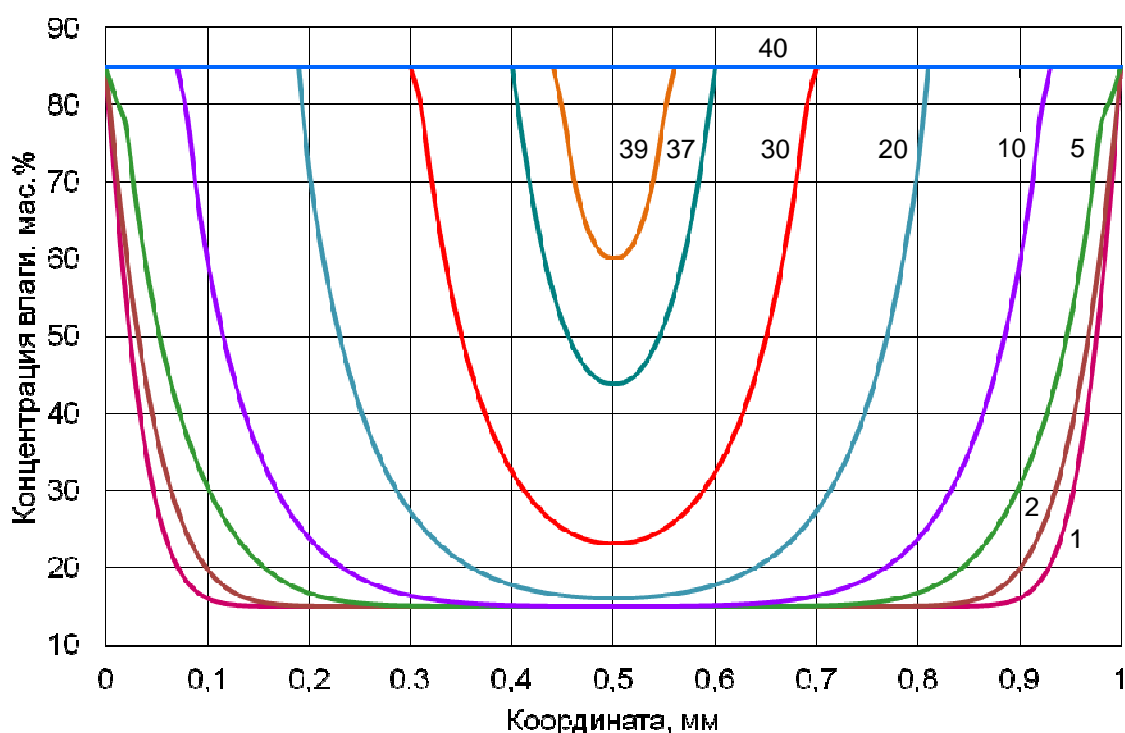
- 1 – разваривание при 138 и 105 °С;
- 2 – ферментативное разваривание при 90 °С

Рисунок 4 – Уменьшение размера частицы, связанное с отрывом наружных слоев, в зависимости от времени и температуры разваривания

На рисунке 4 представлены графические зависимости изменения размера частицы (ее текущей толщины во времени) при разваривании в

производственных условиях (кривая красного цвета) и в лабораторном эксперименте в присутствии фермента (кривая синего цвета). Координата, равная 0,5 мм, соответствует середине частицы, а вершины кривых – полному развариванию. При времени разваривания, равному 60 минутам, кривая 1 претерпевает излом, что объясняется замедлением диффузии при резком понижении температуры со 138 °С до 105 °С при перемещении развариваемой массы из варочного агрегата под избыточным давлением 3,6-3,8 атм в паросепаратор с давлением, близким к атмосферному.

Изменение во времени профиля концентраций влаги в частице при ферментативном разваривании с поддержанием температуры на уровне 90°С представлено на рисунке 5, полученные при численном решении уравнения нестационарной диффузии методом сеток по неявной схеме.



Цифрами обозначено время разваривания в минутах

Рисунок 5 – Профили концентраций влаги в частице крупки на различных временных слоях

В процессе расчетов подбиралась величина энергии активации, которая являлась параметром идентификации таким образом, чтобы процесс разваривания частицы завершался за 40 минут (время опыта). В расчетах в соответствии с полученными ранее результатами [11, 12] принята концентрация отрыва наружного слоя, равная 80 мас. %, а равновесная концентрация – 85 мас. %.

Рекомендуется для моделирования процесса разваривания в интервале температур 105-140 °С использовать для расчета коэффициента диффузии уравнение Аррениуса с энергией активации $E_a = 32,12$ кДж/моль и предэкспоненциальным множителем $D_0 = 10^{-7}$ м²/с, а при температуре 90 °С – с энергией активации $E_a = 26,65$ кДж/моль и предэкспоненциальным множителем $D_0 = 10^{-7}$ м²/с.

Список литературы

1. Crank J., The mathematics of diffusion (2nd ed.). Oxford: Oxford University Press, 1975.
2. Kang S., Delwiche S.R. 1999. Moisture diffusion modeling of wheat kernels during soaking. Transactions of the ASAE 42(5): 1359-1365.
3. Callaghan, P. T., K. W. Jolley, and J. Lelievre. 1979. Diffusion of water in the endosperm tissue of wheat grains as studied by pulsed field gradient nuclear magnetic resonance. Biophys. J. 28(1): 133-142.
4. Jenner, C. F., Y. Xia, C. D. Eccles, and P. T. Callaghan. 1988. Circulation of water within wheat grain revealed by nuclear magnetic resonance micro-imaging. Nature 336(6197): 399-402.
5. Becker, H. A., and H. R. Sallans. 1955. A study of internal moisture movement in the drying of the wheat kernel. Cereal Chem. 32(3): 212-226.
6. Becker, H. A. 1960. On the absorption of liquid water by the wheat kernel. Cereal Chem. 37(3): 309-323.
7. Fan, L., D. S. Chung, and J. A. Shellenberger. 1961. Diffusion coefficient of water in wheat kernels. Cereal Chem. 38(6): 540-548.
8. Tagawa, Y., Muramatsu, T., Nagasuna, A., Yano, M., Limoto, S., Murata, Water absorption characteristics of wheat and barley during soaking, Trans. ASAE 46 (2003) 361-366.
9. Kashaninejad Mahdi, Kashiri Mahboobeh Hydration kinetics and changes in some physical properties of wheat kernels. 2007. Iranian Food Science & Technology Research Journal. pp. 47-59.
10. Kang S., Delwiche S. R. 2000. Moisture diffusion coefficients of single wheat kernels with assumed simplified geometries: analytical approach. Transactions of the ASAE 43(6): 1653-1659.

11. Черепов С.В. Математическое моделирование процесса разваривания ячменной крупки / С.В. Черепов, Х.Р. Сиюхов, Т.Г. Короткова, Н.В. Солонникова, А.М. Артамонов // Известия вузов. Пищевая технология, 2014. № 1. С.88-92.
12. Короткова Т.Г. Использование неявной схемы и метода исключения Гаусса при моделировании насыщения зерновой крупки водой и сушки упаренной барды / Т.Г. Короткова, Л.М. Левашова, С.В. Черепов // Новые технологии, 2012. № 2. С.19-26.

References

1. Crank J., The mathematics of diffusion (2nd ed.). Oxford: Oxford University Press, 1975.
2. Kang S., Delwiche S.R. 1999. Moisture diffusion modeling of wheat kernels during soaking. Transactions of the ASAE 42(5): 1359-1365.
3. Callaghan, P. T., K. W. Jolley, and J. Lelievre. 1979. Diffusion of water in the endosperm tissue of wheat grains as studied by pulsed field gradient nuclear magnetic resonance. Biophys. J. 28(1): 133-142.
4. Jenner, C. F., Y. Xia, C. D. Eccles, and P. T. Callaghan. 1988. Circulation of water within wheat grain revealed by nuclear magnetic resonance micro-imaging. Nature 336(6197): 399-402.
5. Becker, H. A., and H. R. Sallans. 1955. A study of internal moisture movement in the drying of the wheat kernel. Cereal Chem. 32(3): 212-226.
6. Becker, H. A. 1960. On the absorption of liquid water by the wheat kernel. Cereal Chem. 37(3): 309-323.
7. Fan, L., D. S. Chung, and J. A. Shellenberger. 1961. Diffusion coefficient of water in wheat kernels. Cereal Chem. 38(6): 540-548.
8. Tagawa, Y. Muramatsu, T. Nagasuna, A. Yano, M. Limoto, S. Murata, Water absorption characteristics of wheat and barley during soaking, Trans. ASAE 46 (2003) 361-366.
9. Kashaninejad Mahdi, Kashiri Mahboobeh Hydration kinetics and changes in some physical properties of wheat kernels. 2007. Iranian Food Science & Technology Research Journal. pp. 47-59.
10. Kang S., Delwiche S. R. 2000. Moisture diffusion coefficients of single wheat kernels with assumed simplified geometries: analytical approach. Transactions of the ASAE 43(6): 1653-1659.
11. Cherepov S.V. Matematicheskoe modelirovanie processa razvarivaniya jachmennoj krupki / S.V. Cherepov, H.R. Sijuhov, T.G. Korotkova, N.V. Solonnikova, A.M. Artamonov // Izvestija vuzov. Pishhevaja tehnologija, 2014. № 1. S.88-92.
12. Korotkova T.G. Ispol'zovanie nejavnoj shemy i metoda iskljuchenija Gaussa pri modelirovanii nasyshhenija zernovoj krupki vodoj i sushki uparennoj bardy / T.G. Korotkova, L.M. Levashova, S.V. Cherepov // Novye tehnologii, 2012. № 2. S.19-26.