

УДК 001.891.573 : 663.5

Профессор Е.Н. Константинов, доцент Т.Г. Короткова,
профессор С.Ю. Ксандопуло,

(Кубан. гос. технол. ун-т) кафедра безопасн. жизнедеят. тел. (861) 274-51-17
E-mail: korotkova1964@mail.ru

аспирант С.В. Черепов

(Майкоп. гос. технол. ун-т) каф. технол., машин и оборуд. пищ. пр-в тел. (87722)57-00-21
E-mail: siukhov@mail.ru

Professor E.N. Konstantinov, associate professor T.G. Korotkova,
professor S.Iu. Kсандопуло

(Krasnodar, Russia, Kuban State Technological University) Department of life safety.
phone (861) 274-51-17

E-mail: korotkova1964@mail.ru

graduate S.V. Cherepov

(Maikop, Russia, Maikop State Technological University) Department of technology, machines and equipment for food industries. phone (87722)57-00-21

E-mail: siukhov@mail.ru

Разработка модели разваривания зернового замеса

Developing a model of cooking grain batch

Реферат. По развариванию зернового замеса накоплен значительный экспериментальный и производственный материал. Однако теория этого процесса не разработана в требуемой степени. Показано, что математическое моделирование процесса разваривания зернового замеса может использоваться в качестве основы уравнение нестационарной диффузии и его численное решение, основанное на методе сеток. Показано, что наряду с процессом нестационарной диффузии при использовании сеточного метода можно учитывать температурные процессы и теорию набухания крахмальных гранул. Определены значения энергии активации диффузии связанной влаги в крупке и величина предэкспоненциального множителя. Для описания процесса набухания крахмальных гранул использованы решения достаточно многочисленных исследований, и выбрана модель, основанная на кинетике химической реакции второго порядка. Уточнение модели разваривания проведено по экспериментальным данным для пшеничной крупки, и сделан вывод о необходимости учета разрыва крахмальных гранул в результате набухания и отрыва слоев материала, граничащих с жидкой фазой, в период всего процесса вплоть до полного разваривания зерновой крупки. Приведены увеличенные под микроскопом фотографии края сухой и разваренной частицы, свидетельствующие о набухании крахмальных гранул и отрыве внешнего слоя частицы. Одновременно в модели учтена динамика изменения температур при нагревании зернового замеса и его разваривании. Результаты моделирования идентифицированы по данным экспериментального исследования разваривания ячменной крупки. Установлено, что разработанная модель с высокой точностью описывает результаты экспериментального исследования. Показано, что математическая модель, основанная на уравнении нестационарной диффузии, без учета температурных эффектов и теории набухания крахмальных гранул дает завышенное время разваривания.

Summary. By batch cooking of grain accumulated considerable experimental and production material. However, the theory of this process has not been developed to the desired extent. It is shown that the mathematical modeling of the process of cooking the grain batch can be used as a basis for non-stationary diffusion equation and its numerical solution based on the grid method. It is shown that in addition to non-stationary diffusion process by using the grid method can take into account the temperature processes and the theory of swelling of the starch granules. The values of the activation energy of diffusion bound moisture in grains and the pre-exponential value were determined. To describe the swelling of the starch granules used solutions sufficiently numerous studies, and the selected model based on chemical reaction kinetics of the second order. Elaboration of the model of cooking done on experimental data for wheat grits, and concluded the need to address the gap of the starch granules during swelling and separation of layers of material adjacent to the liquid phase during the entire process until the complete cooking of cereal grits. An enlarged under a microscope photos edge dry and tenderized particles showing swelling of the starch granules and the isolation of the outer layer of the particle. Simultaneously taken into account in the model dynamics of temperature changes during heating and mixing the grain of cooking. The simulation results are identified according to a pilot study of cooking barley grits. Found that the developed model accurately describes the results of the pilot study. It is shown that the mathematical model based on the non-stationary diffusion equation, excluding the effects of temperature and swelling of the starch granules theory gives too high of cooking time.

Ключевые слова: набухание, крахмальные гранулы, разваривание, зерновой замес, математическое моделирование, неявная схема.

Keywords: swelling, starch granules, cooking, grain batch, mathematical modeling, implicit scheme

© Константинов Е.Н., Короткова Т.Г., Ксандопуло С.Ю., Черепов С.В., 2014

В технологии производства пищевого спирта важная роль принадлежит процессу разваривания зерна. Исследования ведутся в направлении изучения влияния степени измельчения, температур, ферментов и других способов воздействия на зерно и зерновые замесы. Можно отметить, что успехи в снижении энергозатрат и улучшении качества бражки достигнуты за счет снижения температур при использовании гидродинамической ферментативной обработки (ГДФО) и механико-ферментативного разваривания. Научные исследования этих вопросов обобщаются в виде эмпирических соотношений и оптимизации технологических режимов [1]. Обобщающие эмпирические уравнения и теоретические обобщения экспериментального материала нуждаются в дальнейшем развитии. Обычно разваривание осуществляется в несколько стадий: смешения с водой при температурах 40-50 °С, в том числе с добавлением разжижающих ферментов, последующего повышения температуры и разваривания в две-три стадии. Поэтому при математическом описании этого процесса необходимо учитывать изменение температур и концентраций влаги в частичках материала. Диффузионное насыщение влагой частиц зерновой крупки может быть описано с использованием уравнений нестационарной диффузии и решено численным методом, разработанным нами для описания сушки барды [2]. В настоящей работе рассмотрена задача диффузионного разваривания зерновой крупки, которая учитывает процесс диффузии влаги в материале, кинетику набухания крахмальных гранул и переменную температуру.

Математическое описание процесса осуществлялось с использованием уравнения нестационарной диффузии в частных производных (1):

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D(t) \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где C – влажность материала, изменяющаяся во времени и в пространстве, м³ влаги/м³ влажного материала; τ – время, с; x – координата в направлении, перпендикулярном к слою, м; $D(t)$ – коэффициент диффузии воды в материале, м²/с.

Влияние температуры на процесс учитывалось через коэффициент диффузии:

$$D(t) = D_{0d} e^{-E_{ad}/RT}, \quad (2)$$

где D_{0d} – предэкспоненциальный множитель (фактор диффузии); E_{ad} – энергия активации

для диффузии адсорбированной воды, Дж/моль; T – абсолютная температура, К; R – газовая постоянная, $R = 8,314$ Дж/(моль · К); индекс d – диффузия.

Как следует из уравнения (2) с ростом температуры величина экспоненты быстро стремится к единице. Поэтому величина D_0 найдена нами по данным [3] путем экстраполяции. Величина D_0 составила $5,5 \cdot 10^{-9}$ м²/с. Величина энергии активации найдена путем идентификации математической модели нестационарной диффузии $E_{ad} = 21,75$ кДж/моль [4].

Поскольку решение уравнения (2) проводилось численными методами, то по заданной в процессе разваривания крупки температуре как функции времени определялась температура на каждом временном слое интегрирования, и по ней рассчитывался коэффициент диффузии.

Решение уравнения нестационарной диффузии (1) осуществлялось методом сеток. Для исключения расходимости вычислений применена неявная схема (рисунок 1), изложенная в работе [5] и реализованная нами в [2].

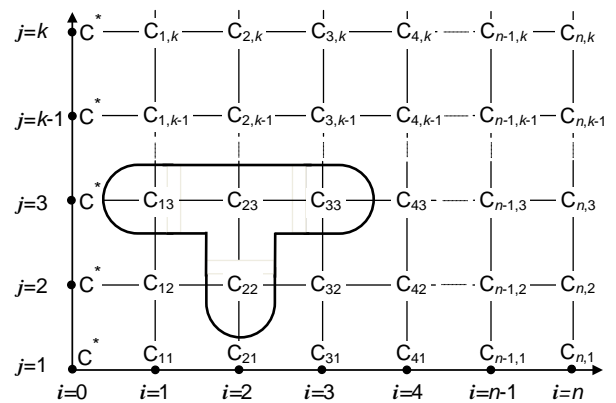


Рисунок 1. Трафарет неявной схемы

Через i обозначены слои по координате, через j – по времени. В узлах сетки располагаются значения влажности и температуры. Значения влажности на нижнем временном слое известны, на верхнем слое – подлежат определению. Полученная на каждом временном слое система линейных уравнений с трехдиагональной матрицей решалась методом последовательного исключения переменных.

Уравнение (1) в конечных разностях имеет вид:

$$\frac{C_{i,j+1} - C_{i,j}}{\Delta \tau} = D(t) \frac{(C_{i-1,j+1} - C_{i,j+1}) - (C_{i,j+1} - C_{i+1,j+1})}{(\Delta x)^2}. \quad (3)$$

После преобразований получим:

$$-Fo \cdot C_{i-1,j+1} + (1 + 2Fo)C_{i,j+1} - Fo \cdot C_{i+1,j+1} = C_{i,j}, \quad (4)$$

где

$$Fo = \frac{D(t)\Delta\tau}{(\Delta x)^2}. \quad (5)$$

Начальные условия: $\tau = 0 \quad C_{i,1} = C_0$.

Граничные условия:

на границе соприкосновения с водой:

$$x = 0 \quad C_{0,j} = C^*,$$

в центре частицы:

$$x = \frac{\delta}{2} \quad C_{n-1,j} = C_{n,j},$$

где C_0 – начальная влажность крупки ($C_0 = 0,194$ об. дол. или $0,147$ мас. дол.);

C^* – равновесная концентрация влаги в твердом теле на границе раздела фаз (найдена при идентификации и составила $0,888$ об. дол. или

$0,85$ мас. дол.); при $x = \frac{\delta}{2}$ производная $\frac{\partial C}{\partial x} = 0$,

т.е. $C_{n-1,j} = C_{n,j}$.

Ниже представлен алгоритм решения системы линейных уравнений с трехдиагональной матрицей, получаемых при использовании неявной схемы при разбиении пространственной координаты на n участков и числе шагов интегрирования по времени равно k .

Для начального временного слоя ($j = 1$) и второго слоя ($j = 2$) при n шагах интегрирования по координате уравнение (4) принимает вид системы уравнений с трехдиагональной матрицей:

$$-Fo \cdot C_{0,2} + (1 + 2Fo)C_{1,2} - Fo \cdot C_{2,2} = C_{1,1} \quad (6)$$

$$-Fo \cdot C_{1,2} + (1 + 2Fo)C_{2,2} - FoC_{3,2} = C_{2,1} \quad (7)$$

.....

$$-Fo \cdot C_{n-2,2} + (1 + 2Fo)C_{n-1,2} - FoC_{n,2} = C_{n-1,1} \quad (8)$$

$$C_{n-1,1} = C_{n,1} \quad (9)$$

Строго говоря, на соседних временных слоях величины температур различны, а поэтому различны и величины $Fo = \frac{D(t)\Delta\tau}{(\Delta x)^2}$. Од-

нако на соседних временных слоях температура отличается на $0,05$ °С, и этим различием можно пренебречь. При переходе же на последний слой осуществляется пересчет температуры и величины Fo .

Обозначим:

$$A_i = -Fo; \quad B_i = (1 + 2Fo); \quad D_i = -Fo; \quad \varepsilon_1 = C_{1,1};$$

$$\varepsilon_2 = C_{2,1}; \quad \varepsilon_3 = C_{3,1}; \quad \dots \quad \varepsilon_{n-1} = C_{n-1,1}; \quad \varepsilon_n = C_{n,1};$$

$$\varepsilon'_1 = \varepsilon_1 - A_1C^*; \quad B'_1 = B_1.$$

Учтем, что $C_{0,j} = C^*$ и получим:

$$B'_1C_{1,2} + D_1C_{2,2} = \varepsilon'_1 \quad (10)$$

$$A_2C_{1,2} + B_2C_{2,2} + D_2C_{3,2} = \varepsilon_2 \quad (11)$$

.....

$$A_{n-1}C_{n-2,2} + B_{n-1}C_{n-1,2} + D_{n-1}C_{n,2} = \varepsilon_n \quad (12)$$

$$C_{n-1,1} = \varepsilon_n \quad (13)$$

Решим систему (10)-(13) следующим образом. Умножая каждое слагаемое уравнения (10) на A_2 / B'_1 , получим (14):

$$A_2C_{1,2} + D_1 \frac{A_2}{B'_1} C_{2,2} = \frac{A_2}{B'_1} \varepsilon'_1. \quad (14)$$

Из уравнения (11) вычтем уравнение (14):

$$\left(B_2 - D_1 \frac{A_2}{B'_1} \right) C_{2,2} + D_2C_{3,2} = \varepsilon_2 - \frac{A_2}{B'_1} \varepsilon'_1. \quad (15)$$

Обозначим:

$$B'_2 = B_2 - D_1 \frac{A_2}{B'_1}; \quad \varepsilon'_2 = \varepsilon_2 - \frac{A_2}{B'_1} \varepsilon'_1. \quad (16)$$

С учетом выражений (16) уравнение (15) примет вид:

$$B'_2C_{2,2} + D_2C_{3,2} = \varepsilon'_2. \quad (17)$$

После преобразований получена следующая система уравнений:

$$B'_1C_{1,2} + D_1C_{2,2} = \varepsilon'_1; \quad (18)$$

$$B'_2C_{2,2} + D_2C_{3,2} = \varepsilon'_2; \quad (19)$$

$$B'_{n-1}C_{n-1,2} + D_{n-1}C_{n,2} = \varepsilon'_{n-1}. \quad (20)$$

Так как $C_{n-1,2} = C_{n,2}$, то из уравнения (20) определена концентрация $C_{n-1,2}$, из уравнения (19) – концентрация $C_{2,2}$, из уравнения (18) – концентрация $C_{1,2}$. Таким образом, из системы уравнений (18)-(20) найдены концентрации на 2-м временном слое:

$$C_{n-1,2} = \frac{\varepsilon'_{n-1}}{B'_{n-1} + D_{n-1}}; \quad (21)$$

.....

$$C_{2,2} = \frac{\varepsilon'_2 - D_2C_{3,2}}{B'_2}; \quad (22)$$

$$C_{1,2} = \frac{\varepsilon'_1 - D_1C_{2,2}}{B'_1}. \quad (23)$$

Аналогичным путем осуществлен переход от второго слоя к третьему и т.д., вплоть до определения концентрации во всех узлах сетки. Распространяя полученный результат на $i = 1 \dots n - 2$ и $j = 2 \dots k$, имеем

$$C_{i,j} = \frac{\varepsilon'_i - D_iC_{i+1,j}}{B'_i}, \quad (24)$$

Для $i = n$ и $i = n - 1$ имеем:

$$C_{n-1,j} = \frac{\varepsilon'_{n-1}}{B'_{n-1} + D_{n-1}};$$

$$C_{n,j} = C_{n-1,j}.$$

Коэффициенты определены следующими уравнениями:

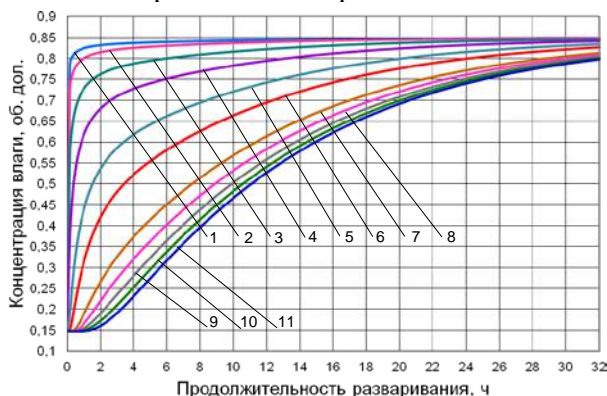
$$B'_i = B_i - D_{i-1} \frac{A_i}{B'_{i-1}}, \quad (25)$$

где $i = 2 \dots n$; $B'_1 = B_1$; $\varepsilon'_1 = \varepsilon_1 - A_1 C^*$.

$$\varepsilon'_i = \varepsilon_i - \frac{A_i}{B'_{i-1}} \varepsilon'_{i-1}, \quad (26)$$

где $i = 2 \dots n - 1$.

По вышеизложенной методике определяются концентрации влаги $C_{i,j}$ в узлах сетки по всем координатным и временным слоям.



Номер слоя: 1 – 1; 2 – 2; 3 – 5; 4 – 10; 5 – 20; 6 – 30; 7 – 50; 8 – 60; 9 – 70; 10 – 80; 11 – 100

Рисунок 2. Расчет по диффузионной модели

Как видно из рисунка 2, концентрация влаги изменяется в пространстве и во времени. График построен при следующем температурном режиме: первые 30 минут температура равна 50 °С, от 30 до 50 минут температура изменялась от 50 до 70 °С со скоростью 1 °/мин и при времени, большем, чем 50 мин температура оставалась постоянной, равной 70 °С. Таким образом, чисто диффузионная модель, учитывающая изменение температуры, дает время разваривания крупки, имеющей толщину 1 мм, равное 32 ч, в то время как реальный процесс разваривания был завершен за 225 мин. С целью выявления причин существенного отклонения теоретических данных от экспериментальных был проведен эксперимент по развариванию при температуре 90 °С пшеничной крупки, полученной после дробилки и вальцов, размером порядка 1 мм. Частицы были замочены водой, температура которой 40 °С, суспензия быстро разогрета до 90 °С и выдержана при

этой температуре в течение 1 часа. Под микроскопом были сфотографированы края сухой и разваренной частиц (рисунок 3).

Из рисунка 3 видно, что сухая частица состоит из крахмальных гранул, размер которых в пересчете на эквивалентный диаметр составил 18 мкм. После разваривания размер гранул увеличился до 31,4-31,45 мкм. В среднем при размере 31,42 гранулы разрывались и крайний крахмальный слой переходил в жидкую фазу. В соответствии с этой картиной разбухшая гранула в момент отрыва слоя имела концентрацию воды порядка 80 % мас.



Рисунок 3. Внешний вид сухой и разваренной частиц крупки

Для моделирования описанного процесса была рассмотрена теория набухания крахмальных гранул. По процессу набухания накоплен обширный экспериментальный материал, результаты которого обработаны с использованием модели химических реакций 1-го [6-8], 2-го [9-11] и 3-го [7] порядка. Экспериментальные результаты авторов вместе с собственными экспериментальными данными [9] обобщены в виде графика, представленного на рисунке 4.

На рисунке 4: D_0 – диаметр исходной (сухой) гранулы крахмала, мкм; D_m – максимальный диаметр набухшей гранулы крахмала, мкм; D_t – текущий диаметр гранулы крахмала (при набухании), мкм; V_0 – предэкспоненциальный множитель, c^{-1} , E_a – энергия активации, Дж/моль; $R = 8,314$ – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T – температура, К; τ – время, с.

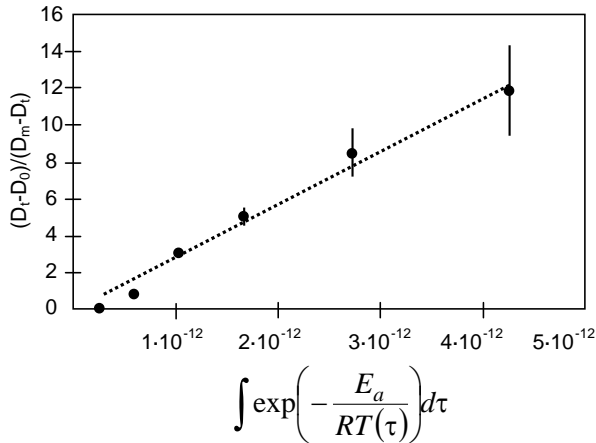


Рисунок 4. Зависимость $(D_t - D_0)/(D_m - D_t)$ как функция от $\int \exp\left(-\frac{E_a}{RT(\tau)}\right) d\tau$

По этим данным определена величина энергии активации реакции набухания крахмальных гранул $E_a = 84,8$ кДж/моль, и множитель V_0 , равный $2,84 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$. В результате получено уравнение [9]:

$$\frac{D_t - D_0}{D_m - D_t} = V_0 \int \exp\left(-\frac{E_a}{RT(\tau)}\right) d\tau. \quad (27)$$

Из уравнения (27) найдена величина D_t

$$D_t = \frac{D_0 + D_m \left[V_0 \int \exp\left(-\frac{E_a}{RT(\tau)}\right) d\tau \right]}{1 + V_0 \int \exp\left(-\frac{E_a}{RT(\tau)}\right) d\tau}. \quad (28)$$

По уравнению (28) путем численного интегрирования проведен расчет зависимости диаметра крахмальной гранулы от температуры. Температура изменялась от 20 °С до 120 °С со скоростью 1 °С/с. Результаты представлены на рисунке 5.

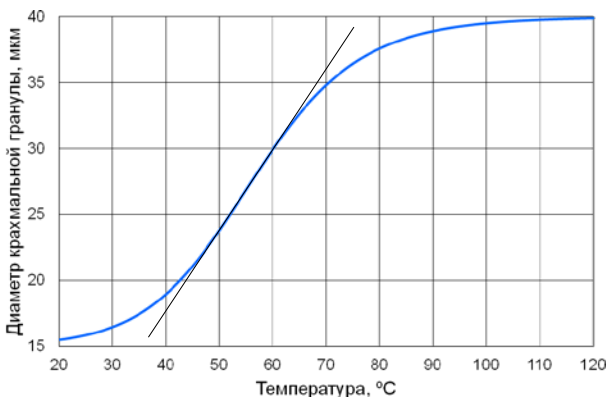


Рисунок 5. Изменение диаметра крахмальной гранулы в зависимости от температуры

При низких температурах диаметр возрастает медленно, затем в диапазоне температур от 45 °С до 65 °С изменение диаметра происходит практически по прямой, а при более высоких температурах кривая асимптотически приближается к 40 мкм.

Обзор последующих работ по набуханию крахмальных гранул выполнен в работе [12]. Приведены данные по равновесному среднему диаметру. Рекомендована сигмообразная модель для вычисления равновесного среднего диаметра [13]. На рисунке 6 представлены также расчеты по другим моделям [14-15], которые имеют большее отклонение от экспериментальных данных.

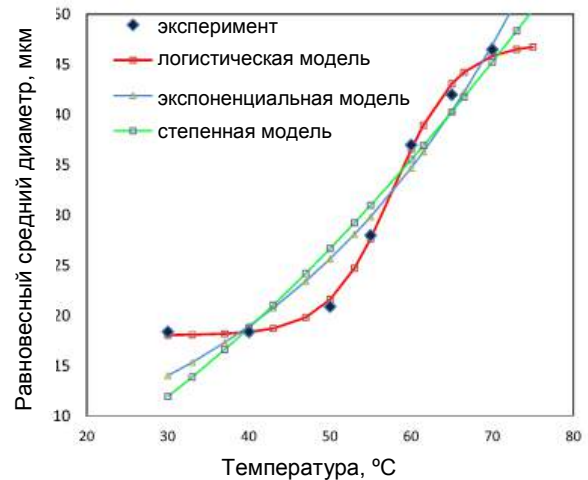


Рисунок 6. Изменение равновесного среднего диаметра крахмальной гранулы в зависимости от температуры

В связи с тем, что по результатам работы [9] получается качественно такая же зависимость, как и представленная на рисунке 6, в дальнейшем для моделирования процесса набухания крахмальных гранул использовано уравнение (28).

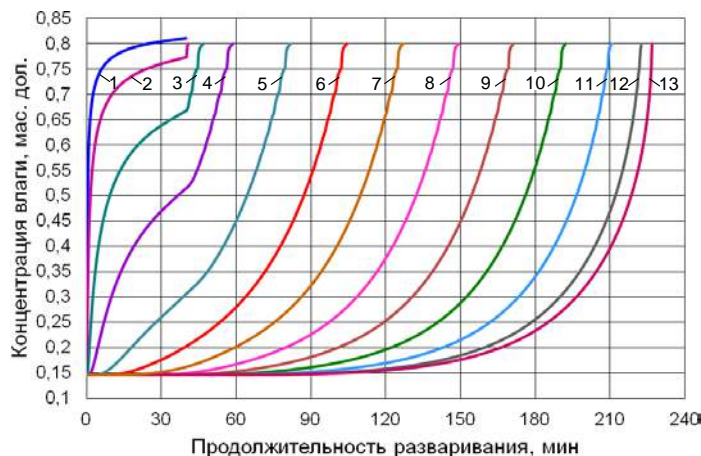
В качестве экспериментальных данных для моделирования взяты результаты работы [16] по развариванию ячменной крупки. В эксперименте [16] проводилось разваривание в соответствии с температурным режимом, представленным при построении зависимостей на рисунке 2.

Процесс диффузионного насыщения протекает одновременно с процессом набухания гранул. Расчет должен проводиться по лимитирующему, т.е. более медленному, процессу. При математическом моделировании была использована сетка с 4800 слоями по времени и 100 слоями по координате.

Сначала была рассчитана кинетика набухания гранул. Время до разрыва крахмальных гранул и отрыва крахмального слоя оказалось равным 40 мин. Аналогичное время

для диффузионного процесса оказалось равным 24,5 мин. Так как эти процессы идут независимо друг от друга, то вплоть до времени 40 мин расчет проводился по набуханию. В это время 2-й слой насыщался до концентрации влаги, равной 75 % мас. После отрыва 1-го слоя начинался более быстрый рост концентрации на 2-м слое. Время его насыщения до

максимального диаметра (состояния отрыва) рассчитывалось по диффузионному механизму. Аналогично проводился расчет всех последующих координатных слоев. Состояние отрыва ловилось в узлах сетки. Согласно модели полное разваривание частичек материала произошло за время 225 мин, что согласуется с экспериментальными данными.



Номер слоя: 1 – 1; 2 – 2; 3 – 5; 4 – 10; 5 – 20; 6 – 30; 7 – 540; 8 – 50; 9 – 60; 10 – 70; 11 – 80; 12 – 90; 13 – 100

Рисунок 7. Расчет по разработанной модели

Таким образом, разработана модель разваривания зернового замеса, учитывающая разрыв крахмальных гранул при набухании и отрыв слоя, граничащего с жидкой фазой, до

полного разваривания зерновой крупки. Показано хорошее качественное согласование расчетных и экспериментальных данных.

ЛИТЕРАТУРА

1 Востриков С.В. Теоретические основы и разработка прикладных задач безотходной технологии спиртового производства: дис. ... д-ра техн. наук: 03.00.23, 05.18.07. Воронеж: ВГТА, 2000. 518 с.

2 Короткова Т.Г., Левашова Л.М., Черепов С.В. Использование неявной схемы и метода исключения Гаусса при моделировании насыщения зерновой крупки водой и сушки упаренной барды // Новые технологии. 2012. № 2. С.19-26.

3 Дворецкий С.И., Дмитриев В.М., Кормильцин Г.С., Пестрецов С.И. и др. Исследование кинетики сушки зерновых культур // Вестник ТГТУ. 2002. Т 8. № 2. С. 228-239.

4 Черепов С.В., Сиюхов Х.Р., Короткова Т.Г., Солонникова Н.В. и др. Математическое моделирование процесса разваривания ячменной крупки // Известия вузов. Пищевая технология. 2014. № 1. С.88-92.

5 Воробьев А.Х. Диффузионные задачи в химической кинетике: учебное пособие. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2003. 98 с.

6 Kubota K., Hosokawa Y., Suzuki K., Hosaka H. Studies on the gelatinization rate of rice and potato starches. Journal of Food Science, 1979, no. 44, pp. 1394–1397.

7 Lund D. Influence of time, temperature, moisture, ingredients, and processing conditions on starch gelatinization. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 1984, no. 20(4), pp. 249–273.

8 Okechukwu P. E., Rao, M. A. Influence of granule size on viscosity of cornstarch suspension. Journal of Texture Studies, 1995, no. 26, pp. 501–516.

9 Lagarrigue S., Alvarez G, Cuvelier G., Flick D. Swelling kinetics of waxy maize and maize starches at high temperatures and heating rates. Carbohydrate Polymers, 2008, no. 73, pp. 148–155.

10 Chen G., Campanella O.H., Purkayastha S. A dynamic model of crosslinked corn starch granules swelling during thermal processing. Journal of Food Engineering, 2007, no. 81, pp. 500–507.

11 Peleg M. An empirical model for the description of moisture sorption curves. Journal of Food Science, 1988, no. 53, pp. 1216–1219.

12 Malumba P., Jacquet N., Delimme G., Lefebvre F. et al. The swelling behaviour of wheat starch granules during isothermal and non-isothermal treatments. Journal of Food Engineering, 2013, no. 114, pp. 199–206.

13 Malumba P., Janas S., Masimango T., Sindic M. et al. Influence of drying temperature on the wet-milling performance and the proteins

solubility indexes of corn kernels. *Journal of Food Engineering*, 2009, no. 95, pp. 393–399.

14 Okechukwu P.E., Rao M.A. Kinetics of cowpea starch gelatinization based on granule swelling. *Starch*, 1998, no. 48 (2), pp. 43–47.

15 Rao M.A., Tattiyakul J. Granule size and rheological behavior of heated tapioca starch dispersions. *Carbohydrate Polymers*, 1999, no. 38, pp. 123–132.

16 Баракова Н.В. Разработка технологии этилового спирта при пониженных температурных режимах водно-тепловой и ферментативной обработки высококонцентрированных замесов из ячменя: дис. ... канд. техн. наук, 05.18.07. Санкт-Петербург: С.-Пб ГУНИПТ, 2010. 120 с.

REFERENCES

1 Vostrikov S.V. *Teoreticheskie osnovy i razrabotka prikladnykh zadach bezotkhodnoi tekhnologii spirtovogo proizvodstva*. Diss. dokt. tekhn. Nauk [Theoretical frameworks and applications nonwaste technology of alcohol production. Dr. tech. sci. diss.] Voronezh, 2000. 518 p. (In Russ.).

2 Korotkova T.G., Levashova L.M., Cherepov S.V. Using the implicit scheme and Gaussian elimination in modeling saturation grain semolina with water and drying the evaporated stillage. *Novye tekhnologii*. [New Technology], 2012, no. 2, pp. 19–26 (In Russ.).

3 Dvoreckij S.I., Dmitriev V.M., Kormil'tsin G.S., Pestretsov S.I. et al. Investigation of the kinetics of drying crops. *Vestnik TGTU*. [Bulletin of TSTU], 2002. vol. 8, no. 2, pp. 228–239. (In Russ.).

4 Cherepov S.V., Siiukhov Kh.R., Korotkova T.G., Solonnikova N.V. et al. *Izvestiia vuzov. Pishchevaia tekhnologiya*. [Simulation of the process of cooking barley grits], 2014, no. 1, pp. 88–92. (In Russ.).

5 Vorob'ev A.Kh. *Diffuzionnye zadachi v khimicheskoi kinetike* [Diffusion problems in chemical kinetics]. Moscow, Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta, 2003. 98 p. (In Russ.).

6 Kubota K., Hosokawa Y., Suzuki K., Hosaka H. Studies on the gelatinization rate of rice and potato starches. *Journal of Food Science*, 1979, no. 44, pp. 1394–1397.

7 Lund D. Influence of time, temperature, moisture, ingredients, and processing conditions on starch gelatinization. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1984, no. 20(4), pp. 249–273.

8 Okechukwu P. E., Rao, M. A. Influence of granule size on viscosity of cornstarch suspension. *Journal of Texture Studies*, 1995, no. 26, pp. 501–516.

9 Lagarrigue S., Alvarez G., Cuvelier G., Flick D. Swelling kinetics of waxy maize and maize starches at high temperatures and heating rates. *Carbohydrate Polymers*, 2008, no. 73, pp. 148–155.

10 Chen G., Campanella O.H., Purkayastha S. A dynamic model of crosslinked corn starch granules swelling during thermal processing. *Journal of Food Engineering*, 2007, no. 81, pp. 500–507.

11 Peleg M. An empirical model for the description of moisture sorption curves. *Journal of Food Science*, 1988, no. 53, pp. 1216–1219.

12 Malumba P., Jacquet N., Delimme G., Lefebvre F. et al. The swelling behaviour of wheat starch granules during isothermal and non-isothermal treatments. *Journal of Food Engineering*, 2013, no. 114, pp. 199–206.

13 Malumba P., Janas S., Masimango T., Sindic M. et al. Influence of drying temperature on the wet-milling performance and the proteins solubility indexes of corn kernels. *Journal of Food Engineering*, 2009, no. 95, pp. 393–399.

14 Okechukwu P.E., Rao M.A. Kinetics of cowpea starch gelatinization based on granule swelling. *Starch*, 1998, no. 48 (2), pp. 43–47.

15 Rao M.A., Tattiyakul J. Granule size and rheological behavior of heated tapioca starch dispersions. *Carbohydrate Polymers*, 1999, no. 38, pp. 123–132.

16 Barakova N.V. *Razrabotka tekhnologii etilovogo spirta pri ponizhennykh temperaturnykh rezhimakh vodno-teplovoy i fermentativnoi obrabotki vysokokontsentrirrovannykh zamesov iz iachmenia*. Diss. kand. tekhn. Nauk [Development of technology for ethanol at low temperature regimes of water and heat and enzymatic treatment of highly concentrated mixtures of barley. Cand. tech. sci. diss.]. St. Petersburg, 2010. 120 p.