

УДК 633.2:519.6

ББК 42.2

К-68

Короткова Татьяна Германовна, кандидат технических наук, доцент кафедры процессов и аппаратов пищевых производств Кубанского государственного технологического университета, e-mail: korotkova1964@mail.ru;

Левашова Лариса Михайловна, методист заочной формы обучения Майкопского государственного технологического университета, т.: 8(8772)571284;

Черепов Сергей Владимирович, аспирант очной формы обучения кафедры технологии, машин и оборудования пищевых производств Майкопского государственного технологического университета, т.: 8(8772)571284, e-mail: Hemul-86@mail.ru.

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЯВНОЙ СХЕМЫ И МЕТОДА ИСКЛЮЧЕНИЯ ГАУССА
ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ НАСЫЩЕНИЯ ЗЕРНОВОЙ КРУПКИ ВОДОЙ
И СУШКИ УПАРЕННОЙ БАРДЫ***
(рецензирована)

Выполнено решение уравнения нестационарной диффузии с использованием неявной схемы и метода исключения Гаусса. Численными методами исследован процесс насыщения зерновой крупки водой и диффузионное удаление влаги сушкой из сгущенной барды. Экспериментально исследована кинетика сушки кукурузной барды. Установлено, что сушка барды в периоде падающей скорости протекает в диффузионном режиме. Показано, что для согласования опытных данных по процессу гидродинамической ферментативной обработки замеса с теорией в диффузионной модели должна быть учтена кинетика ферментативного гидролиза.

Ключевые слова: нестационарная диффузия, сушка упаренной барды, насыщение зерновой крупки, математическое моделирование, неявная схема, метод Гаусса.

Korotkova Tatiana Germanovna, Candidate of Technical Sciences, assistant professor of the Department of Processes and Apparatus of Food Production, Kuban State Technological University, e-mail: korotkova1964@mail.ru;

Levashova Larisa Michailovna, methodologist of correspondence courses of Maikop State Technological University, tel.: 877257-12-84;

Cherepov Sergey Vladimirovich, post graduate student of the Department of Technology, Machinery and Food Industries of Maikop State Technological University, tel: 8772571284, e-mail: Hemul-86@mail.ru.

**USING IMPLICIT SCHEME AND THE GAUSSIAN ELIMINATION METHOD
IN MODELING GRAIN GROATS WATER SATURATION AND STEAMED
DISTILLERY WASTE DRYING**
(reviewed)

The equation of the diffusion with an implicit scheme and the method of elimination of Gauss has been solved. Numerical methods to investigate the process of saturation of grain groats with water and the diffusion removal of moisture from the drying thickened stillage have been used. The kinetics of drying corn stillage has been experimentally studied. It has been stated that drying of stillage in a period of falling rate occurs in the diffusive regime. It has been shown that to co-ordinate experimental data on hydrodynamic enzymatic treatment of the mix with the theory the kinetics of enzymatic hydrolysis should be taken into account in the diffusion model.

Keywords: nonstationary diffusion, drying of steamed stillage, saturation of the grain groats, mathematical modeling, implicit scheme, the method of Gauss.

На современных брагоректификационных установках (БРУ) используется прогрессивный способ разваривания зерновой крупки, а именно гидродинамическая ферментативная обработка (ГДФО). Вместе с тем осуществляется глубокая переработка барды, как правило, включающая три стадии: центрифугирование, упаривание и сушка сгущенной барды. В процессе ГДФО лимитирующей стадией является диффузионное насыщение зерновой крупки водой. При сушке сгущенной барды протекает обратный процесс, лимитирующей стадией которого является диффузионное удаление воды. Эти два процесса описываются уравнениями математической физики.

В настоящей работе основное внимание уделено алгоритму решения уравнения нестационарной диффузии в частице материала при диффузионном насыщении зерновой крупки водой и при диффузионном удалении влаги из барды, т.е. в периоде, следующем за удалением свободной влаги. Используется неявная схема и метод исключения Гаусса для решения получаемой по ней системы уравнений.

Предварительно были выполнены экспериментальные исследования и производственные испытания.

Процесс сушки слоя упаренной барды был исследован при переработке в лабораторных условиях кукурузной барды, полученной на спиртзаводе ООО «КХ Восход» (г. Майкоп). Определены физико-химические показатели барды (таблица 1).

Таблица 1 - Физико-химические показатели кукурузной барды ООО «КХ Восход» (г. Майкоп)

Наименование	Показатель
Массовая доля влаги, %	95,34
Массовая доля сухого вещества, %	4,66
Массовая доля сырого протеина, %	1,46
Суммарная массовая доля растворимых протеинов, %	0,68
Суммарная массовая доля растворимого протеина к общему содержанию сырого протеина, %	46,58
Массовая доля жира, %	0,56
Массовая доля сырой золы, %	0,35
Массовая доля водорастворимых углеводов, %	1,04

В работе [1] нами была исследована целесообразность энергосбережения при производстве этанола путем использования вторичного пара при обогреве колонн БРУ. Предварительно определено содержание сухих веществ в барде. Оно связано с концентрацией исходного сусла. Последнее зависит от требований к качеству пищевого спирта. В зависимости от требований к качеству спирта готовится сусло различной концентрации.

Анализ низкоконцентрированной и высококонцентрированной кукурузной барды показал, что содержание сухих веществ в низкоконцентрированной барде составляет 4,5% мас. В высококонцентрированной нефилтрованной – 6% мас., в филтрованной – 2,6% мас. Математическое моделирование технологической схемы БРУ, совмещенной с 2-х-корпусной выпарной установкой было проведено для следующих параметров: содержание сухих в барде 6 % мас., расход барды 161,8 м³/сут. барды. При выпаривании на 1-й ступени получено 138 м³/сут. вторичного пара, который полностью обеспечивает потребность в теплоте процесса брагоректификации. Количество упаренной барды после работающей под вакуумом 2-й ступени выпаривания составило 18,2 м³/сут. с концентрацией 30% об. сухих веществ. Методами математического моделирования показано, что количество паров 1-й ступени достаточно, чтобы обеспечить теплотой процесс брагоректификации. Полученные данные были проверены экспериментально при выпаривании кукурузной барды с содержанием сухих веществ в среднем по результатам параллельных опытов 4,85% мас. Из 500 мл барды отогнано 420 мл. В результате получили 80 мл упаренной барды с содержанием сухих веществ 30,8% мас. или 22,9% об., которая при взятии пробы в бюксы отсепарировалась на сгусток пастообразного типа и жидкую массу. Фактически она не подлежит дальнейшему выпариванию, так как технически организовать этот процесс весьма сложно. Следовательно, выпаривание в совмещенном процессе надо проводить в одну ступень, а дальнейшее использование сгущенной барды проводить путем сушки. Взяты две навески, и исследована кинетика сушки барды, результаты которого представлены в таблице 2. Для сушки взят слой барды толщиной 5 мм.

Таблица 2 - Результаты экспериментального исследования кинетики сушки кукурузной барды

Продолжительность сушки, мин	1 бюкс (масса пустого бюкса 37,16 г)				2 бюкс (масса пустого бюкса 41,23 г)			
	масса бюкса с материалом, г	масса материала, г	количество влаги, г	влажность, мас. дол.	масса бюкса с материалом, г	масса материала, г	количество влаги, г	влажность, мас. дол.
0	55,52	18,36	12,70	0,6919	58,29	17,07	11,80	0,6919
30	54,06	16,90	11,24	0,6653	57,21	15,98	10,72	0,6711
50	53,22	16,06	10,40	0,6478	56,55	15,32	10,06	0,6569
65	52,66	15,50	9,84	0,6351	56,04	14,81	9,55	0,6451
80	51,9	14,74	9,08	0,6162	55,34	14,11	8,85	0,6275
95	51,34	14,18	8,52	0,6011	54,85	13,62	8,36	0,6141
110	50,58	13,42	7,76	0,5785	54,13	12,90	7,64	0,5925
125	50,1	12,94	7,28	0,5629	53,7	12,47	7,21	0,5785
155	49,25	12,09	6,43	0,5321	52,87	11,64	6,38	0,5484
166	48,96	11,80	6,14	0,5206	52,58	11,35	6,09	0,5369
180	48,56	11,40	5,74	0,5038	52,18	10,95	5,69	0,5200
195	48,23	11,07	5,41	0,4890	51,9	10,67	5,41	0,5074
210	47,86	10,70	5,04	0,4713	51,56	10,33	5,07	0,4912
235	47,16	10,00	4,34	0,4343	50,89	9,66	4,40	0,4559
250	46,99	9,83	4,17	0,4246	50,71	9,48	4,22	0,4456
265	46,68	9,52	4,86	0,4058	50,43	9,20	3,94	0,4287
280	46,37	9,21	3,55	0,3858	50,08	8,85	3,59	0,4061
295	46,13	8,97	3,31	0,3694	49,84	8,61	3,35	0,3895
310	45,86	8,70	3,04	0,3498	49,53	8,30	3,04	0,3667
325	45,64	8,48	2,82	0,3329	49,3	8,07	2,81	0,3487
345	45,29	8,13	2,47	0,3042	48,9	7,67	2,41	0,3147
375	44,91	7,75	2,09	0,2701	48,54	7,31	2,05	0,2810
410	44,50	7,34	1,68	0,2293	48,09	6,86	1,60	0,2338
500	44,03	6,87	1,04	0,1521	47,70	6,47	1,04	0,1610
570	43,58	6,42	0,76	0,1189	47,32	6,09	0,83	0,1369
750	43,36	6,20	0,46	0,0742	47,01	5,78	0,44	0,0764
900	43,14	5,98	0,32	0,0541	46,74	5,51	0,25	0,0461

На рисунках 1 и 2 приведены зависимости изменения концентрации влаги от продолжительности сушки, где точки отвечают экспериментальным данным.

Сушка проводилась в мягком режиме при 60°C, чтобы не денатурировались белки, содержащиеся в упаренной барде. Как видно из полученных данных на кривой ясно выражены три периода сушки: период прогрева материала в течение порядка 50 мин., период постоянной скорости сушки длился до 410 мин., затем начинался период падающей скорости сушки. Была выполнена проверка описывается ли этот период как чисто диффузионный процесс. При этом использовалось уравнение одномерной нестационарной диффузии, так как высушивался по существу плоский слой. Изменение толщины слоя в процессе сушки в первом приближении не учитывалось.

Уравнение одномерной стационарной диффузии

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

где C – концентрация воды в материале (влажность материала), м³ влаги/м³ влажного материала; τ – время насыщения или сушки, с; x – толщина лепестка после вальцов или толщина высушиваемого слоя барды, м; $D(C)$ – коэффициент диффузии воды в материал при увлажнении или воды в воздух при сушке, м²/с.

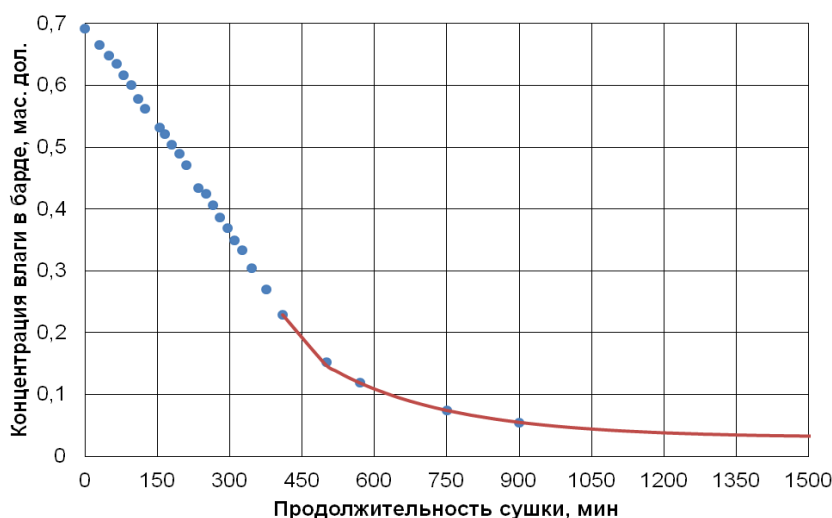


Рис. 1. Зависимость концентрации влаги в барде от продолжительности сушки (опыт №1)

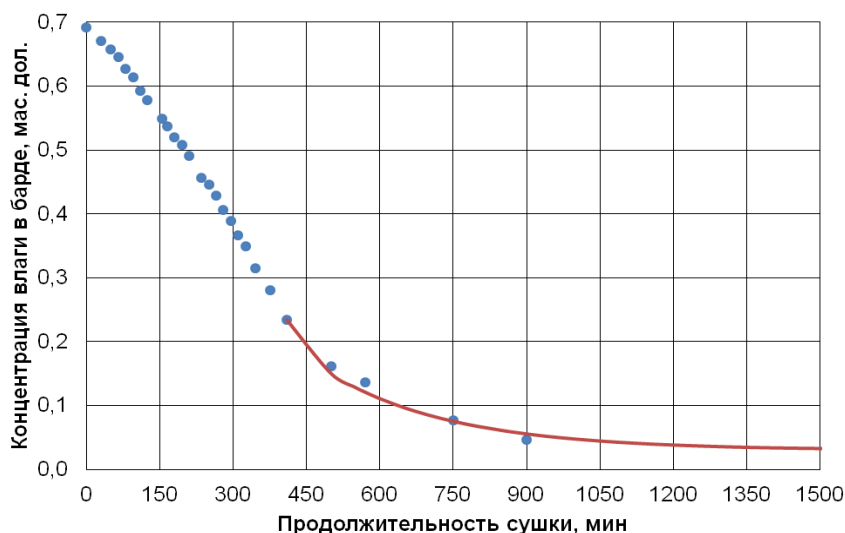


Рис. 2. Зависимость концентрации влаги в барде от продолжительности сушки (опыт №2)

Уравнение (1) в конечных разностях имеет вид

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

После преобразований получим

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

Обозначим

$$Fo = \frac{D(C)\Delta\tau}{(\Delta x)^2}, \quad (4)$$

где Fo – аналог критерия Фурье.

С учетом (4) после преобразования имеем

$$C_{i,j+1} - Fo \cdot C_{i-1,j+1} + 2Fo \cdot C_{i,j+1} - Fo \cdot C_{i+1,j+1} = C_{i,j}. \quad (5)$$

Окончательно получим

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

Уравнения (5) и (6) справедливы для чисто диффузионного процесса. Они решались сеточным методом по неявной схеме, трафарет которой представлен на рисунке 3. Через i обозначены шаги по координате, через j – по времени. В узлах сетки располагаются значения концентраций воды в барде. Значения концентраций с нижнего временного слоя известны, на верхнем слое – подлежат определению. Начальные условия: при $\tau = 0$ концентрация $C_{i,1} = C_0$, где C_0 равна концентрации воды в начале периода падающей скорости сушки. На границе соприкосновения с воздухом граничные условия: при $x = 0$ ($i = 0$) $C_{0,j} = C^*$.

На второй границе раздела между стенкой бьюкса и высушиваемым слоем массообмен не происходит $\frac{\Delta C}{\Delta x} = 0$, т.е. $C_{n-1,j} = C_{n,j}$, где n – это слой, примыкающий к стенке.

Как известно при использовании неявной схемы на каждом временном слое приходится решать систему линейных уравнений с трехдиагональной матрицей. Нами использован для этих целей метод исключения Гаусса, сущность которого иллюстрируется ниже на примере разбиения пространственной координаты на 5 участков (рисунок 3).

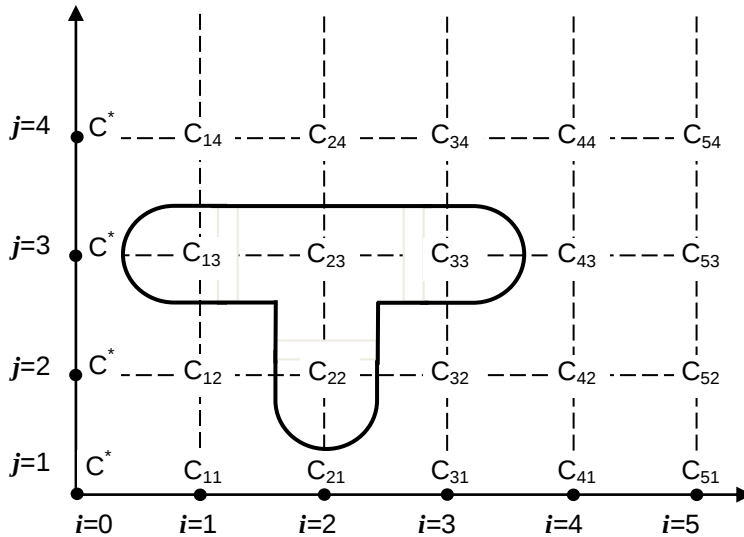


Рис. 3. Трафарет неявной схемы

Для начального временного слоя ($j = 1$) и второго слоя ($j = 2$) при пяти шагах интегрирования по координате уравнение (6) принимает вид

$$-Fo \cdot C_{0,2} + (1 + 2Fo)C_{1,2} - Fo \cdot C_{2,2} = C_{1,1} \quad (7)$$

$$-Fo \cdot C_{1,2} + (1 + 2Fo)C_{2,2} - FoC_{3,2} = C_{2,1} \quad (8)$$

$$-FoC_{2,2} + (1 + 2Fo)C_{3,2} - FoC_{4,2} = C_{3,1} \quad (9)$$

$$-Fo \cdot C_{3,2} + (1 + 2Fo)C_{4,2} - FoC_{5,2} = C_{4,1} \quad (10)$$

$$C_{4,1} = C_{5,1} \quad (11)$$

Обозначим

$$A_i = -Fo; B_i = (1 + 2Fo); D_i = -Fo;$$

$$\varepsilon_1 = C_{1,1}; \varepsilon_2 = C_{2,1}; \varepsilon_3 = C_{3,1}; \varepsilon_4 = C_{4,1}; \varepsilon_5 = C_{5,1}$$

$$\varepsilon_1^* = \varepsilon_1 - A_1 C^*; B'_1 = B_1.$$

Учтем, что $C_{0,j} = C^*$ и получим

$$B'_1 C_{1,2} + D_1 C_{2,2} = \varepsilon'_1 \quad (12)$$

$$A_2 C_{1,2} + B_2 C_{2,2} + D_2 C_{3,2} = \varepsilon_2 \quad (13)$$

$$A_3 C_{2,2} + B_3 C_{3,2} + D_3 C_{4,2} = \varepsilon_3 \quad (14)$$

$$A_4 C_{3,2} + B_4 C_{4,2} + D_4 C_{5,2} = \varepsilon_4 \quad (15)$$

$$C_{4,1} = \varepsilon_5 \quad (16)$$

Решим систему (12)-(16) методом исключения переменных Гаусса.

Умножая каждое слагаемое уравнения (12) на $\frac{A_2}{B'_1}$ и, вычитая результат из уравнения (13), получим

$$(18). \quad A_2 C_{1,2} + D_1 \frac{A_2}{B'_1} C_{2,2} = \frac{A_2}{B'_1} \varepsilon'_1. \quad (17)$$

Из уравнения (13) вычтем уравнение (17)

$$\left(B_2 - D_1 \frac{A_2}{B'_1} \right) C_{2,2} + D_2 C_{3,2} = \varepsilon_2 - \frac{A_2}{B'_1} \varepsilon'_1. \quad (18)$$

Обозначим

$$B'_2 = B_2 - D_1 \frac{A_2}{B'_1}; \quad \varepsilon'_2 = \varepsilon_2 - \frac{A_2}{B'_1} \varepsilon'_1 \quad (19)$$

С учетом выражений (19) уравнение (18) примет вид

$$B'_2 C_{2,2} + D_2 C_{3,2} = \varepsilon'_2. \quad (20)$$

Умножим каждое слагаемое выражения (20) на $\frac{A_3}{B'_2}$

$$A_3 C_{2,2} + D_2 \frac{A_3}{B'_2} C_{3,2} = \frac{A_3}{B'_2} \varepsilon'_2. \quad (21)$$

Вычтем из уравнения (14) уравнение (21)

$$\left(B_3 - D_2 \frac{A_3}{B'_2} \right) C_{3,2} + D_3 C_{4,2} = \varepsilon_3 - \frac{A_3}{B'_2} \varepsilon'_2. \quad (22)$$

Обозначим

$$B'_3 = B_3 - D_2 \frac{A_3}{B'_2}; \quad \varepsilon'_3 = \varepsilon_3 - \frac{A_3}{B'_2} \varepsilon'_2. \quad (23)$$

Уравнение (22) примет вид

$$B'_3 C_{3,2} + D_3 C_{4,2} = \varepsilon'_3. \quad (24)$$

Умножим каждое слагаемое выражения (24) на $\frac{A_4}{B'_3}$

$$A_4 C_{3,2} + D_3 \frac{A_4}{B'_3} C_{4,2} = \frac{A_4}{B'_3} \varepsilon'_3. \quad (25)$$

Вычтем из уравнения (15) уравнение (25)

$$\left(B_4 - D_3 \frac{A_4}{B'_3} \right) C_{4,2} + D_4 C_{5,2} = \varepsilon_4 - \frac{A_4}{B'_3} \varepsilon'_3. \quad (26)$$

Обозначим

$$B'_4 = B_4 - D_3 \frac{A_4}{B'_3}; \quad \varepsilon'_4 = \varepsilon_4 - \frac{A_4}{B'_3} \varepsilon'_3. \quad (27)$$

Уравнение (26) примет вид

$$B'_4 C_{4,2} + D_4 C_{5,2} = \varepsilon'_4. \quad (28)$$

После вышеизложенных преобразований получена следующая система уравнений

$$B'_1 C_{1,2} + D_1 C_{2,2} = \varepsilon'_1; \quad (29)$$

$$B'_2 C_{2,2} + D_2 C_{3,2} = \varepsilon'_2; \quad (30)$$

$$B'_3 C_{3,2} + D_3 C_{4,2} = \varepsilon'_3; \quad (31)$$

$$B'_4 C_{4,2} + D_4 C_{5,2} = \varepsilon'_4; \quad (32)$$

Так как $C_{4,2} = C_{5,2}$, то из уравнения (32) можно определить концентрацию $C_{4,2}$, из уравнения (31) – концентрацию $C_{3,2}$, из уравнения (30) – концентрацию $C_{2,2}$, из уравнения (29) – концентрацию $C_{1,2}$

Таким образом, из системы уравнений (29)-(32) найдем концентрации на 2-м временном слое

$$C_{4,2} = \frac{\varepsilon'_4}{B'_4 + D_4}; \quad (33)$$

$$C_{3,2} = \frac{\varepsilon'_3 - D_3 C_{4,2}}{B'_3}; \quad (34)$$

$$C_{2,2} = \frac{\varepsilon'_2 - D_2 C_{3,2}}{B'_2}; \quad (35)$$

$$C_{1,2} = \frac{\varepsilon'_1 - D_1 C_{2,2}}{B'_1}. \quad (36)$$

Аналогичным путем осуществляется переход от второго слоя к третьему и т.д., вплоть до определения концентрации во всех узлах сетки. Примем число разбиений по координате n и по времени, равной k : $i = 1..n$ и $j = 1..k$

Распространяя полученный результат на $i = 1..n - 2$ и $j = 2..k$ получим

$$C_{i,j} = \frac{\varepsilon'_i - D_i C_{i+1,j}}{B'_i}, \quad (37)$$

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 можно вычислить по следующим уравнениям

$$B'_i = B_i - D_{i-1} \frac{A_i}{B'_{i-1}}, \quad (38)$$

где $i = 2..n$; $B'_1 = B_1$

$$\varepsilon'_i = \varepsilon_i - \frac{A_i}{B'_{i-1}} \varepsilon'_{i-1}, \quad (39)$$

где $i = 2..n - 1$; $\varepsilon_1^* = \varepsilon_1 - A_1 C^*$.

В соответствии с приведенным математическим описанием разработана программа, позволяющая проследить изменение влажности барды при сушке во времени и пространстве для периода диффузионного удаления влаги. В качестве параметров идентификации приняты коэффициент диффузии D и равновесная влажность C^* , которые не поддаются непосредственному экспериментальному определению. Минимум квадратов отклонений расчетных значений от экспериментальных достигнут при $D = 7 \cdot 10^{-10}$ м²/с и равновесной влажности $C^* = 3$ % мас. Равновесная влажность практически достигается за 15 часов сушки (рисунки 1 и 2).

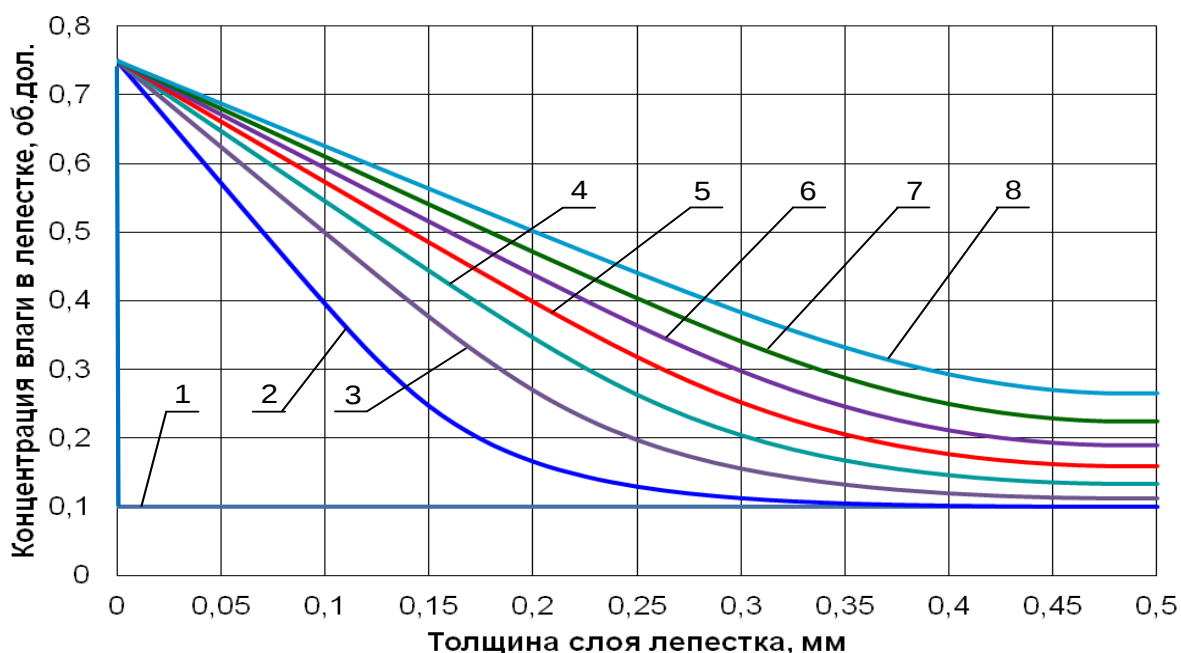
Полученный результат свидетельствует о том, что сушка в периоде падающей скорости протекает в диффузионном режиме, а падение скорости сушки связано с уменьшением движущей силы процесса диффузии.

В дальнейшем предложенная модель была апробирована на процессе насыщения крупки влагой, что имеет место при ГДФО.

На установке производительностью 300 дал/сут. ректификованного спирта была исследована работа аппарата ГДФО. В качестве ГДФО использован вертикальный цилиндрический аппарат с рабочим объемом

3,5 м³, снабженный тремя циркуляционными линиями, на каждой из которых установлен центробежный насос. Измельченное на валковой дробилке зерно с 70%-м проходом через миллиметровое сито в количестве 8 т/сут. предварительно замешивалось с водой при температуре 30°C. В этот смеситель через капельницу подавался разведенный в воде фермент в количестве 20% от его общего расхода. Температура в аппарате ГДФО поддерживалась в пределах 90-95°C за счет нагревания водяным паром замеса и циркулирующей развариваемой массы. Разваривание проводилось в течение 2-х часов, после чего в разваренная масса осахаривалась в аппарате с мешалкой, в который подавалось основное количество фермента. Полученное сусло стерилизовалось, охлаждалось и проходило трехсуточное брожение и разделение на брагоректификационной установке. Об эффективности работы аппарата ГДФО судили по качеству полученного спирта. Дальнейшее совершенствование данного способа требует разработки его подробной математической модели.

В аппарате ГДФО протекает одновременно ряд физических процессов: диффузия влаги и фермента в частицах крупки, которая имеет сложный гранулометрический состав, набухание белков и крахмалов в результате их гидролиза, изменение размеров белков и крахмала, входящих в состав эндосперма и, следовательно, увеличение размеров частиц твердого материала, и, наконец, ферментативный гидролиз крахмала вплоть до превращения его в сахара, и за счет этого уменьшение размеров частиц крупки вследствие растворения.



Время, мин: 1 – 0; 2 – 30; 3 – 60; 4 – 90; 5 – 120; 6 – 150; 7 – 210

Рис. 4. Изменение концентраций влаги по толщине слоя лепестка

В качестве объекта исследования взят лепесток крупки, полученной после измельчения на вальцах. Известно, что гранулометрический состав такой дробленки включает широкий спектр размеров. Для численного исследования принят лепесток толщиной 1 мм. Основной перенос вещества происходит через боковую поверхность лепестка. Влиянием торцевой поверхности пренебрегли. Считали, что на границе с водой в твердом теле достигается равновесная концентрация. Она принята равной $C^* = 0,75$, м³ влаги/м³ влажного материала, на основе опытов по набуханию крупки в дистиллированной воде. Это значение согласуется с данными работы [2] по набуханию крахмала. Влажность исходной крупки принята равной $C_0 = 0,1$ м³ влаги/м³ влажного материала.

Результаты расчетов представлены на рисунке 4. За 3,5 часа не достигается полного насыщения лепестка влагой. Это находится в противоречии с приведенными выше опытными данными. Следовательно, процесс ГДФО не описывается простой диффузионной моделью, так как исследование проведено без учета осахаривания и уменьшения размера лепестка за счет растворения наружных слоев при ферментативном гидролизе. Дальнейшее совершенствование модели будет проведено с учетом зависимости коэффициента диффузии от состава, уменьшения размера лепестка, а, следовательно, с подвижной границей раздела фаз.

**Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и региональных инвесторов в рамках гранта РФФИ (проект №11-08-96507-р_юг_ц).*

Литература:

1. Энергосбережение при производстве этанола / Л.М. Левашова [и др.] // Известия вузов. Пищевая технология. 2011. №1. С. 68-71.
2. Ballegooijen W.G.E., Loon A.M., Zanden A.J.J. Modelling diffusion-limited drying behaviour in a batch fluidized bed dryer // Drying Technology. 1997. V. 15, №3-4. P. 837-855.

References:

1. *Energy saving in the production of ethanol / Levashova L.M. [and oth.] // Proceedings of universities. Food Technology. 2011. № 1. P. 68-71.*
2. *Ballegooijen W.G.E., Loon A.M., Zanden A.J.J. Modelling diffusion-limited drying behaviour in a batch fluidized bed dryer // Drying Technology. 1997.V. 15, № 3 – 4. P. 837-855.*