

Е. В. Фоменко [E. V. Fomenko]
 А. Х.-Х. Нугманов [A. H.-H. Nugmanov]
 О. А. Алексанян [O. A. Aleksanyan]
 Т. С. Нгуен [T. S. Nguyen]

УДК [536.712:536.75/.77]:
 [664.231:66.081]

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПШЕНИЧНОЙ КЛЕЙКОВИНЫ
 НА ОСНОВЕ ЕЕ ГИГРОСКОПИЧЕСКИХ СВОЙСТВ**

**THERMODYNAMIC ANALYSIS OF WHEAT GLUTEN ON THE BASIS
 OF ITS HYGROSCOPIC PROPERTIES**

ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет»,
 г. Астрахань, Россия, e-mail: albert909@yandex.ru

Аннотация. Для влажных термолабильных материалов, к которым относится пшеничная клейковина, статическое равновесие между продуктом и окружающей средой, наступает при условии, когда состояние системы «влажное тело – газ» не изменяется во времени под действием различных внутренних факторов. При таком равновесии количество влаги в гигроскопичном продукте зависит от его вида, вида и энергии содержащейся в нем влаги, и ряда параметров, в частности, температуры и парциального давления паров воды над поверхностью продукта и важно при исследовании гигроскопичности сырья.

Материалы и методы. В статье рассмотрены две основные группы методов получения изотермы сорбции – статические и динамические, что используется для экспериментального определения гигроскопических свойств используются. В рамках данного эмпирического исследования гигроскопических характеристик пшеничной клейковины определялась ее гигроскопичность, характеризующая равновесную влажность продукта, посредством тензометрического метода Ван Бамелена. При определении влажности образцов также определялась погрешность (не менее 3÷5 повторности). Анализ погрешностей на основании статистического анализа выявил, что интервал погрешности результатов имеет тенденцию к росту при разных температурах при росте относительной влажности воздуха.

Результаты. После реализации серии экспериментов на эксикаторной опытной установке были получены изотермы сорбции влаги клейковиной пшеничной, при температурах воздуха 298К и 313К. Математическая обработка экспериментальных данных представлена в виде обобщенной логарифмической зависимости логарифма активности воды от температуры и влагосодержания. На основе полученного обобщенного аппроксимирующего уравнения изотерм сорбции и зная соотношение между влагосодержанием исследуемого материала и известными значениями численных значений показателя активности воды можно определить численные значения свободной энергии, связанной энергии и внутренней энергии (теплового эффекта) процесса сорбции. В процессе удаления влаги, теплоту испарения связанной с материалом, можно представить как сумму: теплоты парообразования свободной влаги, теплоты смачивания и теплоты, учитывающей энтропийную составляющую в уравнении Гиббса-Гельмгольца.

В статье также графически представлена зависимость удельной тепловой энергии испарения от равновесной влажности в процессе сорбции паров воды клейковиной пшеничной. Характер зависимостей удельной тепловой энергии испарения от равновесной влажности для исследуемого продукта типичен для большинства белковых полимеров и обусловлен различными энергетическими формами связи влаги с материалом. Точки перегиба на кривых соответствуют границам между различными формами связи влаги с материалом.

Заключение. Функциональная зависимость согласно формуле 23 позволяет, зная численные значения эмпирических коэффициентов, определить численные значения удельной тепловой энергии испарения для подстановки в дифференциальное уравнение теплопереноса при моделировании теплообменных процессов сушки исследуемого продукта.

Ключевые слова: термодинамический анализ, клейковина, глютен, изотермы сорбции, влагосодержание, адсорбция, тепловой эффект, энтропия.

Abstract. For wet thermolabile materials, which include wheat gluten, the static balance between the product and the environment, occurs under the condition that the state of the "wet body – gas" does not change over time under the influence of various internal factors. At this equilibrium, the amount of moisture in the hygroscopic product depends on its type, type and energy of moisture contained in it, and a number of parameters, in particular, the temperature and partial pressure of water vapor over the surface of the product and is important in the study of the hygroscopicity of raw materials.

Materials and methods. The article discusses two main groups of methods for obtaining sorption isotherms – static and dynamic, which is used for the experimental determination of hygroscopic properties are used. Within the framework of this empirical study

of the hygroscopic characteristics of wheat gluten, its hygroscopicity was determined, which characterizes the equilibrium moisture of the product, by means of the tensometric method of Van Bamelin. The error analysis based on statistical analysis revealed that the error interval of the results tends to increase at different temperatures with an increase in the relative humidity of the air.

Results. After the implementation of a series of experiments on a desiccator pilot plant, the isotherms of moisture sorption by wheat gluten were obtained at air temperatures of 298K and 313K. Mathematical processing of experimental data is presented in the form of a generalized logarithmic dependence of the logarithm of water activity on temperature and moisture content. Based on the obtained generalized approximating equation of sorption isotherms and knowing the relationship between the moisture content of the material under study and the known values of the numerical values of the water activity index, you can determine the numerical values of the free energy, the associated energy and the internal energy (thermal effect) of the sorption process. In the process of removing moisture, the heat of evaporation associated with the material can be represented as the sum of: the heat of vaporization of free moisture, heat of wetting and heat, taking into account the entropy component in the Gibbs-Helmholtz equation.

The article also graphically presents the dependence of the specific heat energy of evaporation on the equilibrium moisture during the sorption of water vapor with wheat gluten. The nature of the dependences of the specific heat energy of evaporation on the equilibrium moisture content for the product under investigation is typical for most protein polymers and is due to various energy forms of the association of moisture with the material. The inflection points on the curves correspond to the boundaries between the various forms of the connection of moisture with the material.

Conclusion. The Functional dependence 23 allows, knowing the numerical values of the empirical coefficients, to determine the numerical values of the specific thermal energy of evaporation for substitution in the differential heat transfer equation in the simulation of heat and mass transfer drying processes of the studied product.

Key words: Thermodynamic analysis, gluten, gluten, sorption isotherms, moisture content, adsorption, thermal effect, entropy.

Введение. Для влажных термолabileльных материалов, к которым относится пшеничная клейковина, статическое равновесие между продуктом и окружающей средой, наступает при условии, когда состояние системы «влажное тело – газ» не изменяется во времени под действием различных внутренних факторов. При таком равновесии количество влаги в гигроскопичном продукте зависит от его вида, вида и энергии содержащейся в нем влаги, и ряда параметров, в частности, температуры и парциального давления паров воды над поверхностью продукта [8, 9, 10]. Изотерма сорбции (десорбции) в графическом виде показывает связь между равновесным влаго-содержанием продукта и соответствующей ей относительной влажностью воздуха при стабильной температуре [1, 2]. Данное соотношение не имеет строгого аналитического описания [1, 2, 3, 4, 5, 19], в связи с чем, его необходимо определять экспериментальным путем.

Цели и задачи. Для экспериментального определения гигроскопических свойств используются две основные группы методов получения изотермы сорбции – статические и динамические. Первый метод состоит в выдерживании образцов исследуемого материала в течение длительного времени достижения равновесия в среде с заданной температурой и влажностью. По второму методу – динамическому, проводят определение среднеобъемной влажности исследуемого материала, при равновесии окружающего влажного газа с поверхностью тела. Данный метод включает хроматографический анализ исследуемой среды, продуваемой через слой продукта или над данным слоем [18].

В рамках данного эмпирического исследования гигроскопических характеристик пшеничной клейковины определялась ее гигроскопичность, характеризующая равновесную влажность продукта, посредством тензометрического метода Ван Бамелена [1, 2, 3, 4, 5, 19]. Согласно этому статическому методу, образцы исследуемого продукта с заранее определенным содержанием влаги выдерживались в эксикаторах с раствором серной кислоты различной концентрации. При этом определенной концентрации раствора при заданной температуре соответствует определенное парциальное давление водяного пара, т.е. определенное значение относительной влажности воздуха [8, 16]. Определенное количество исследуемого материала взвешивается на аналитических весах с точностью до 0,001г после достижения постоянной массы, при которой его влажность соответствует равновесной.

Методы и модели

Равновесная влажность W_p , которая получена в ходе экспериментов, определяется по формуле:

$$W_p = \frac{G_2 - G_1(1 - W_{\text{образца}})}{G_2}, \quad (1)$$

где $W_{\text{образца}}$ – начальная влажность образца, кг/кг; G_1 – начальная масса исследуемого образца, кг; G_2 – масса образца при достижении гигротермического равновесия, кг;

При определении влажности образцов также определялась погрешность (не менее 3÷5 повторности), следующим образом:

1) была составлена таблица измерений, где было определено среднее значение измеряемой величины:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

где x_i – численное значение измеренной величины, n – число измерений в выборке, $i = 1, 2, \dots, n$;

2) были определены единичные отклонения $\Delta x_i = x_i - \bar{x}$, вычислялись квадраты отклонений $(\Delta x_i)^2$, проверялось согласие с соотношением $\sum \Delta x_i = 0$, определялись средние квадратичные отклонения:

$$S_n = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2 / (n-1)} \quad (3)$$

3) устанавливались и удалялись промахи из таблицы измерений (при $\Delta x_i > 2S_n$);

4) устанавливались средние квадратичные отклонения средней величины:

$$S_{\bar{x}} = \frac{S_n}{\sqrt{n}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2 / [n(n-1)]} \quad (4)$$

5) устанавливался критерий Стьюдента $t_{st} = 2,77$ при доверительной вероятности 0,95; вычислялись погрешности результатов измерений:

$$\Delta x = \varepsilon_a = t_{st} S_{\bar{x}} \quad (5)$$

6) устанавливались относительные погрешности по формуле:

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100\% \quad (6)$$

Анализ погрешностей на основании статистического анализа выявил, что интервал ΔW_p (погрешность результатов, вычисленная по формуле (5)), имеет тенденцию к росту при разных температурах при росте относительной влажности воздуха. В ходе исследования определена относительная ошибка среднего результата измерений ε_{W_p} , которая равна примерно 2,8÷6%, но при $\varphi > 0,7$ она возрастает до 11%. Данный скачок можно объяснить тем, что происходит активное поглощение влаги, сопровождаемое некоторым растворением исследуемого материала, т.е. незначительные изменения φ приводят к значительным изменениям равновесного влагосодержания.

Экспериментальное изучение гигроскопических свойств имеет целью дать характеристику изучаемому сухому продукту и рекомендации по выбору конечной влажности материала, являющейся наиболее целесообразной для осуществления процесса хранения.

При построении кривых сорбции принято [1, 2, 8, 16], что численные значения показателя активность воды A_w и относительной влажности воздуха φ совпадают, вследствие равенства давления пара над поверхностью исследуемого материала и его давлению в среде эксикатора.

После реализации серии экспериментов на эксикаторной опытной установке получены изотермы сорбции влаги клейковиной пшеничной, при температурах воздуха 298 К и 313 К, которые представлены ниже (рис. 1).

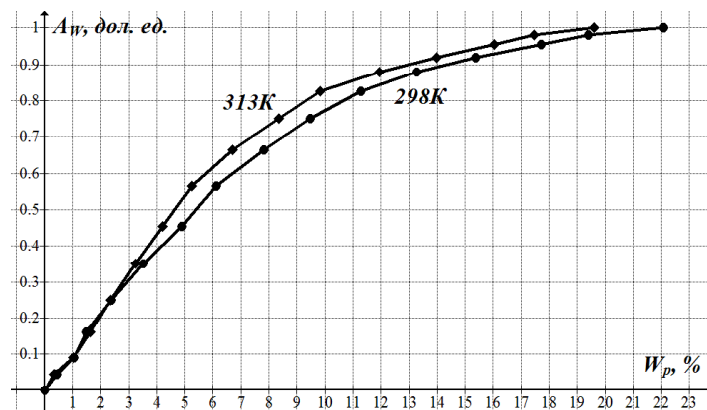


Рис. 1. Кривые равновесия при сорбции влаги глютенном при различных температурах

Полученную изотерму сорбции можно условно разбить на три участка, что особенно наглядно видно при построении изотерм в полулогарифмической модификации (рис. 2).

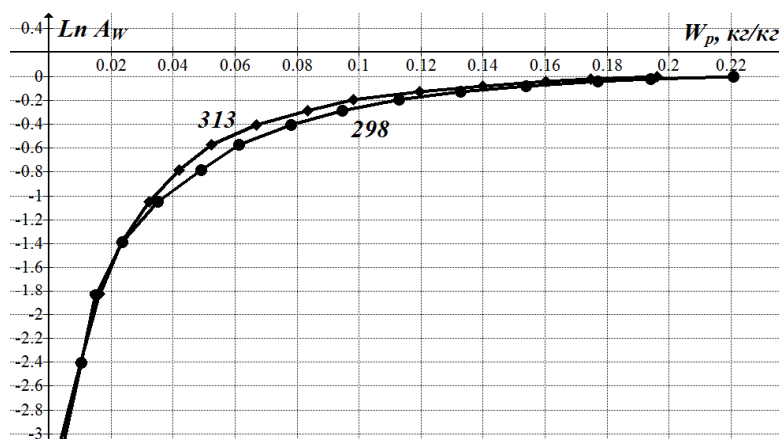


Рис. 2. Изотермы сорбции влаги глютенном в полулогарифмических координатах при различных температурах

На изотермах можно выделить сингулярные точки, которые соответствуют критическим значениям влагосодержания и информируют о видоизменении механизма сорбции.

По классификации А. В. Лыкова [12, 13, 14, 15], все влажные материалы делят на несколько основных групп в зависимости от их коллоидно-физических свойств: капиллярно-пористые, коллоидные и капиллярно-пористые коллоидные, занимающие промежуточное положение между первыми и вторыми. Данная классификация широко применяется при обобщении полученных результатов. Клейковина пшеницы представляет собой по природе типичное коллоидное, а по структуре – капиллярно-пористое тело с большим количеством микропор капилляров и пустот, через которые пары воды легко могут проникать или удаляться [21].

Характеристика состояния влаги в материале и соответствующих параметров переноса влаги дается на основе анализа явлений адсорбции, развивающихся на поверхности раздела фаз (влажный воздух - твердое тело). Обобщением знаний в этой области в настоящее время является теория полимолекулярной адсорбции, разработанная С. Брунауэром, Л. Демингом, В. Демингом, Р. Эмметом и Б. Теллером [2, 6, 16], которыми была предложена классификация, основанная на выделении пяти типов изотерм.

Полученные изотермы можно отнести к II-му типу, которые характерны для всех пищевых гидрофильных продуктов [6]. Это объясняется тем, что при проведении сорбции в условиях постепенного повышения φ происходит накопление влаги вокруг активных центров, вследствие чего формируются молекулярные грозди. Их появление вызывает перестройку структуры макромолекул белков, разворачивание глобул или перемещение боковых цепей. В результате становятся доступными новые активные центры, которые связывают дополнительные порции молекул воды.

Вода в этом случае играет промежуточную роль, образуя водородные связи с гидроксильными группами, позволяющая исследуемому продукту, в том числе и за счет прочных ковалентных поперечных связей на участке $0,050 \leq A_w \leq 0,150$, (рис. 1) не зависеть от температуры до первой точки перегиба сорбционных кривых.

Конформационные преобразования макромолекул характеризуются высокой степенью необратимости, что и определяет повышенную влажность клейковины (и других гидрофильных материалов) при сорбции на участке $0,150 \leq A_w \leq 0,650$. Здесь происходит рост количества адсорбированной влаги и наблюдаются тепловые колебания молекул воды, которые разрывают молекулярные белковые цепи, позволяя им принимать энергетически выгодные конформации, но молекулы воды здесь все еще находятся в ориентированном состоянии, из чего следует, что на этом отрезке реализуется полимолекулярная адсорбция. Пройдя этот участок, молекулы воды продолжают проникать в межмолекулярное пространство клейковины, что на фоне теплового движения молекул приводит к их частичному набуханию.

На участке $0,650 \leq A_w$ происходит свободное перемещение мономерных белковых остатков, соединенных в цепочки и окруженные гидратными слоями, в результате чего ослабляются связи в самой структуре клейковины.

Таким образом, из эмпирически полученных изотерм сорбции (рис. 1-2) выделяются три основных участка, причина появления которых аналитически обоснована. Следует отметить, что одному из них соответствует образование «монослоя», а именно здесь влага достаточно сильно связана с продуктом и микробиологическая активность незначительна. Поэтому для высушенного клейковинного материала наиболее целесообразной конечной влажностью является та, которая соответствует диапазону активности воды в интервале: $0,050 \leq A_w \leq 0,150$.

На рисунке 2 наблюдаются достаточно четкие переходы от одного условного участка к другому, которые соответствуют преобладанию одной из форм связи влаги с сухим остатком материала (осмотическая, иммобилизационная и структурная) над другой.

Проведение логарифмирования облегчает математическую обработку и интерпретацию полученных изотерм (рис. 2), которые для удобства разбиты на 2 участка и аппроксимированы логарифмическими функциями, которые графически представлены на рис. 3. Рассчитанная погрешность между аппроксимированными и эмпирически полученными значениями составляет не более 1,5 %.

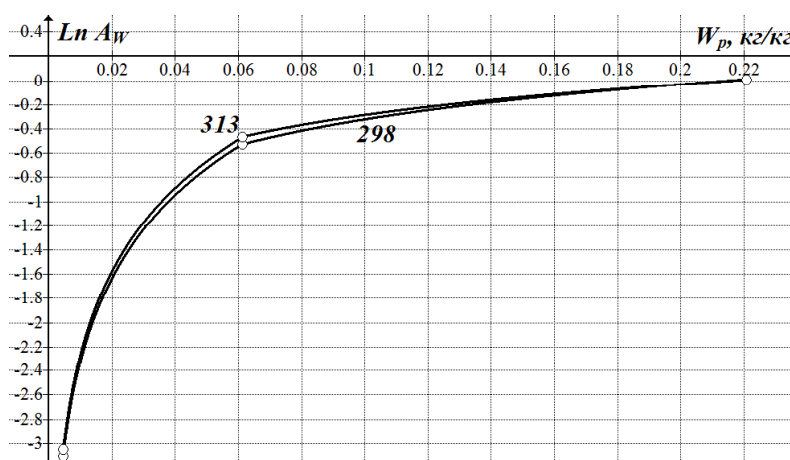


Рис. 3. Логарифмическая аппроксимация полученных изотерм сорбции, представленных на рис. 2

Математическая обработка экспериментальных данных представлена в виде обобщенной логарифмической зависимости логарифма активности воды от температуры и влагосодержания:

$$\ln A_w = (a_i T + b_i) \ln(W_p) + (j_i T + d_i) \quad (7)$$

где a_i, b_i, c_i, d_i – эмпирические коэффициенты; i – порядковый номер участка изотермы. Значения коэффициентов a_i, b_i, c_i, d_i для каждого участка сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Значения коэффициентов a_i, b_i, c_i, d_i для каждого участка W_p , подставляемые в уравнение 7

Эмпирические коэффициенты	$0,0045 \leq W_p \leq 0,0612$	$0,0612 \leq W_p \leq 0,2208$
	$i = 1$	$i = 2$
a_i	0	-0,0035
b_i	0,987	1,454
c_i	0,0039	-0,0055
d_i	1,078	2,297

Вследствие того, что исследуемые процессы, в частности сушка пшеничной клейковины протекают, в том числе и в области гигроскопического состояния, необходим термодинамический анализ статических закономерностей тепло и массообмена для выявления влияния характера связывания влаги с сухим остатком на качество получаемого сухого глютена, при снижении его влажности [20]. Полученный результат необходимо учитывать при принятии конструкторских решений для рационального осуществления исследуемых процессов.

Результаты и обсуждения. Анализ статических закономерностей процесса сушки базируется на изучении механизма взаимодействия между влажным газом и материалом, в результате которого они стремятся к гигротермическому равновесию [6, 11, 13, 14, 17]. Изучение равновесных соотношений позволяет определить движущую силу влагообмена, потенциальные перспективы и возможности сушильного агента, а так же аргументировать выбор параметров хранения готового продукта после сушки, условия транспортирования, использования конечного материала при использовании его в качестве премикса.

В работах Лыкова А. В., Гинзбурга А. С., являющихся авторами классических работ по теории сушки [9, 10, 15], отмечается, что статика процесса сушки является первым этапом при изучении и создании тех или иных способов обезвоживания, базой для научно обоснованного анализа кинетики этих процессов.

Известно, что сушка связана с переносом влаги в материале, из чего следует, что необходимо обратиться к понятию массопереноса Θ (влагопереноса), которое используется в термодинамике для описания переноса энергии вещества при обезвоживании материала. Указанная методика сформирована на классических законах термодинамики и с ее помощью можно энергию, которая была затрачена на изменение анализируемой системы, математически описать, и при этом, отпадает необходимость в изучении молекулярной структуры исследуемого полимера.

Потенциалом переноса парообразной влаги в среде влажного воздуха является химический потенциал. В гигроскопическом состоянии потенциал влагопереноса для влажных материалов считается приблизительно равным по абсолютной величине химическому потенциалу [1]:

$$|\Theta| = |\mu| = RT \ln A_w \quad (8)$$

где R – константа, равная работе расширения одного моля идеального газа в изобарном процессе при увеличении температуры на 1К, $R = 8,314$ Дж/(моль·К); T – температура среды, К; A_w – активность воды, кг/кг.

Таким образом, можно утверждать, что для переноса влаги в виде жидкости в области гигроскопического состояния химический потенциал представляется как функция температуры тела и влагосодержания.

Значение потенциала переноса для заданной точки μ при его расчете связано с выбором начала отсчета, т.е. точки его нулевого значения. В качестве исходного (нулевого) значения в области гигроскопического состояния при изотермических условиях химический потенциал влагопереноса считают при $\varphi = 1$, т.е. химический потенциал свободной влаги μ_0 . Исходя из этого, в любой точке влажного тела при любом значении φ разность химических потенциалов или движущая сила сорбции есть: $\Delta\mu = \mu - \mu_0$.

Известно [1], что в гигроскопической области химический потенциал по абсолютной величине составляет такое же значение, что и энергия связи влаги E или изменение свободной энергии Гельмгольца:

$$\Delta\mu = E = - \left(\frac{\partial \Delta F}{\partial W_p} \right) = -RT \ln A_w \quad (9)$$

в связи с чем, потенциалом влагопереноса можно принять величину E .

На основе полученного обобщенного аппроксимирующего уравнения изотерм сорбции и зная соотношение между влагосодержанием исследуемого материала W_p и известным значением A_w можно изменение свободной энергии Гельмгольца записать следующим образом:

$$E = - \left(\frac{\partial \Delta F}{\partial W_p} \right) = -RT \ln A_w = -RT \cdot ((a_i T + b_i) \ln W_p + (j_i T + d_i)) \quad (10)$$

Продифференцировав уравнение Гиббса-Гельмгольца по W_p , при постоянстве давления и температуры, можно определить изменение свободной энергии:

$$\Delta F = \Delta E - T \Delta S \quad (11)$$

где ΔS – изменение энтропии системы, Дж/К; ΔE – изменение внутренней энергии, Дж.

Таким образом, получаем:

$$\left(\frac{\partial \Delta F}{\partial W_p} \right)_{T,P} = \left(\frac{\partial \Delta E}{\partial W_p} \right)_{T,P} - T \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial W_p} \right)_{T,P} \quad (12)$$

Продифференцировав выражение 2.4.5 по T , получим:

$$\frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{\partial \Delta F}{\partial W_p} \right)_{T,P} = - \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial W_p} \right)_{T,P} \quad (13)$$

Учитывая 9, выражение для дифференциального изменения энтропии связанной воды будет иметь вид:

$$\left(\frac{\partial \Delta S}{\partial W_p} \right)_{T,P} = - \frac{\partial (RT \ln A_w)}{\partial T} \quad (14)$$

или

$$\left(\frac{\partial \Delta S}{\partial W_p} \right)_{T,P} = -R \left[(2a_i T + b_i) \ln W_p + (2j_i T + d_i) \right] \quad (15)$$

Таким образом, зная зависимость $\ln A_w = f(W_p; T)$ для клейковины, можно определить численные значения свободной энергии, связанной энергии и внутренней энергии (теплого эффекта) процесса сорбции.

Зависимость дифференциального изменения свободной энергии:

$$\left(\frac{\partial \Delta F}{\partial W_p} \right)_{T,P} = RT \left[(a_i T + b_i) \ln W_p + (j_i T + d_i) \right] \quad (16)$$

Зависимость дифференциального изменения связанной энергии:

$$T \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial W_p} \right)_{T,P} = -RT \left[(2a_i T + b_i) \ln W_p + (2j_i T + d_i) \right] \quad (17)$$

Зависимость дифференциального изменения теплового эффекта сорбции имеет вид:

$$\left(\frac{\partial \Delta E}{\partial W_p} \right)_{T,P} = \left(\frac{\partial \Delta F}{\partial W_p} \right)_{T,P} + T \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial W_p} \right)_{T,P} \quad (18)$$

На рис. 4 и 5 для исследуемого объекта сушки представлены графические зависимости дифференциального изменения свободной энергии $\left(\frac{\partial \Delta F}{\partial W_p} \right)_{T,P}$, связанной энергии $T \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial W_p} \right)_{T,P}$ и внутренней энергии (тепловой эффект) от равновесной влажности в процессе сорбции паров воды клейковиной пшеничной для температур 298 К и 313 К.

Дифференциальное изменение внутренней энергии в гигроскопической области отрицательно, т.е. присутствуют тепловые эффекты при сорбции паров глютенном (рис. 4-5). В целом характер зависимостей дифференциальных изменений свободной энергии, связанной энергии и теплового эффекта сорбции типичен для большинства аналогичных систем.

Расчет дифференциальных изменений свободной, связанной и внутренней энергий сорбции необходим для выявления величины удельной теплоты образования пара r , (кДж/кг) для различных технологических условий процесса сушки, т.к. при моделировании теплопереноса в объекте исследования зависимость $r = f(W, T)$ входит в уравнение переноса тепла [2].

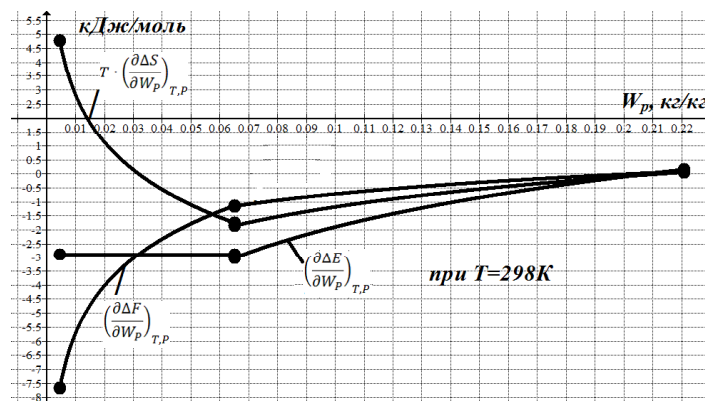


Рис. 4. Графические зависимости дифференциального изменения свободной, связанной и теплового эффекта от равновесной влажности при температуре 298 К в процессе сорбции паров влаги клейковинной пшеничной

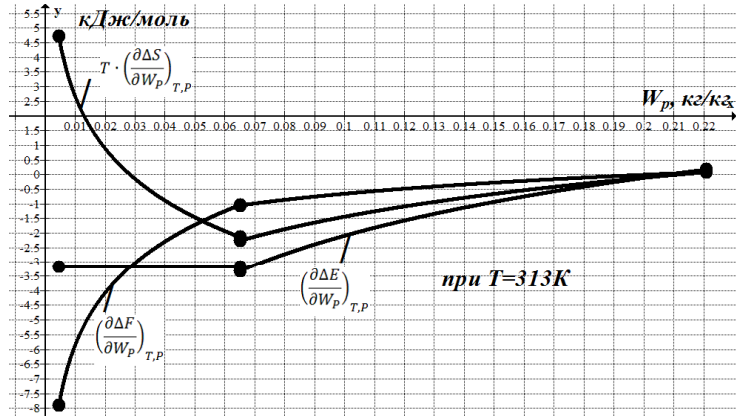


Рис. 5. Графические зависимости дифференциального изменения свободной, связанной и теплового эффекта от равновесной влажности при температуре 313K в процессе сорбции паров влаги клейковинной пшеничной

В процессе удаления влаги, теплоту испарения r [2] связанной с материалом, можно представить как сумму: теплоты парообразования свободной влаги r' , теплоты смачивания $r_{см}$ и теплоты $r_{энт}$, учитывающей энтропийную составляющую в уравнении Гиббса-Гельмгольца.

$$r = r' + r_{см} + r_{энт} \tag{19}$$

Теплота парообразования свободной влаги r' , определяется из линейной зависимости от температуры насыщенного пара (20) в диапазоне $T = 293 \div 313K$, полученной из анализа данных о термодинамических свойствах и коэффициентах переноса воды и водяного пара [2, 7]:

$$r' = 3118,458 \cdot 10^3 - 2286T \tag{20}$$

Теплота смачивания $r_{см}$ определяется дифференциальным изменением свободной энергии изотермического обезвоживания [2]:

$$r_{см} = |55,556 \cdot RT \ln A_w| \tag{21}$$

Теплота $r_{энт}$, учитывающая энтропийную составляющую в уравнении Гиббса-Гельмгольца [2], описывается зависимостью:

$$r_{энт} = \left| -55,556 \cdot T \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial W_p} \right)_{T,P} \right| \tag{22}$$

Таким образом, для температур $T = 298, 313K$ для определения количества энергии необходимой на испарение одного килограмма влаги из раствора биополимерного геля, с учетом (20-22) получаем необходимые зависимости $r = f(W_p)$, представленные в таблице 2.

Таблица 2

Зависимости $r = f(W_p)$ для двух диапазонов влажности и температур

Температура, К	$0,0045 \leq W_p \leq 0,0612$	$0,0612 \leq W_p \leq 0,2208$
	$i = 1$	$i = 2$
298	$r = 3213,9 - 271,71 \ln W_p$	$r = 3882,77 - 30,42 \ln W_p$
313	$r = 3244,16 - 285,39 \ln W_p$	$r = 3890,4 - 54,65 \ln W_p$

На рисунке 6 графически представлена зависимость удельной тепловой энергии испарения от равновесной влажности в процессе сорбции паров воды клейковиной пшеничной. Характер зависимостей удельной тепловой энергии испарения от равновесной влажности для исследуемого продукта типичен для большинства белковых полимеров [2] и обусловлен различными энергетическими формами связи влаги с материалом. Точки перегиба на кривых соответствуют границам между различными формами связи влаги с материалом.

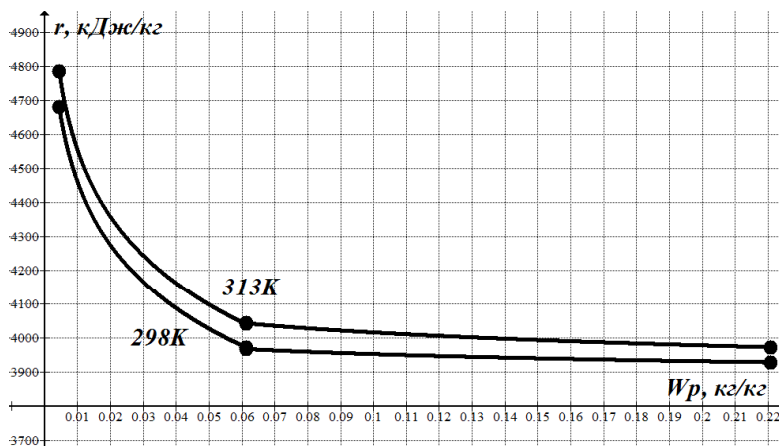


Рис. 6. Графическая зависимость удельной тепловой энергии испарения от равновесной влажности в процессе сорбции паров воды клейковиной пшеничной при температурах 298К и 313К

Для удобства пользования уравнений, представленных в таблице 2 целесообразно их представить для трёх очевидных диапазонов влажности в следующем виде:

$$r(T, W) = (a + bT)W + c + dT \quad (23)$$

где a, b, c, d – расчетные коэффициенты, представленные для каждой из зон диапазона изменения влажности в процессе сушки в таблице 3.

Таблица 3

Значения коэффициентов a, b, c, d для уравнения 23

a	b	c	d
$0,005 \leq W \leq 0,025$			
27166,67	-166,67	2160,17	8,83
$0,025 \leq W \leq 0,06$			
-13109,87	19,07	3163,4	4,2
$0,06 \leq W \leq 0,22$			
4716,67	-16,67	2097,67	6,33

На рис. 7 графически представлены результаты применения уравнения 23 для температур 298 К и 313 К и трех зон на участке ограниченном гигроскопической влажностью.

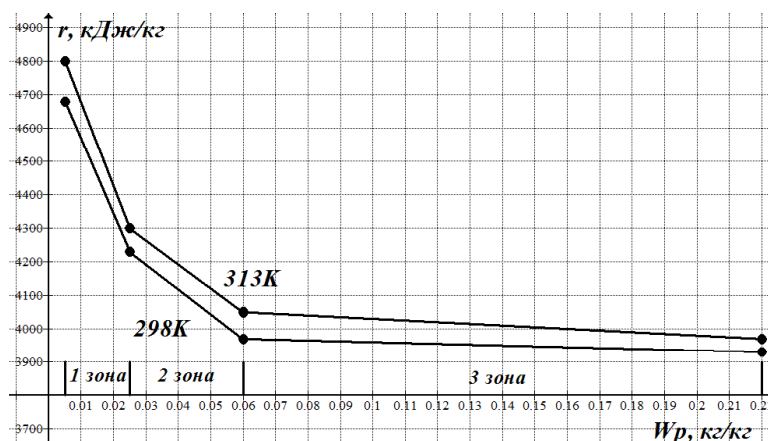


Рис. 7. Линейная аппроксимация зависимости $r = f(W_p, T)$ в процессе сорбции паров воды клейковиной пшеничной для температур 298 К и 313 К для 3-х участков

Заключение. Функциональная зависимость (23) позволяет, зная численные значения эмпирических коэффициентов, определить численные значения удельной тепловой энергии испарения для подстановки в дифференциальное уравнение теплопереноса при моделировании теплообменных процессов сушки исследуемого продукта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексанян И. Ю. Развитие научных основ процессов высокоинтенсивной сушки продуктов животного и растительного происхождения: автореф. дис. ... доктора техн. наук. М., 2001. 52 с.
2. Алексанян И. Ю., Буйнов А. А. Высокоинтенсивная сушка пищевых продуктов. Пеносушка. Теория. Практика. Моделирование: монография. Астрахань: АГТУ, 2004. 380 с.
3. Алексанян И. Ю., Максименко Ю. А., Титова Л. М. Инновационные технологии переработки сырья растительного происхождения. Материалы II конференции в рамках Международного научно-технологического форума «Биоиндустрия – основа зеленой экономики, качества жизни и активного долголетия». М., 2014. С. 12–18.
4. Алексанян И. Ю., Максименко Ю. А. Интенсификация процессов сушки продуктов микробиологического синтеза. Теория и практика сушки в диспергированном состоянии: монография. Germany, Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2011. 273 с.
5. Алексанян И. Ю., Нугманов А. Х.-Х. Общественное питание. Научно-практические основы выбора оптимальных рациона и технологии: монография. Germany, Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2011. 122 с.
6. Брунауэр Адсорбция газов и паров Текст. В 2-х т. Т. 1. Физическая адсорбция; пер. с англ. под ред. М.Н. Дубинина. М.: Госиздат иностр. лит., 1948. 784 с.
7. Вукалович М. П. Таблицы термодинамических свойств воды и водяного пара. М.: Энергия, 1965. 400 с.
8. Гинзбург А. С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. – М.: Пищевая промышленность, 1975. 527 с.
9. Гинзбург А. С., Громов М. А. Теплофизические характеристики картофеля, овощей и плоды. М.: Агропромиздат, 1987. 272 с.
10. Гинзбург А. С., Савина И. М. Массовлагообменные характеристики пищевых продуктов. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. 280 с.
11. Дакуорт Р. Б. Вода в пищевых продуктах. М: Пищевая промышленность, 1980. 376 с.
12. Лыков А. В. Сушка в химической промышленности. М.: Химия. 1970. 499 с.
13. Лыков А. В. Тепло- и массообмен в процессах сушки. М.: Гостоптехиздат, 1956. 464 с.
14. Лыков А. В. Тепломассобмен. М.: Энергия, 1978. 478 с.
15. Лыков А. В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 471 с.
16. Никитина Л. М. гинаметры и коэффициенты массопереноса во влажных материалах. М.: Издательство «Энергия», 1967. 499 с.
17. Нугманов А. Х.-Х. Научно-практические подходы к конструированию многокомпонентных пищевых систем в технологии общественного питания: монография. – Астрахань: ИП Сорокин Роман Васильевич, 2016. 96 с.
18. Плановский А. Н., Муштаев В. И., Ульянов В. М. Сушка дисперсных материалов в химической промышленности. М.: Химия, 1979. 288 с.
19. Титова Л.М. Нугманов А.Х.-Х., Алексанян И. Ю. Массообменные процессы в химической и пищевой технологии: учебное пособие. СПб: Лань, 2014. 224 с.
20. Colin Wrigley. Gluten as the key to wheat quality-a brief history // Cereal Foods World. St. Paul: Jul /Aug 2002. Том 47, Iss. 7; P. 336.
21. Gianibelli M.C. New proteins for improving wheat quality // Ph.D. Thesis, University Of Western Sydney, Sydney, Australia. 1998. P. 12-16.

REFERENCES

1. Aleksanyan I. Yu. Razvitie nauchnykh osnov protsessov vysokointensivnoi sushki produktov zhitovnogo i rastitel'nogo proiskhozhdeniya: avtoref, dis. ... doktora tekhn. nauk: 05.18.12 / Aleksanyan Igor' Yur'evich. M., 2001. 52 s.
2. Aleksanyan I. Yu., Buinov A. A. Vysokointensivnaya sushka pishchevykh produktov. Penosushka. Teoriya. Praktika. Modelirovanie: monografiya. Astrakhan': AGTU, 2004. 380 s.
3. Aleksanyan I. Yu., Maksimenko Yu. A., Titova L. M. Innovatsionnye tekhnologii pererabotki syr'ya rastitel'nogo proiskhozhdeniya. Materialy II konferentsii v ramkakh Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnologicheskogo foruma «Bioindustriya – osnova zelenoi ekonomiki, kachestva zhizni i aktivnogo dolgoletiya». M., 2014. S. 12–18.
4. Aleksanyan I. Yu. Maksimenko Yu. A. Intensifikatsiya protsessov sushki produktov mikrobiologicheskogo sinteza Teoriya i praktika sushki v dispergirovannom sostoyanii: monografiya. Germany, Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2011. 273 s.

5. Aleksanyan I. Yu., Nugmanov A. Kh.-Kh. Obshchestvennoe pitanie. Nauchno-prakticheskie osnovy vybora optimal'nykh ratsiona i tekhnologii: monografiya. Germany, Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2011. 122 s.
6. Brunauer Adsorbtsiya gazov i parov Tekst. V 2-kh t. T. 1. Fizicheskaya adsorbtsiya; per. s angl. pod red. M.N. Dubinina. M.: Gosizdat inostr. lit., 1948. 784 s.
7. Vukalovich M. P. Tablitsy termodinamicheskikh svoystv vody i vodyanogo para. M.: Energiya, 1965. 400 s.
8. Ginzburg A. S. Osnovy teorii i tekhniki sushki pishchevykh produktov. M.: Pishchevaya promyshlennost', 1975. 527 s.
9. Ginzburg A. S., Gromov M. A. Teplofizicheskie kharakteristiki kartofelya, ovoshchei i plody. M.: Agropromizdat, 1987. 272 s.
10. Ginzburg A. S., Savina I. M. Massovlagoobmennye kharakteristiki pishchevykh produktov. M.: Legkaya i pishchevaya promyshlennost', 1982. 280 s.
11. Dakuort R. B. Voda v pishchevykh produktakh. M.: Pishchevaya promyshlennost', 1980. 376 s.
12. Lykov A. V. Sushka v khimicheskoi promyshlennosti. M.: Khimiya. 1970. 499 s.
13. Lykov A. V. Teplo- i massoobmen v protsessakh sushki. M.: Gostoptekhizdat, 1956. 464 s.
14. Lykov A. V. Teplomassobmen. M.: Energiya, 1978. 478 s.
15. Lykov A. V. Teoriya sushki. M.: Energiya, 1968. 471 s.
16. Nikitina L.M. ginarametry i koeffitsienty massoperenosa vo vlazhnykh materialakh. M.: Izdatel'stvo «Energiya», 1967. 499 s.
17. Nugmanov A. Kh.-Kh. Nauchno-prakticheskie podkhody k konstruirovaniyu mnogokomponentnykh pishchevykh sistem v tekhnologii obshchestvennogo pitaniya: monografiya. Astrakhan': IP Sorokin Roman Vasil'evich, 2016. 96 s.
18. Planovskii A. N., Mushtaev V. I., Ul'yanov V. M. Sushka dispersnykh materialov v khimicheskoi promyshlennosti. M.: Khimiya, 1979. 288 s.
19. Titova L.M. Nugmanov A.Kh.-Kh., Aleksanyan I. Yu.. Massoobmennye protsessy v khimicheskoi i pishchevoi tekhnologii: uchebnoe posobie. SPb: Lan', 2014. 224 s.
20. Colin Wrigley. Gluten as the key to wheat quality-a brief history // Cereal Foods World. St. Paul: Jul /Aug 2002. Tom 47, Iss. 7; P. 336.
21. Gianibelli M. C. New proteins for improving wheat quality. // Ph.D. Thesis, University Of Western Sydney, Sydney, Australia. 1998. P. 12-16.

ОБ АВТОРАХ

Фоменко Екатерина Валерьевна, аспирант ФГБОУ ВО «АГТУ», кафедра «Технологические машины и оборудование» tetatet.78@mail.ru, 8-960-863-41-61

Fomenko Ekaterina Valer'evna, Graduate student, FSBEI HE Astrakhan State Technical University, Department of Technological Machines and Machinery tetatet.78@mail.ru, 8-960-863-41-61

Нугманов Альберт Хамед-Харисович, д.т.н., доцент, профессор ФГБОУ ВО «АГТУ», кафедра «Технологические машины и оборудование» albert909@yandex.ru, 8-927-282-43-07

Nugmanov Albert Hamed-Harisovich, Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor, Professor, Department of Technological Machines and Machinery, FSBEI HE Astrakhan State Technical University, albert909@yandex.ru, 8-927-282-43-07

Алексанян Оксана Александровна, аспирант, ФГБОУ ВО «АГТУ», кафедра «Технологические машины и оборудование» albert909@yandex.ru, 8-927-282-43-07

Aleksanyan Oksana Aleksandrovna, Graduate student, FSBEI HE Astrakhan State Technical University, Department of Technological Machines and Machinery albert909@yandex.ru, 8-927-282-43-07

Нгуен Тхи Сен, Аспирант ФГБОУ ВО «АГТУ», кафедра «Технологические машины и оборудование»
Nguyen Tkhi Senh, Graduate student, FSBEI HE Astrakhan State Technical University, Department of Technological Machines and Machinery

Дата поступления 24.01.2019