

Научная статья

УДК [635.615.002.62:664.292]:[536.543.81:678.026

DOI 10.46845/1997-3071-2022-65-52-65

Термодинамический анализ статических закономерностей влагопоглощения биополимером на базе его гигроскопических характеристик

**Альберт Хамед-Харисович Нугманов¹, Галина Сергеевна Мещерякова²,
Виктор Александрович Лебедев³, Игорь Юрьевич Алексанян⁴,
Доркас Йиваа Аджей⁵**

^{1,2,4,5} Астраханский государственный технический университет, Астрахань, Россия

³ Газпром переработка, Астрахань, Россия

¹ albert909@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4093-9982>

² albert909@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2720-3863>

³ lebedev_91v@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6044-8315>

⁴ 16081960igor@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5494-1226>

⁵ albert909@yandex.ru

Аннотация. В настоящее время мировое сообщество серьезно обеспокоено быстрым и непредсказуемым ростом применения синтетической пищевой упаковки, что приводит к постоянному накоплению биологически не разлагаемых отходов, технология утилизации которых сложна и дорогостояща. Это обуславливает рациональность замены таких упаковочных материалов биоразлагаемыми съедобными пленками, в частности, на базе пектиновых веществ природного происхождения, которые являются природными структурообразователями, полученными из не утилизируемых отходов при переработке растительного сырья. В этом аспекте интересно использование корки арбузов, существенная часть урожая которых не доходит до потребителя по причине ее недостаточной кондиции или просто (около 150 тыс. т) остается на полях неубранной. Причем в арбузной корке содержится до 13,4 % пектиновых веществ, 8,1 % которых являются протопектином, обуславливающим прочностные параметры ягодной ткани. Для решения поставленных в работе задач, в частности, выбора рациональных режимных параметров и моделирования сушки, проведено исследование ее статистики путем определения гигроскопических характеристик и термодинамических закономерностей влагосорбции пектиновым гелем из корки арбуза, что позволило определить энергию связи влаги с сухим остатком и, как следствие, в полной мере оценить энергозатраты при процедуре его обезвоживания, а также рекомендовать конечную рациональную влажность готовой продукции в итоге процесса сушки для ее долговременной сохранности при использовании и хранении и, кроме того, определить целесообразные параметры окружающей среды, которые необходимо поддерживать в торговых, производственных и складских помещениях.

© Нугманов А. Х.-Х., Мещерякова Г. С., Лебедев В. А., Алексанян И. Ю., Аджей Д. Й., 2022

Ключевые слова: арбузное сырье, корка, пектиновые экстракты, защитная пленка, гигроскопические параметры, статические закономерности, термодинамический анализ, сушка

Для цитирования: Нугманов А. Х.-Х., Мещерякова Г. С., Лебедев В. А., Алексанян И. Ю., Аджей Д. Й. Термодинамический анализ статических закономерностей влагопоглощения биополимером на базе его гигроскопических характеристик // Известия КГТУ. 2022. № 65. С. 52–65.

Original article

Thermodynamic analysis of the static patterns of moisture absorption by a biopolymer based on its hygroscopic characteristics

Al'bert Kh.-Kh. Nugmanov¹, Galina S. Meshcheryakova², Viktor A. Lebedev³, Igor' Yu. Aleksanyan⁴, Dorkas Y. Adzhey⁵

^{1,2,4,5} Astrakhan' State Technical University, Astrakhan', Russia

³ Gazprom Pererabotka, Astrakhan', Russia

¹ albert909@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4093-9982>

² albert909@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2720-3863>

³ lebedev_91v@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6044-8315>

⁴ 16081960igor@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5494-1226>

⁵ albert909@yandex.ru

Abstract. Currently, the world community is seriously concerned about the rapid and unpredictable growth in the use of synthetic food packaging, which leads to a constant accumulation of non-biodegradable waste, the disposal of which is difficult and expensive. This determines the rationality of replacing such packaging materials with biodegradable edible films, in particular, based on pectin substances of natural origin, which are natural structure-forming agents obtained from non-recyclable waste during the processing of plant materials. In this aspect, it is interesting to use watermelon peels, a significant part of the harvest of which does not reach the consumer due to its insufficient condition or simply remains in the fields unharvested. Moreover, the watermelon rind contains up to 13,4 % of pectin substances, 8,1 % of which are protopectin, which determines the strength parameters of berry tissue. To solve the problems posed in the work, in particular, the choice of rational operating parameters and modeling of drying, a study of its statics has been carried out by determining the hygroscopic characteristics and thermodynamic regularities of moisture absorption by pectin gel from a watermelon rind, which made it possible to determine the binding energy of moisture with a dry residue and, as a consequence, in fully assess the energy consumption during the procedure of its dehydration, as well as recommend the final rational moisture content of the finished product as a result of the drying process for its long-term preservation during its use and storage and, in addition, determine the appropriate environmental parameters that need to be maintained in commercial, industrial and warehouse premises.

Keywords: watermelon raw materials, rind, pectin extracts, protective film, hygroscopic parameters, static laws, thermodynamic analysis, drying

For citation: Nugmanov A. Kh.-Kh., Meshcheryakova G. S., Lebedev V. A., Aleksanyan I. Yu., Adzhey D. Y. Thermodynamic analysis of the static patterns of

moisture absorption by a biopolymer based on its hygroscopic characteristics. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2022;(65):52–65. (In Russ.).

ВВЕДЕНИЕ

Пристальное внимание в мире стали обращать на интенсивное и спонтанное увеличение использования синтетических полимерных упаковочных материалов для пищевых продуктов, что обуславливает перманентный рост отходов, которые не подвержены биоразложению. Это предопределяет актуальность решения задач по разработке и производству пищевой современной упаковки в различных секторах пищевой индустрии, которая позволит уменьшить отрицательное воздействие на внешнюю среду обитания населения, в частности, посредством заметного понижения времени биодegradации упаковки после ее применения. Одним из максимально пригодных методов решения данных задач служит широкое использование в инженерной практике съедобных защитных пленок на основе пектина из возобновляемых пищевых сырьевых источников.

Разработка защитных покрытий на базе пектиновых субстанций, служащих натуральными структурообразователями, выработанными из вторичной ресурсной базы, ориентирована на снятие комплексной проблемы при производстве готовых изделий путем глубокой обработки основных сырьевых материалов и разработки оригинального пленочного материала [1]. При этом техническим результатом получения пектиносодержащих пленочных структур является их способность обеспечить защиту пищевым продуктам от микробиологической порчи, естественных потерь при хранении и сохранности показателей качества и безопасности. Следует отметить, что в условиях нарастания рыночной потребности в пленочных покрытиях определяющей становится задача выявления новых источников для их производства.

Эмпирическое исследование гигроскопических параметров (ГП) направлено на определение итоговой, наиболее приемлемой для длительного хранения, влажности (W) продукта и выявление математического описания показателей, обуславливающих энергию связи влаги с материалом, определяющую энергоемкость процесса влагоудаления, опираясь на классические термодинамические закономерности без детального исследования молекулярной структуры объекта изучения.

По причине того, что операция обезвоживания арбузного полуфабриката (АП) осуществляется с повышенными энергозатратами, в гигроскопическом ареале W целесообразно посредством статических закономерностей оценить трансфер массы и энергии с целью выявления влияния вида и механизма связывания воды с сухим остатком на качественные параметры итогового высушенного материала, что целесообразно принимать во внимание при проектировании проводимых операций и технологического оборудования.

Целью исследования является осуществление анализа статических и термодинамических закономерностей процедуры сорбции влаги пектиновым гелем из арбузной корки на основе изучения его гигроскопических параметров для оптимизации и моделирования операции обезвоживания.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве перспективного вторичного ресурса для производства пектино-содержащей пленки вполне может подойти арбузное сырье, так как, во-первых, в нем присутствует 13,4 % пектиновых компонентов, из которых 8,1 % приходится на протопектин, определяющий прочность плодовой ткани [2], а во-вторых, согласно данным волгоградских ученых [3], невостребованной арбузной продукции на полях остается около 150 тыс. т, а это выброшенные ресурсы, используя которые, можно получить различные и при этом нужные на рынке пищевые продукты, в том числе и глубокой переработки, те же пленочные пектиносодержащие структуры.

Конкретным объектом данного исследования послужил арбузный полуфабрикат (АП), состоящий из пектинового экстракта из не утилизируемой корки арбуза и необходимых для получения пленочной структуры дополнительных премиксов (микрористаллическая целлюлоза, глицерин).

При изучении ГП АП определялась его гигроскопическая способность, определяющая равновесную влажность (W_p) материала статическим тензометрическим способом [4, 5], по которому пробы АП с известной влажностью W выставлялись в эксикаторной емкости с раствором различно концентрированной серной кислоты, причем заданная кислотная концентрация при определенной температуре (T) обуславливает определенную величину относительной влажности воздушной среды (φ) в эксикаторе [6, 7]. Взвешенная проба АП с точностью до 0,001 г после прекращения изменения ее массы имеет W_p .

W_p рассчитывалась по соотношению:

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

где $W_{обр}$ – исходная влажность навески, кг/кг; G_1 – ее исходная масса, кг; G_2 – ее масса после достижения равновесного состояния, кг.

В процессе построения сорбционных изотерм (ИС) считаем [4, 6, 8], что величины параметров активности воды (A_w) и φ идентичны по причине идентичности парциального парового давления над поверхностью навески и в ядре эксикаторной среды.

В качестве потенциала переноса водяного пара в воздушной среде можно принять химический потенциал (μ), т. е. в гигроскопической точке потенциал паропереноса ориентировочно идентичен по модулю химическому потенциалу [4, 7]:

$$|\ominus| = |\mu| = RT \ln A_w, \quad (2)$$

где R – универсальная газовая константа, равная 8,314 Дж/(моль·К); T – температура в эксикаторе, °К.

Величина μ для определенной точки обусловлена выбором начала отсчета при его нулевой величине μ_0 , которая при постоянной температуре в гигроскопической точке соответствует φ , равной единице для влаги в свободном состоянии. В любой точке при произвольно взятом φ движущая сорбционная сила есть: $\Delta\mu = \mu - \mu_0$.

Рациональным критерием оценки вида связи влаги с сухим остатком является энергия этой связи, т. е. работа при постоянной температуре обратимого отрыва одного моля влаги для заданной влажности без варьирования состава материала [6, 7]:

$$\Delta \mu = E = \left(\frac{\partial \Delta F}{\partial W_p} \right)_T = RT \frac{p_s}{p_u} = -RT \ln A_w, \quad (3)$$

где E обуславливает свободную энергию 1-го моля адсорбированной субстанции в слое; p_s – давление насыщенного пара воды в свободном состоянии над поверхностной плоскостью, Па; p_u – давление пара в состоянии насыщения при той же T , Па.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате опытной серии, проведенной вышеописанным тензометрическим способом, построены ИС для АП при $T = 298$ °К и 323 °К, которые проиллюстрированы на рис. 1.

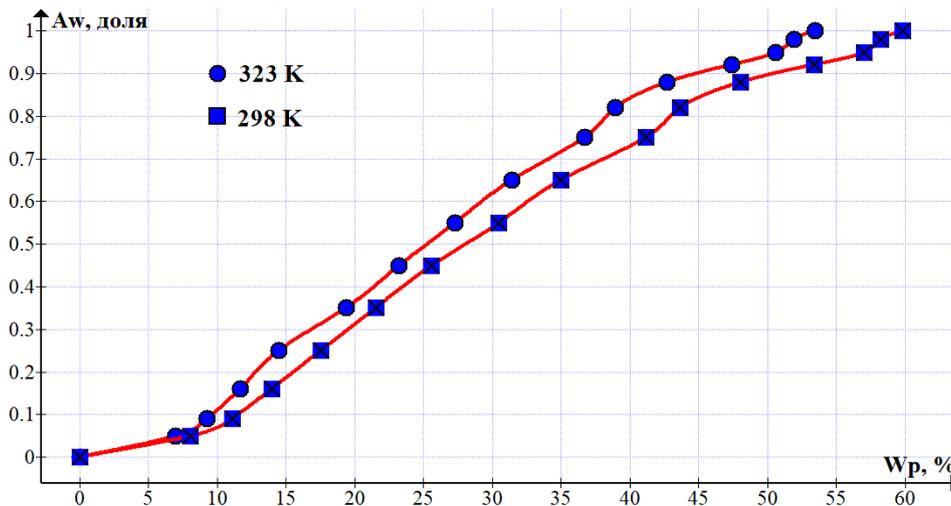


Рис. 1. Кривые равновесия при сорбции влаги сухим полуфабрикатом
Fig. 1. Equilibrium curves for moisture sorption by dry semi-finished product

Принимая во внимание основополагающую классификацию [9–13], высушенную пленочную субстанцию можно причислить к капиллярно-микропористому веществу со значительной микропористостью и наличием множества капилляров, через которые в том или ином направлении мигрирует водяной пар.

На построенных ИС можно выделить три участка, более явно видные в их полулогарифмической интерпретации (рис. 2).

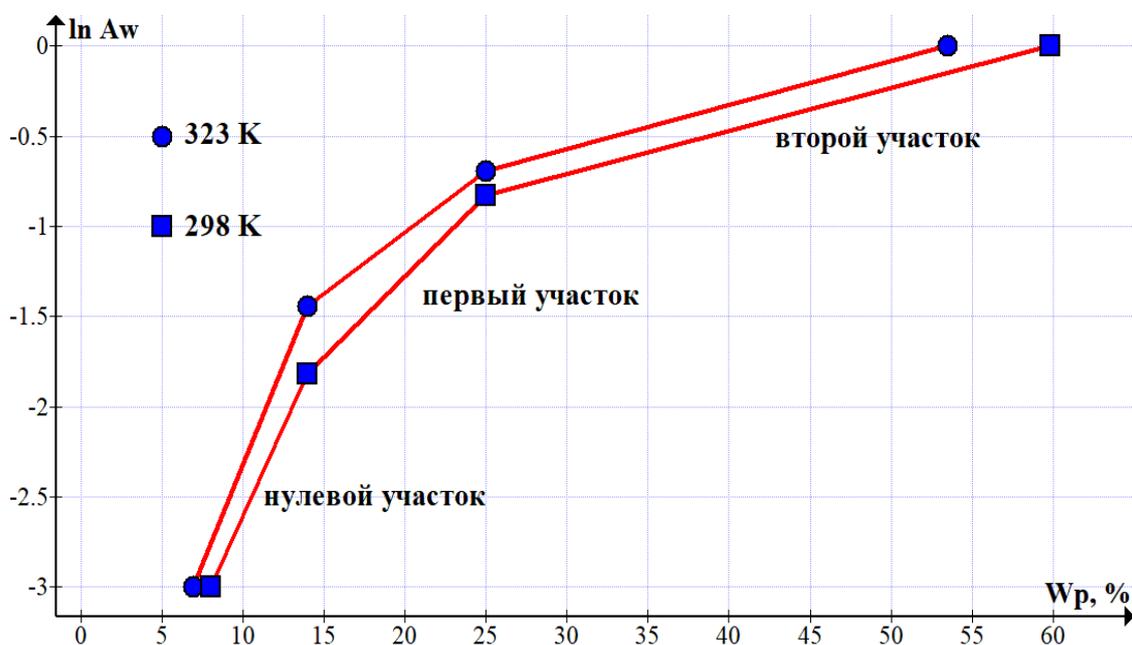


Рис. 2. Кривые равновесия, построенные в полулогарифмических координатах
Fig. 2. Equilibrium curves plotted in semi-logarithmic coordinates

Согласно известной классификации БЭТ [14, 15], опирающейся на положения теории полимолекулярной адсорбции, традиционно выделяются пять типов ИС. В нашем варианте ИС можно причислить ко II-му типу, характерному для пищевых гидрофильных субстанций [15].

В работе [16] предложена математическая аппроксимация ИС двумя соотношениями. С этой целью ИС (рис. 2) разбивают на две зоны: первая – от W_0 до W_m ; вторая – от W_m и далее. Точка W_0 на ИС обуславливает трансфер от моно- к полимолекулярной адсорбционной связи и находится на пересечении нормали из первой точки перегиба на ИС и горизонтальной координатной оси. Как правило, при реальном удалении влаги из АП ее мономолекулярно связанная часть не отводится, и по этой причине зону от 0 до W_0 можно не принимать во внимание при описании ИС. Точка W_m обуславливает трансфер полимолекулярной влаги к капиллярно- и структурно связанной влаге и находится на пересечении нормали ко второй точке перегиба на ИС с горизонтальной координатной осью (рис. 3). Таким образом, на ИС необходимо учесть зону от W_0 до W_m и зону от W_m и далее вправо.

Отметим, что равновесную влажность в конечной точке первой зоны $0,24 \leq w_p \leq 0,26$ можно принять в качестве рациональной для хранения сухого АП, т. е. для этой цели можно использовать интервал W от 25 до 27 %.

Обе зоны (рис. 3) аппроксимированы соотношениями, приведенными ниже с относительной ошибкой не более 3 %.

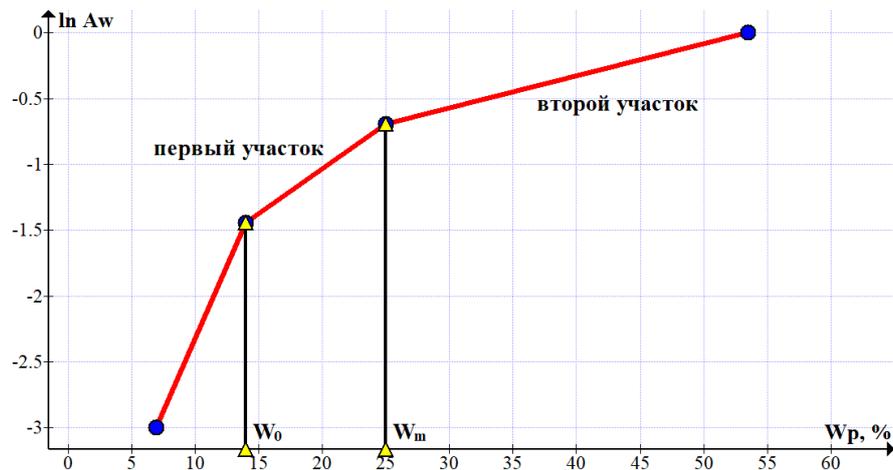


Рис. 3. Разбивка на участки с разным видом связи влаги с материалом: от 0 до w_0 – преобладает химическая связь; от w_0 до w_m – преобладает адсорбционно связанная влага; от w_m и выше – капиллярно связанная и осмотическая влага

Fig. 3 Breakdown into areas with different types of moisture-material bond: from 0 to w_0 – chemical bond prevails; from w_0 to w_m – adsorption bound moisture prevails; from w_m and above – capillary bound and osmotic moisture

Аппроксимированные уравнения (4) и (5) для изотермы сорбции, построенной при температуре 323 °К:

Участок 1: $0,14 \leq w_p \leq 0,25$:

$$\ln A_w = 6,827W_p - 2,416 . \quad (4)$$

Участок 2: $0,25 \leq w_p \leq 0,54$:

$$\ln A_w = 2,451W_p - 1,320 . \quad (5)$$

Аппроксимированные уравнения (6) и (7) для изотермы сорбции, построенной при температуре 298 °К:

Участок 1: $0,14 \leq w_p \leq 0,25$:

$$\ln A_w = 9,024W_p - 3,092 . \quad (6)$$

Участок 2: $0,25 \leq w_p \leq 0,54$:

$$\ln A_w = 2,392W_p - 1,431 . \quad (7)$$

С целью аппроксимации варьирования свободной энергии Гиббса ($d\Delta F/dW_p$) по влажности для двух выбранных зон, находящихся в гигроскопическом ареале, было использовано соотношение (3):

Для первой:

$$\frac{\partial \Delta F}{\partial W_p} = -RT \ln A_w = -RT (6,827W_p - 2,416) ,$$

$$\frac{\partial \Delta F}{\partial W_p} = 6489 - 18333W_p . \quad (8)$$

Для второй:

$$\frac{\partial \Delta F}{\partial W_p} = -RT \ln A_w = -RT(2,451W_p - 1,320),$$

$$\frac{\partial \Delta F}{\partial W_p} = 3546 - 6581W_p. \quad (9)$$

Статические закономерности взаимосвязи сухих веществ с водной средой и анализ ИС дают возможность выявить и провести оценку механизма варьирования слагаемых в соотношении Гиббса–Гельмгольца при неизменном давлении и температуре [4]: $\Delta F = \Delta E - T \Delta S$ ($\Delta E, \Delta S$ – варьирование внутренней энергетической (энтальпии) и энтропийной составляющих, а также их производных по w_p при $P, T = const$):

$$\left(\frac{\partial \Delta F}{\partial W_p} \right)_{T,P} = \left(\frac{\partial \Delta E}{\partial W_p} \right)_{T,P} - T \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial W_p} \right)_{T,P}, \quad (10)$$

где энтропийная часть свободной энергии $T \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial W_p} \right)_{T,P}$ для множества веществ имеет существенное значение.

Взяв производную соотношения (10) по T , получим:

$$\frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{\partial \Delta F}{\partial W_p} \right)_{T,P} = -T \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial W_p} \right)_{T,P} \quad (11)$$

Приняв во внимание уравнение (3) для дифференциального варьирования энтропии связанной водной среды, имеем:

$$\left(\frac{\partial \Delta S}{\partial W_p} \right)_{T,P} = \frac{-\partial(RT \ln A_w)}{\partial T} = -R \frac{\partial(T \ln A_w)}{\partial T}. \quad (12)$$

Отметим, что нужно иметь соотношения, где $\ln A_w$ находится в зависимости от w и T , то есть необходимо построить ИС при различных T . Делаем допущение о том, что сдвиг ИС при варьировании T проходит по линейному закону, тогда $\ln A_w = f(w_p, T)$ для линейного участка выглядит следующим образом:

$$\ln A_w = (aT + b)W_p + (cT + d), \quad (13)$$

для криволинейного:

$$\ln A_w = (aT + b)W_p^3 + (cT + d)W_p^2 + (eT + f)W_p + (gT + k). \quad (14)$$

Взяв производную от соотношений (13) и (14) по температуре, перемножив при этом $\frac{\partial \Delta S}{\partial W_p}$ и T , найдем величину энергетического варьирования.

Получив соотношения для двух зон при $T = 323$ °К и 298 °К, определяем для них коэффициенты из следующих систем уравнений:

$$\begin{cases} 323a + b = 6,827 \\ 298a + b = 9,024 \end{cases} \text{ и } \begin{cases} 323c + d = -2,416 \\ 298c + d = -3,092 \end{cases}.$$

a	-0,088
b	35,219
c	0,027
d	-11,148

Далее для первой зоны, имея значения коэффициентов, находим $T \frac{\partial \Delta S}{\partial W_p}$:

$$T \frac{\partial \Delta S}{\partial W_p} = 57910W_p - 16959. \quad (15)$$

Так же для второй зоны:

$$\begin{cases} 323a + b = 2,451 \\ 298a + b = 2,392 \end{cases} \text{ и } \begin{cases} 323c + d = -1,320 \\ 298c + d = -1,431 \end{cases}.$$

a	0,002
b	1,688
c	0,004
d	-2,751

$$T \frac{\partial \Delta S}{\partial W_p} = -8631W_p - 297. \quad (16)$$

Учитывая соотношение (10), находим соотношение для $\frac{\partial \Delta E}{\partial W_p}$.

Для первой зоны:

$$\frac{\partial \Delta E}{\partial W_p} = 39577W_p - 10470. \quad (17)$$

Для второй зоны:

$$\frac{\partial \Delta E}{\partial W_p} = 3249W_p - 15212. \quad (18)$$

В результате были построены зависимости энергетических варьирований от влажности, которые представлены на рис. 4.

Информация о варьировании связанной сорбционной энергии при переменных T нужна для нахождения удельной тепловой энергии испарения $r = f(W, T)$ (Дж/кг) и определенных технологических условий операции обезвоживания, в частности для решения адаптированной к АП математической модели трансфера вещества и тепла, в которую входит данная функциональная зависимость [5, 10].

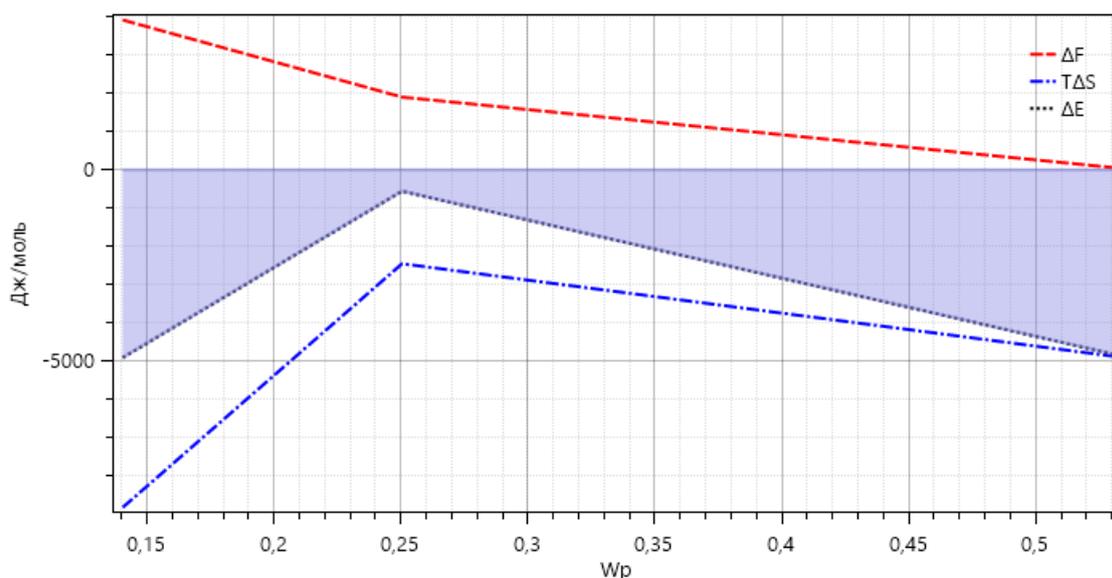


Рис. 4. Изменение свободной $\frac{\partial \Delta F}{\partial W_p}$, связанной $T \frac{\partial \Delta S}{\partial W_p}$ и внутренней $\frac{\partial \Delta E}{\partial W_p}$ энергии в зависимости от влажности материала

Fig. 4. Change in free $\frac{\partial \Delta F}{\partial W_p}$, bound $T \frac{\partial \Delta S}{\partial W_p}$ and internal $\frac{\partial \Delta E}{\partial W_p}$ energy depending on the moisture content of the material

При проектировании операции влагоудаления общую энергию испарения r [5] находят, складывая теплоту испарения свободной влаги r' , смачивания $r_{см}$ и $r_{энт}$, обуславливающую энтропийную составляющую.

$$r = r' + r_{см} + r_{энт}. \quad (19)$$

r' находится в линейной зависимости от T насыщенного пара в пределах варьирования $T = 323 \dots 298$ [173]:

$$r' = 3118,458 \cdot 10^3 - 2286T \quad (20)$$

$r_{см}$ находится из соотношения [172]:

$$r_{см} = \left| 55,556 \cdot \left(\frac{\partial \Delta F}{\partial W_p} \right)_{T,p} \right| \quad (21)$$

$r_{энт}$ определяется как [172]:

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

Итак, для обеих зон значение r' является неизменным и равно:

$$r = 3118,458 \cdot 10^3 - 2286 \cdot 323 = 2380080 \text{ Дж/кг}. \quad (23)$$

Для первого участка:

$$r_{см} = \left| 360486 - 1018520W_p \right|, \quad (24)$$

$$r_{эм} = |3217274W_p - 942161| \quad (25)$$

$$r = 2380080 + |360486 - 1018520W_p| + |3217274W_p - 942161|. \quad (26)$$

Для второго участка:

$$r_{см} = |197003 - 365632W_p|, \quad (27)$$

$$r_{эм} = |-479495W_p - 16490|. \quad (28)$$

$$r = 2380080 + |197003 - 365632W_p| + |-479495W_p - 16490|. \quad (29)$$

На рис. 5 показана зависимость теплоты парообразования в гигроскопической области влагоудаления от равновесной влажности.

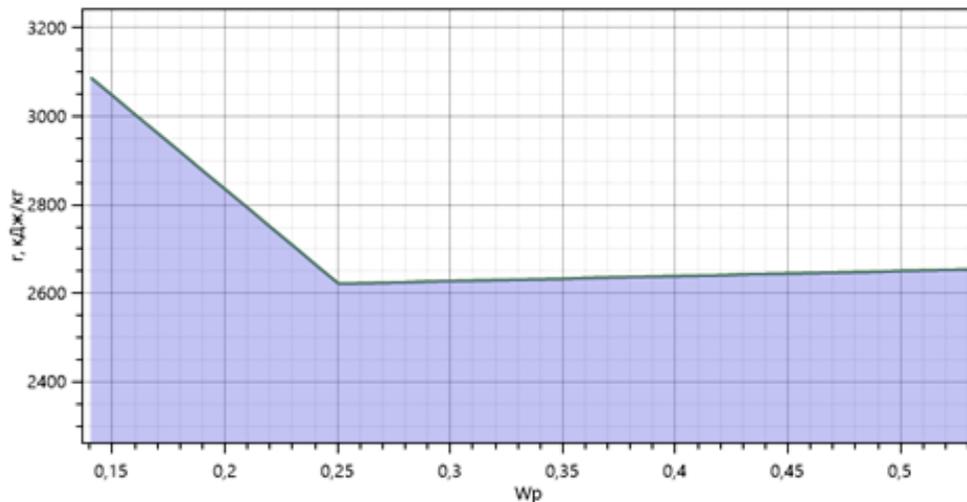


Рис. 5. Графическая зависимость удельной тепловой энергии испарения от равновесной влажности в процессе снижения влажности у исследуемого материала

Fig. 5. Graphical dependence of the specific thermal energy of evaporation on the equilibrium moisture content in the process of decreasing moisture content in the test material

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, осуществлен анализ статических и термодинамических закономерностей процедуры сорбции влаги пектиновым гелем, полученным из арбузной корки, на основе изучения его гигроскопических параметров для оптимизации и моделирования операции обезвоживания.

Проведено эмпирическое исследование гигроскопических параметров, которое дало возможность определить итоговую, наиболее приемлемую для длительного хранения влажность продукта. Дополнительно выявлены и математически описаны показатели, обуславливающие энергию связи влаги с материалом и определяющие итоговую полезную энергоёмкость процесса влагоудаления.

Список источников

1. Хатко З. Н. Ашинова А. А Пектиносодержащие пленочные структуры: монография. Майкоп: Изд-во МГТУ, 2019. 110.
2. Внукова Т. Н., Влащик Л. Г. Технология функционального десерта с использованием натуральных ингредиентов // Молодой ученый. 2015. № 5.1 (85.1). С. 73–77.
3. Арбузы в цифрах. [Электронный ресурс]. URL: https://www.rbc.ru/own_business/24/08/2017/599c39f09a794755c7c0e49c (Дата обращения: 17.06.2021).
4. Алексанян И. Ю. Развитие научных основ процессов высокоинтенсивной сушки продуктов животного и растительного происхождения: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.18.12. М., 2001. 52 с.
5. Массообменные процессы в химической и пищевой технологии: учеб. пособие / И. Ю. Алексанян [и др.]. Санкт-Петербург: Лань. 2014. 222 с.
6. Гигроскопические свойства водорастворимых антоциановых комплексов, выделяемых из плодово-ягодного сырья / Е. В. Андреева, С. С. Евсеева, А. Х.-Х. Нугманов, И. Ю. Алексанян // Вестник Международной академии холода. 2020. № 4. С. 45–52.
7. Определение гигроскопических свойств и десорбционных параметров в технологии гранулирования пшеничной клейковины / Е. В. Фоменко, И. Ю. Алексанян, О. А. Петровичев, В. Н. Лысова // Вестник Международной академии холода. 2019. № 2. С. 86–94.
8. Васильев В. Н., Куцакова В. Е., Фролов С. В. Технология сушки. Основы тепло- и массопереноса: учебник для вузов. Санкт-Петербург: ГИОРД, 2013. 224 с.
9. Лыков А. В. Сушка в химической промышленности. Москва: Химия. 1970. 499 с.
10. Максименко Ю. А. Развитие научно-практических основ и совершенствование процессов сушки растительного сырья в диспергированном состоянии: дис. ... докт. техн. наук: 05.18.12. Астрахань, 2016. 502 с.
11. Алексанян И. Ю., Буйнов А. А. Высокоинтенсивная сушка пищевых продуктов. Пеносушка. Теория. Практика. Моделирование: монография. Астрахань: АГТУ, 2004. 380 с.
12. Bazardeh M. E. Esmaili M. Sorption isotherm and state diagram in evaluating storage stability for sultana raisins. Journal of Stored Products Research, 2014, no. 59, pp. 140–145.
13. Blahovec J., Yanniotis S. Modified classification of sorption isotherms. Journal of Food Engineering, 2009, no. 91(1), pp. 72–77.
14. Henderson D., Snook I. K. Adsorption of gases and vapors on a solid surface. Journal of Physical Chemistry. 1983, no. 87(15), pp. 2956–2959.
15. Никитина Л. М. Гигроскопические параметры и коэффициенты массопереноса во влажных материалах. М.: Энергия, 1967. 499 с.
16. Вычисление энергии на испарение связанной влаги из джекфрута / Т. С. Нгуен, А. Х.-Х. Нугманов, З. М. Арабова, А. А. Нугманова // Известия КГТУ. 2019. № 55. С. 214–225.

References

1. Khatko Z. N., Ashinova A. A. *Pektinosoderzhashchie plenochnye struktury* [Pectin-containing film structures]. Maykop, MGTU Publ., 2019. 110 p.
2. Vnukova T. N., Vlashchik L. G. *Tekhnologiya funktsional'nogo deserta s ispol'zovaniem natural'nykh ingredientov* [Technology of functional dessert with the use of natural ingredients]. *Molodoy uchenyy*, 2015, no. 5.1 (85.1), pp. 73–77.
3. *Arbuzy v tsifrah* [Watermelons in numbers]. Available at: https://www.rbc.ru/own_business/24/08/2017/599c39f09a794755c7c0e49c (Accessed 17 Juny 2021).
4. Aleksanyan I. Yu. *Razvitie nauchnykh osnov protsessov vysokointensivnoy sushki produktov zhivotnogo i rastitel'nogo proiskhozhdeniya. Avtoreferat diss. dokt. tekhn. nauk* [Development of scientific foundations of the processes of high-intensity drying of products of animal and plant origin. Abstract of dis. dr. sci.]. Moscow, 2001, 52 p.
5. Aleksanyan I. Yu. [i dr.]. *Massoobmennyye protsessy v khimicheskoy i pishchevoy tekhnologii: ucheb. posobie* [Mass exchange processes in chemical and food technology: textbook]. Saint-Petersburg, Lan', 2014, 222 p.
6. Andreeva E. V., Evseeva S. S., Nugmanov A. Kh.-Kh., Aleksanyan I. Yu. *Gigroskopicheskie svoystva vodorastvorimykh antotsianovykh kompleksov, vydelyaemykh iz plodovo-yagodnogo syr'ya* [Hygroscopic properties of water-soluble anthocyanin complexes isolated from fruit and berry raw materials]. *Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda*, 2020, no. 4, pp. 45–52.
7. Fomenko E. V., Aleksanyan I. Yu., Petrovichev O. A., Lysova V. N. *Opreделение gigroskopicheskikh svoystv i desorbtsionnykh parametrov v tekhnologii granulirovaniya pshenichnoy kleykoviny* [Determination of hygroscopic properties and desorption parameters in the technology of granulation of wheat gluten]. *Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda*. 2019, no. 2, pp. 86–94.
8. Vasil'ev V. N., Kutsakova V. E., Frolov S. V. *Tekhnologiya sushki. Osnovy teplo- i massoperenosa: uchebnyk dlya vuzov* [Drying technology. Basics of heat and mass transfer: textbook for universities]. Saint-Petersburg, GIOR, 2013, 224 p.
9. Lykov A. V. *Sushka v khimicheskoy promyshlennosti* [Drying in the chemical industry]. Moscow, Khimiya, 1970, 499 p.
10. Maksimenko Yu. A. *Razvitie nauchno-prakticheskikh osnov i sovershenstvovanie protsessov sushki rastitel'nogo syr'ya v dispergirovannom sostoyanii. Diss. dokt. tekhn. nauk* [Development of scientific and practical foundations and improvement of drying processes of vegetable raw materials in a dispersed state. Dis. dr. tech. sci.]. Astrakhan', 2016, 502 p.
11. Aleksanyan I. Yu., Buynov A. A. *Vysokointensivnaya sushka pishchevykh produktov. Penosushka. Teoriya. Praktika. Modelirovanie* [High-intensity drying of food products. Foam dryer. Theory. Practice. Modeling]. Astrakhan', AGTU, 2004, 380 p.
12. Bazardeh M. E., Esmaili M. Sorption isotherm and state diagram in evaluating storage stability for sultana raisins. *Journal of Stored Products Research*, 2014, no. 59, pp. 140–145.
13. Blahovec J., Yanniotis S. Modified classification of sorption isotherms. *Journal of Food Engineering*, 2009, no. 91(1), pp. 72–77.

14. Henderson D., Snook I. K. Adsorption of gases and vapors on a solid surface. *Journal of Physical Chemistry*. 1983, no. 87(15), pp. 2956–2959.

15. Nikitina L. M. *Gigroskopicheskie parametry i koeffitsienty massoperenosa vo vlazhnykh materialakh* [Hygroscopic parameters and coefficients of mass transfer in wet materials]. Moscow, Energy Publ., 1967. 499 p.

16. Nguen T. S., Nugmanov A. Kh.-Kh., Arabova Z. M., Nugmanova A. A. Vychislenie energii na isparenii svyazannoy vlagi iz dzhekfruta [Calculation of energy for evaporation of bound moisture from jackfruit]. *Izvestiya KGTU*, 2019, no. 55, pp. 214–225.

Информация об авторах

А. Х.-Х. Нугманов – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Технологические машины и оборудование»

Г. С. Мещерякова – младший научный сотрудник научно-исследовательской части

В. А. Лебедев – машинист технологических насосов

И. Ю. Алексанян – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технологические машины и оборудование»

Д. Й. Аджей – аспирант кафедры «Технологический машины и оборудование»

Information about the authors

A. Kh.-Kh. Nugmanov – Doctor of Engineering, Associate Professor, Professor of the Department «Technological Machines and Machinery»

G. S. Meshcheryakova – junior researcher of the Research Department

V. A. Lebedev – technological pump operator

I. Yu. Aleksanyan -Doctor of Engineering, Professor, Professor of the Department «Technological Machines and Machinery»

D. Y. Adzhey – graduate student of the Department «Technological Machines and Machinery»

Статья поступила в редакцию 14.10.2021; одобрена после рецензирования 01.03. 2022; принята к публикации 23.03.2022.

The article was submitted 14.10.2021; approved after reviewing 01.03. 2022; accepted for publication 23.03.2022.