

Особенности моделирования гигротермических процессов обработки зерновых культур в условиях вакуума

Л.В. Ларина¹, В.В. Смирнов¹, Н.В. Плотникова²

¹Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) ДГТУ в г. Шахты
²Донской Государственный технический университет

Аннотация: Приведенный обзор гигротермических процессов при обработке зерновых культур и их особенностей представлен с позиций нанотехнологий. Показано, что для разрабатываемых нанотехнологий в производстве сельхозпродукции необходимо применять нетрадиционные методы исследования процессов, каким является метод подобия функционирования технических систем (ПФТС). Этот метод позволит для процессов увлажнения, сушки, влажно-тепловой обработки в условиях вакуума получать обобщённые критерии подобия, определять их численные значения и получать обобщённые критериальные зависимости интенсивности рассматриваемых процессов от параметров обработки. Реализация метода позволит количественно описывать процессы гигротермической обработки зерна в условиях вакуума, назначать параметры обработки и управлять ими. Разработаны математические модели гигротермических процессов на основе метода подобия функционирования технических систем в зависимости от параметров среды и строения капиллярно-пористых оболочек зерна.

Ключевые слова: гигротермическое воздействие, зерновые культуры, вакуум, нанотехнологии, увлажнение, сушка, влажно-тепловая обработка, капиллярно-пористые материалы, микрокапилляр, критерий подобия, метод подобия функционирования технических систем.

Особенности гигротермического воздействия на зерно в условиях вакуума [1,2] позволяют рассматривать такую обработку, как нанотехнологии в сельскохозяйственном производстве. Этот подход требует для моделирования процессов использовать нетрадиционные методы исследования, такие, как математические оценки [3], метод подобия функционирования технических систем (далее ПФТС) [4], которые позволят для вакуумно-капиллярных процессов увлажнения, сушки, влажно-тепловой обработки получать обобщённые критерии подобия, определять их численные значения и получать обобщённые критериальные зависимости интенсивности рассматриваемых процессов от параметров обработки. Реализация этого метода позволит количественно описывать процессы

вакуумно-капиллярной гигротермической обработки зерна, назначать параметры обработки и управлять ими.

Ряд технологий [5,6] и установок с использованием предварительного вакуумирования зерна [7-9], разработанных авторами для сельскохозяйственного производства могут считаться, на наш взгляд, одними из первых нанотехнологий в этой отрасли и способны обеспечить новый виток развития в переходе России к шестому технологическому укладу.

Гигротермическая обработка в условиях вакуума [7] капиллярно-пористых материалов, к которым относятся и оболочки зерна, обеспечивает избирательное воздействие на микрокапиллярную структуру оболочек и поэтому может быть названа вакуумно-капиллярной. Характерной особенностью такой обработки является воздействие на объекты с размерами не более 100 нм (микрокапилляры оболочек зерна) частицами, имеющими такой же порядок размеров (молекулами пара в разреженном состоянии).

Расчет количественных показателей, характеризующих вышеописанные процессы, требует новых подходов, так как в настоящее время нет единой теоретической концепции, основываясь на которой, можно было бы получить строгое количественное описание процессов тепломассопереноса влаги в газообразной фазе в капиллярно-пористых зерновых культурах, имеющих стохастические характеристики, но накоплен обширный материал, объясняющий отдельные закономерности процессов. Моделирование же этих процессов основано на явлении переноса энергии и вещества и подчиняется общим закономерностям термодинамики необратимых процессов, а теория неравновесных термодинамических процессов недостаточно развита, и для описания её следует применять концепции квантовой физики и нанотехнологии [10]. Упрощённые критериальные уравнения, используемые при описании высокоинтенсивного тепломассопереноса, позволяют установить дальнейшие пути его

интенсификации. Однако, не являясь обобщёнными, эти уравнения не пригодны для количественного описания процессов и управления и в предложенных моделях не учтён механизм высокоинтенсивного тепломассообмена, протекающего в условиях пониженного давления (вакуума) и особенности, происходящие при таком воздействии в структуре материалов, имеющих стохастические характеристики.

Так, при вакуумно-капиллярной гигротермической обработке, резко возрастает чувствительность микрокапилляров оболочек зерна, являющихся фактически наноконпонентами, к воздействующей среде – молекулам пара (диаметр молекулы пара равен 0,3 нм), получаемого в условиях вакуума [9]. При этом показатели физико-механических свойств обработанного таким образом зерна значительно превосходят показатели зерна, увлажнённого паром при нормальном атмосферном давлении. Таким образом, вакуумно-капиллярная гигротермическая обработка зерна может быть, на наш взгляд, отнесена к нанотехнологиям, характерной особенностью которых является воздействие на объекты с размерами не более 100 нм (микрокапилляры кожи) частицами, имеющими такой же порядок размеров (молекулами пара). А так как классические законы физики остаются справедливыми для систем до 10 нм, то при меньших размерах возникают новые закономерности и для математического описания процессов требуются новые методы, к которым может быть отнесён метод ПФТС [4]. За основу разработки и исследования принят метод ПФТС, позволяющий системно исследовать процессы интенсифицированного гигротермического воздействия на зерновые культуры.

Для разрабатываемых нанотехнологий в производстве сельхозпродукции необходимо разрабатывать нетрадиционные методы исследования процессов, каким и является метод ПФТС [4].

На первом этапе создания оборудования методом ПФТС интенсифицированная гигротермическая обработка (далее ИГО) представляется как система, характеризующаяся совокупностью подсистем. Подсистемы представляют собой:

- «средства технологии» (камера, вакуумный насос и парогенератор);
- «технологию» (последовательность выполнения операций гигротермического воздействия: увлажнения, сушки и влажно-тепловой обработки);
- «объект технологии» (партии зерна, помещаемые в вакуумную камеру);
- «продукцию» (обработанные партии зерна после соответствующей гигротермической обработки).

Для исследования функционирования системы ИГО в детерминированных условиях формируются критерии подобия по методике указанного метода с использованием программного продукта.

Для реальной подсистемы одного функционального назначения и идентичных физических процессов с её функциональным аналогом, детерминированное подобие устанавливается равенством их соответственных критериев и равенством единице комплексов независимых параметров, входящих в эти критерии, что является достаточным условием детерминированного подобия её функционирования.

Подсистемы характеризуются множеством параметров: выходных ($I_{ув.в}$, $I_{суш}$, $I_{ВТО}$); входных ($\varphi_{П.С}$, ρ , D , $R_{П.О}$, $C_{П.О}$, Q_T , τ , K , m_3 , d , $V_{МК}$, $Q_{П}$, C_K); возмущающих (T_H , T_K , P_H , P_K , $P_{П}$, ΔP , F_Φ); внутренних структурных (V_K , C_B).

С учётом этой зависимости по рассмотренной методике были получены частные π -критерии подобия, объединённые по физической значимости.

Для получения:

критерия - π_{Ki} объединялись частные критерии: $\pi_{Qn}, \pi_{Ck}, \pi_{\mu}, \pi_d, \pi_{mз}, \pi_{Ek}, \pi_{Ck}$;

критерия - π_{Ti} объединялись частные критерии $\pi_{Tk}, \pi_{Pk}, \pi_D, \pi_B$;

Численные значения объединенных критериев подобия вычислены, исходя из граничных значений выходной характеристики функционирования подсистем и независимых параметров, установленных на основе экспериментальных исследований и приведены в таблицах далее.

Функциональная зависимость выходного параметра I интенсивности увлажнения от ряда определяющих её состояние параметров (1), составляемая в соответствии с методом ПФТС [4], приведена ниже:

$$I = f(d, m_з, V_{M.K}, Q_{П}, C_K, \mu, \varphi_{ПС}, T_H, T_K, P_H, P_K, \tau, Q_T, K, P_{П}, \Delta P; F_{\Phi}, V_K, D, \rho, C_B, C_{ПО}, R_{ПО}). \quad (1)$$

Частные критерии подобия π_i получены с использованием специально разработанной программы KriNN [4]. Для получения частных критериев подобия необходимо выбрать комплекс независимых параметров, который формируется, исходя из условия независимости размерностей (в единой системе измерений). Причём количество независимых параметров должно быть равно числу основных единиц измерения СИ.

В качестве независимых параметров для процесса увлажнения применяются начальная температура T_H , начальное давление в камере P_H , удельная теплоёмкость зерна C_K , объём камеры V_K , паропроницаемость $Q_{П}$ (таблица 1).

Обобщённый критерий подобия процесса увлажнения (2) получен перемножением частных критериев подобия и подстановкой их в числитель при прямой зависимости выходного параметра от рассматриваемого и в знаменатель – при обратной.

Таблица 1

Наименование и размерность параметров для определения интенсивности процесса увлажнения

Параметр	Обозначение	Размерность в единицах СИ	Показатели степени размерностей в единицах СИ				Рекомендуемые условия однозначности	Независимые параметры по размерностям
			<i>M</i>	<i>T</i>	<i>L</i>	<i>Q</i>		
1. Объём камеры	V_K	m^3	0	0	3	0	$9 \cdot 10^{-2}$	да
2. Коэффициент диффузии пара	D	m^2/c	0	-1	2	0	$0,58 \cdot 10^{-4}$	
3. Плотность пара в условиях вакуума	ρ	$кг/м^3$	1	0	-3	0	$26 \cdot 10^{-2}$	
4. Удельная теплоёмкость воды	C_B	$m^2/(c^2 \cdot K)$	0	-2	2	-1	$1,915 \cdot 10^3$	
5. Удельная теплоёмкость парообразования	$C_{ПО}$	$m^2/(c^2 \cdot K)$	0	-2	2	-1	$2,018 \cdot 10^3$	
6. Удельная теплота парообразования	$R_{ПО}$	m^2/c^2	0	-2	2	0	$480 \cdot 10^3$	
7. Влажность паровоздушной среды	$\varphi_{п.с}$	$кг/кг$	0	0	0	0	0,97	
8. Количество теплоты	Q_T	$кг \cdot m^2 / c^2$	1	-2	2	0	2050	
9. Время увлажнения	τ	c	0	1	0	0	360	
10. Температура начальная	T_H	K	0	0	0	1	323	да
11. Температура конечная	T_K	K	0	0	0	1	332	
12. Начальное давление в камере	P_H	$кг/(c^2 \cdot м)$	1	-2	-1	0	$20 \cdot 10^3$	да
13. Конечное давление в камере	P_K	$кг/(c^2 \cdot м)$	1	-2	-1	0	$50 \cdot 10^3$	
14. Масса заготовок	$m_з$	$кг$	1	0	0	0	$2,0 \cdot 10^{-3}$	
15. Толщина оболочки зерна	d	$м$	0	0	1	0	$1,6 \cdot 10^{-3}$	
16. Объём микрокапилляров	$V_{м.к.}$	m^3	0	0	3	0	$0,257 \cdot 10^{-3}$	
17. Паропроницаемость	Q_P	$кг / (m^2 \cdot c)$	1	-1	-2	0	$107,73 \cdot 10^3$	
18. Удельная теплоёмкость зерна	C_K	$m^2/(c^2 \cdot K)$	0	-2	2	-1	$1,61 \cdot 10^3$	да
19. Коэффициент диффузионного сопротивления	μ	-	0	0	0	0	3,2	

Значения частных π -критериев для процесса увлажнения:

$$\pi(I) = I / (T_H^{-0,5} \cdot P_H^1 \cdot C_K^{-0,5} \cdot V_K^{-0,33}) = 0,95 \cdot 10^{-24};$$

$$\pi(d) = d / (T_H^0 \cdot P_H^0 \cdot C_K^0 \cdot V_K^{0,33}) = 5,24 \cdot 10^{-3};$$

$$\pi(m_3) = m_3 / (T_H^{-1} \cdot P_H^1 \cdot C_K^{-1} \cdot V_K^1) = 1,87;$$

$$\pi(V_{M.K.}) = V_{M.K.} / (T_H^0 \cdot P_H^0 \cdot C_K^0 \cdot V_K^0) = 0,25;$$

$$\pi(Q_n) = Q_n / (T_H^{-0,5} \cdot P_H^1 \cdot C_K^{0,5} \cdot V_K^0) = 3884,37;$$

$$\pi(\mu) = \mu / (T_H^0 \cdot P_H^0 \cdot C_K^0 \cdot V_K^0) = 3,2;$$

$$\pi(\varphi_{ПС}) = \varphi_{ПС} / (T_H^0 \cdot P_H^0 \cdot C_K^0 \cdot V_K^0) = 0,97;$$

$$\pi(T_K) = T_K / (T_H^1 \cdot P_H^0 \cdot C_K^0 \cdot V_K^0) = 1,02;$$

$$\pi(P_K) = P_K / (T_H^0 \cdot P_H^1 \cdot C_K^0 \cdot V_K^0) = 2;$$

$$\pi(\tau) = \tau / (T_H^{-0,5} \cdot P_H^0 \cdot C_K^{0,5} \cdot V_K^{0,33}) = 579298,66;$$

$$\pi(D) = D / (T_H^1 \cdot P_H^0 \cdot C_K^1 \cdot V_K^{-0,33}) = 4,99 \cdot 10^{-11};$$

$$\pi(\rho) = \rho / (T_H^{-1} \cdot P_H^1 \cdot C_K^{-1} \cdot V_K^0) = 6,76;$$

$$\pi(C_B) = C_B / (T_H^0 \cdot P_H^0 \cdot C_K^1 \cdot V_K^0) = 1,18;$$

$$\pi(R_{ПО}) = R_{ПО} / (T_H^0 \cdot P_H^0 \cdot C_K^1 \cdot V_K^0) = 298,13;$$

$$\pi(C_{ПО}) = C_{ПО} / (T_H^1 \cdot P_H^0 \cdot C_K^1 \cdot V_K^0) = 4,58;$$

$$\pi(Q_T) = Q_T / (T_H^0 \cdot P_H^1 \cdot C_K^0 \cdot V_K^1) = 1,13.$$

Обобщённые критерии подобия процесса увлажнения приводятся ниже.

$$\prod_{i=1}^k \pi_{i_{увл.}} = \frac{\pi_{I_{увл.}} \cdot \pi_d \cdot \pi_{m_3} \cdot \pi_{V_{M.K.}} \cdot \pi_{Q_{П}} \cdot \pi_{\rho} \cdot \pi_{C_{ПО}} \cdot \pi_{Q_T} \cdot \pi_D \cdot \pi_{\varphi_{ПС}} \cdot \pi_{t_K}}{\pi_{P_K} \cdot \pi_{C_B} \cdot \pi_{R_{ПО}} \cdot \pi_{\mu} \cdot \pi_{\tau}}, \quad (2)$$

$i = \overline{1, k}$, при $k = 16$

$$\prod_{i=1}^k \pi_{i_{увл.}} = 0,69.$$

Формирование обобщённого критериального выражения для интенсивности I выполняется путём использования обобщённого критерия

подобия функционирования системы, а затем решения полученного равенства относительно I (2).

Полученная обобщённая критериальная зависимость интенсивности процесса увлажнения (3) имеет вид:

$$I_{\text{увл}} = \frac{d \cdot m \cdot V_{\text{М.К.}} \cdot t_{\text{К.}} \cdot C_{\text{К.}}^{3,5} \cdot \rho \cdot C_{\text{ПО}} \cdot Q_{\text{T.}} \cdot D \cdot \varphi_{\text{П.С.}} \cdot Q_{\text{П.}}}{t_{\text{H.}}^{0,5} \cdot P_{\text{К.}} \cdot C_{\text{В.}} \cdot R_{\text{ПО}} \cdot V_{\text{К.}}^{1,33} \cdot P_{\text{H.}}^4 \cdot \mu \cdot \tau} \cdot 0,69. \quad (3)$$

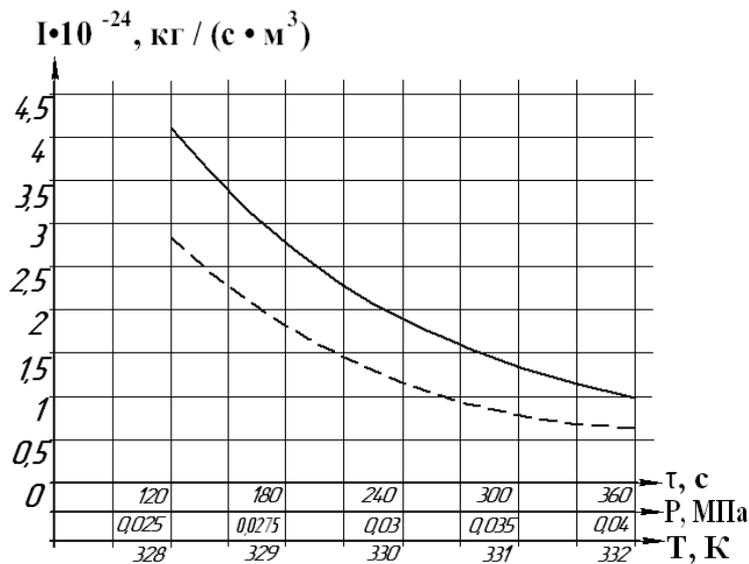


Рис. 1 - Зависимости интенсивности увлажнения от способа подачи пара, времени, температуры и давления:
 — при образовании пара внутри камеры;
 - - - - - при образовании пара вне камеры

Функциональная зависимость выходного параметра I интенсивности сушки от ряда определяющих её состояние параметров (таблица 2), составляемая в соответствии с методом ПФТС [4] приведена ниже:

$$I = f(d, m_3, V_{\text{М.К.}}, Q_{\text{П.}}, C_{\text{К.}}, \mu, \varphi_{\text{П.С.}}, T_{\text{H.}}, T_{\text{К.}}, P_{\text{H.}}, P_{\text{К.}}, \tau, Q_{\text{T.}}, K, P_{\text{П.}}, \Delta P; F_{\text{Ф.}}, V_{\text{К.}}, D, \rho, C_{\text{В.}}, C_{\text{ПО}}, R_{\text{ПО}}). \quad (4)$$

Частные критерии подобия π_i получены с использованием специально разработанной программы KriNN [4]. Для получения частных критериев подобия необходимо выбрать комплекс независимых параметров, который формируется, исходя из условия независимости размерностей (в единой

системе измерений). Причём количество независимых параметров должно быть равно числу основных единиц измерения СИ.

В качестве независимых параметров для процесса сушки, применяются начальная температура - T_H , начальное давление в камере - P_H , удельная теплоёмкость зерна - C_K , объём камеры - V_K , паропроницаемость - Q_{Π} (таблица 2).

Значения частных π -критериев процесса сушки:

$$\pi(I) = I / (T_H^{0,5} \cdot P_H^1 \cdot C_K^{-0,5} \cdot V_K^{-0,33}) = 1,23 \cdot 10^{-8};$$

$$\pi(d) = d / (T_H^0 \cdot P_H^0 \cdot C_K^0 \cdot V_K^{0,33}) = 5,24 \cdot 10^{-3};$$

$$\pi(m_3) = m_3 / (T_H^{-1} \cdot P_H^1 \cdot C_K^{-1} \cdot V_K^1) = 1,96;$$

$$\pi(V_{M.K.}) = V_{M.K.} / (T_H^0 \cdot P_H^0 \cdot C_K^0 \cdot V_K^0) = 0,25;$$

$$\pi(Q_{\Pi}) = Q_{\Pi} / (T_H^{-0,5} \cdot P_H^1 \cdot C_K^{-0,5} \cdot V_K^0) = 3973,54;$$

$$\pi(\mu) = \mu / (T_H^0 \cdot P_H^0 \cdot C_K^0 \cdot V_K^0) = 3,2;$$

$$\pi(\varphi_{\text{ПС}}) = \varphi_{\text{ПС}} / (T_H^0 \cdot P_H^0 \cdot C_K^0 \cdot V_K^0) = 0,55;$$

$$\pi(T_K) = T_K / (T_H^1 \cdot P_H^0 \cdot C_K^0 \cdot V_K^0) = 1,02;$$

$$\pi(P_K) = P_K / (T_H^0 \cdot P_H^1 \cdot C_K^0 \cdot V_K^0) = 2,5;$$

$$\pi(\tau) = \tau / (T_H^{-0,5} \cdot P_H^0 \cdot C_K^{-0,5} \cdot V_K^{0,33}) = 592597,23;$$

$$\pi(D) = D / (T_H^1 \cdot P_H^0 \cdot C_K^1 \cdot V_K^{-0,33}) = 4,19 \cdot 10^{-11};$$

$$\pi(\rho) = \rho / (T_H^{-1} \cdot P_H^1 \cdot C_K^{-1} \cdot V_K^0) = 6,53;$$

$$\pi(C_B) = C_B / (T_H^0 \cdot P_H^0 \cdot C_K^1 \cdot V_K^0) = 1,19;$$

$$\pi(R_{\text{ПО}}) = R_{\text{ПО}} / (T_H^0 \cdot P_H^0 \cdot C_K^1 \cdot V_K^0) = 298,13;$$

$$\pi(C_{\text{ПО}}) = C_{\text{ПО}} / (T_H^1 \cdot P_H^0 \cdot C_K^1 \cdot V_K^0) = 4,37;$$

$$\pi(Q_T) = Q_T / (T_H^0 \cdot P_H^1 \cdot C_K^0 \cdot V_K^1) = 1,13;$$

$$\pi(K) = K / (T_H^0 \cdot P_H^0 \cdot C_K^0 \cdot V_K^0) = 3.$$

Обобщённый критерий подобия процесса сушки (5) получен путём перемножения частных критериев подобия и подстановкой их в числитель

при прямой зависимости выходного параметра от рассматриваемого, и в знаменатель – при обратной.

Таблица 2

Наименование и размерность параметров для определения интенсивности процесса сушки

Параметр	Обозначение	Размерность	Показатели степени размерностей в единицах СИ				Заданное значение	Независимые параметры по размерностям
			<i>M</i>	<i>T</i>	<i>L</i>	<i>Q</i>		
1. Объём камеры	V_K	m^3	0	0	3	0	$9 \cdot 10^2$	да
2. Коэффициент диффузии пара	D	m^2/c	0	-1	2	0	$0,51 \cdot 10^{-4}$	
3. Плотность пара в условиях вакуума	ρ	$кг/м^3$	1	0	-3	0	$24 \cdot 10^{-2}$	
4. Удельная теплоёмкость воды	C_B	$m^2/(c^2 \cdot K)$	0	-2	2	-1	$1,925 \cdot 10^3$	
5. Удельная теплоёмкость парообразования	$C_{ПО}$	$m^2/(c^2 \cdot K)$	0	-2	2	-1	$2,018 \cdot 10^3$	
6. Удельная теплота парообразования	$R_{ПО}$	m^2/c^2	0	-2	2	0	$480 \cdot 10^3$	
7. Влажность паровоздушной среды	$\varphi_{ПС}$	$кг/кг$	0	0	0	0	0,55	
8. Количество теплоты	Q_T	$кг \cdot m^2 / c^2$	1	-2	2	0	2050	
9. Время сушки	τ	c	0	1	0	0	360	
10. Температура начальная	T_H	K	0	0	0	1	338	да
11. Температура конечная	T_K	K	0	0	0	1	348	
12. Начальное давление в камере	P_H	$кг/(c^2 \cdot m)$	1	-2	-1	0	$20 \cdot 10^3$	да
13. Конечное давление в камере	P_K	$кг/(c^2 \cdot m)$	1	-2	-1	0	$50 \cdot 10^3$	
14. Коэффициент цикличности	K	-	0	0	0	0	3	
15. Масса образца	m_3	$кг$	1	0	0	0	$6,5 \cdot 10^{-3}$	
16. Толщина оболочки зерна	d	m	0	0	1	0	$2,35 \cdot 10^{-3}$	
17. Объём микрокапилляров	$V_{M.K.}$	m^3	0	0	3	0	$0,257 \cdot 10^{-3}$	
18. Паропроницаемость	$Q_{П}$	$кг/(m^2 \cdot c)$	1	-1	-2	0	$107,73 \cdot 10^3$	
19. Удельная теплоёмкость зерна	C_K	$m^2/(c^2 \cdot K)$	0	-2	2	-1	$1,61 \cdot 10^3$	да
20. Коэффициент	μ	-	0	0	0	0	3,2	

диффузионного сопротивления								
--------------------------------	--	--	--	--	--	--	--	--

Обобщённый критерий подобия процесса сушки приводятся ниже.

$$\prod_{i=1}^k \pi_{i_{\text{суш}}} = \frac{\pi_{I_{\text{суш}}} \cdot \pi_d \cdot \pi_{m_3} \cdot \pi_{V_{\text{М.К.}}} \cdot \pi_{Q_{\text{П}}} \cdot \pi_{\rho} \cdot \pi_{C_{\text{ПО}}} \cdot \pi_{Q_{\text{T}}} \cdot \pi_D \cdot \pi_{\varphi_{\text{П.С}}} \cdot \pi_{t_{\text{К}}} \cdot \pi_{\text{К}}}{\pi_{P_{\text{К}}} \cdot \pi_{C_{\text{В}}} \cdot \pi_{R_{\text{ПО}}} \cdot \pi_{\mu} \cdot \pi_{\tau}}, i = \overline{1, k} \text{ при } k = 17 \quad (5)$$

$$\prod_{i=1}^k \pi_{i_{\text{суш}}} = 2,09.$$

Формирование обобщённого критериального выражения для интенсивности I сушки выполняется путём использования обобщённого критерия подобия функционирования системы, а затем - решения полученного равенства относительно I .

Полученная обобщённая критериальная зависимость интенсивности процесса сушки (6) имеет вид:

$$I_{\text{суш}} = \frac{d \cdot m \cdot V_{\text{М.К.}} \cdot t_{\text{К}} \cdot C_{\text{К}}^{3,5} \cdot \varphi \cdot C_{\text{ПО}} \cdot Q_{\text{T}} \cdot D \cdot \varphi_{\text{П.С}} \cdot Q_{\text{П}} \cdot \text{К}}{t_{\text{Н}}^{0,5} \cdot P_{\text{К}} \cdot C_{\text{В}} \cdot R_{\text{ПО}} \cdot V_{\text{К}}^{1,33} \cdot P_{\text{Н}}^4 \cdot \mu \cdot \tau} \cdot 2,09. \quad (6)$$

На основе обобщённой критериальной зависимости интенсивности процесса сушки (6) был получен график, приведённый на рис. 2.

Функциональная зависимость выходного параметра I интенсивности влажно-тепловой обработки от ряда определяющих её состояние параметров, составляемая в соответствии с методом ПФТС [4], приведена ниже (таблица 3).

В соответствии с методом ПФТС составляется функциональная зависимость выходного параметра I (интенсивность процесса влажно-тепловой обработки) от ряда определяющих её состояние параметров, представленных выше (таблица 3):

$$I = f(d, m_3, V_{\text{М.К.}}, Q_{\text{П}}, C_{\text{К}}, \mu, \varphi_{\text{П.С}}, T_{\text{Н}}, T_{\text{К}}, P_{\text{Н}}, P_{\text{К}}, \tau, Q_{\text{T}}, \text{К}, P_{\text{П}}, \Delta P; F_{\text{Ф}}, V_{\text{К}}, D, \rho, C_{\text{В}}, C_{\text{ПО}}, R_{\text{ПО}}). \quad (7)$$

Частные критерии подобия π_i получены с использованием специально разработанной программы KriNN [4]. Для получения частных критериев подобия необходимо выбрать комплекс независимых параметров, который формируется, исходя из условия независимости размерностей (в единой системе измерений). Причём количество независимых параметров должно быть равно числу основных единиц измерения СИ.

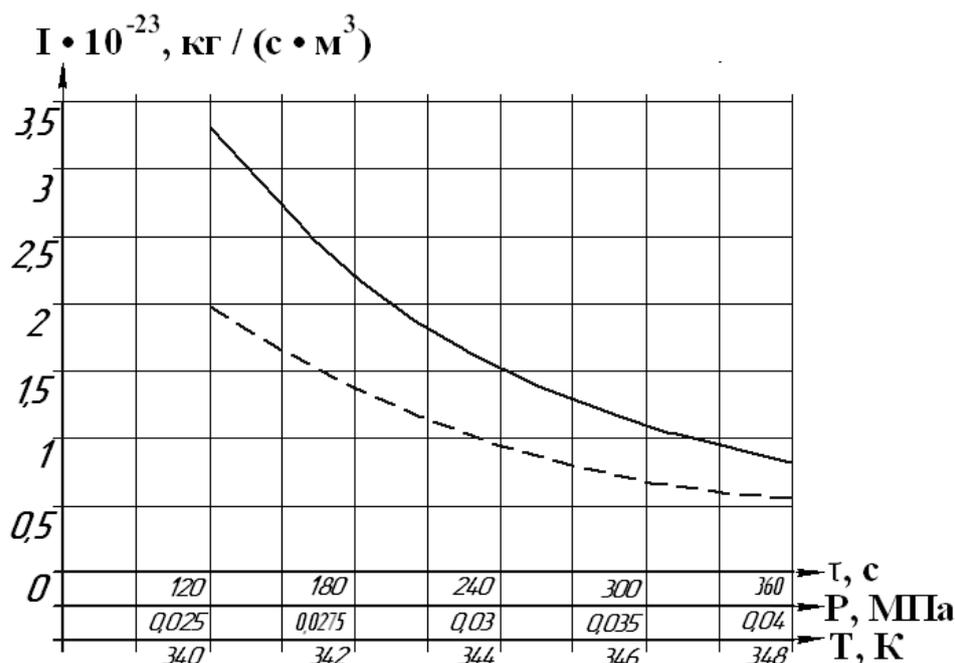


Рис. 2 - Зависимости интенсивности сушки от способа подачи пара, времени, температуры и давления:

- при образовании пара внутри камеры;
- при образовании пара вне камеры

В качестве независимых параметров процесса влажно-тепловой обработки применяются начальная температура - T_H , начальное давление в камере - P_H , удельная теплоёмкость зерна - C_K , объём камеры - V_K , паропроницаемость - Q_{II} (таблица 3).

Таблица 3

Наименование и размерность параметров для определения интенсивности процесса ВТО

Параметр	Обозначение	Размерность	Показатели степени размерностей	Заданное значение	Независимые параметры
----------	-------------	-------------	---------------------------------	-------------------	-----------------------

1	2	3	в единицах СИ				7	метры по размерностям
			M	T	L	Q		
1. Объём камеры	V_K	m^3	0	0	3	0	$9 \cdot 10^2$	да
2. Коэффициент диффузии пара	D	m^2/c	0	-1	2	0	$0,78 \cdot 10^{-4}$	

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7	8	
3. Плотность пара в условиях вакуума	ρ	$кг/м^3$	1	0	-3	0	$25 \cdot 10^{-2}$	
4. Удельная теплоёмкость воды	C_B	$m^2/(c^2 \cdot K)$	0	-2	2	-1	$1,915 \cdot 10^3$	
5. Удельная теплоёмкость парообразования	$C_{ПО}$	$m^2/(c^2 \cdot K)$	0	-2	2	-1	$2,018 \cdot 10^3$	
6. Удельная теплота парообразования	$R_{ПО}$	m^2/c^2	0	-2	2	0	$480 \cdot 10^3$	
7. Влажность паровоздушной среды	$\phi_{ПС}$	$кг/кг$	0	0	0	0	0,97	
8. Количество теплоты	Q_T	$кг \cdot м^2 / c^2$	1	-2	2	0	2050	
9. Время ВТО	τ	c	0	1	0	0	120	
10. Температура начальная	T_H	K	0	0	0	1	330	да
11. Температура конечная	T_K	K	0	0	0	1	340	
12. Начальное давление в камере	P_H	$кг/(c^2 \cdot м)$	1	-2	-1	0	$24 \cdot 10^3$	да
13. Конечное давление в камере	P_K	$кг/(c^2 \cdot м)$	1	-2	-1	0	$40 \cdot 10^3$	
14. Масса заготовок	m_3	$кг$	1	0	0	0	$6,5 \cdot 10^{-3}$	
15. Толщина оболочки зерна	d	$м$	0	0	1	0	$2,35 \cdot 10^{-3}$	
16. Объём микрокапилляров	$V_{M.K.}$	m^3	0	0	3	0	$0,257 \cdot 10^{-3}$	
17. Паропроницаемость	$Q_{П}$	$кг/(m^2 \cdot c)$	1	-1	-2	0	$107,73 \cdot 10^3$	
18. Удельная теплоёмкость зерна	C_K	$m^2/(c^2 \cdot K)$	0	-2	2	-1	$1,61 \cdot 10^3$	да
19. Коэффициент диффузионного сопротивления	μ	-	0	0	0	0	3,2	

Значения частных π -критериев процесса влажно-тепловой обработки:

$$\pi(I) = I / (T_H^{-0.5} \cdot P_H^1 \cdot C_K^{-0.5} \cdot V_K^{0.33}) = 3,05 \cdot 10^{-25};$$

$$\pi(d) = d / (T_H^0 \cdot P_H^0 \cdot C_K^0 \cdot V_K^{0.33}) = 5,24 \cdot 10^{-3};$$

$$\begin{aligned}\pi(m_3) &= m_3 / (T_H^{-1} \cdot P_H^1 \cdot C_K^{-1} \cdot V_K^1) = 1,59; \\ \pi(V_{M.K.}) &= V_{M.K.} / (T_H^0 \cdot P_H^0 \cdot C_K^0 \cdot V_K^0) = 0,25; \\ \pi(Q_{II}) &= Q_{II} / (T_H^{-0,5} \cdot P_H^1 \cdot C_K^{-0,5} \cdot V_K^0) = 3271,86; \\ \pi(\mu) &= \mu / (T_H^0 \cdot P_H^0 \cdot C_K^0 \cdot V_K^0) = 3,2; \\ \pi(\varphi_{ПС}) &= \varphi_{ПС} / (T_H^0 \cdot P_H^0 \cdot C_K^0 \cdot V_K^0) = 0,97; \\ \pi(T_K) &= T_K / (T_H^1 \cdot P_H^0 \cdot C_K^0 \cdot V_K^0) = 1,03; \\ \pi(P_K) &= P_K / (T_H^0 \cdot P_H^1 \cdot C_K^0 \cdot V_K^0) = 1,66; \\ \pi(\tau) &= \tau / (T_H^{-0,5} \cdot P_H^0 \cdot C_K^{-0,5} \cdot V_K^{0,33}) = 195180,75; \\ \pi(D) &= D / (T_H^1 \cdot P_H^0 \cdot C_K^1 \cdot V_K^{-0,33}) = 6,57 \cdot 10^{-11}; \\ \pi(\rho) &= \rho / (T_H^{-1} \cdot P_H^1 \cdot C_K^{-1} \cdot V_K^0) = 5,53; \\ \pi(C_B) &= C_B / (T_H^0 \cdot P_H^0 \cdot C_K^1 \cdot V_K^0) = 1,18; \\ \pi(R_{ПО}) &= R_{ПО} / (T_H^0 \cdot P_H^0 \cdot C_K^1 \cdot V_K^0) = 298,13; \\ \pi(C_{ПО}) &= C_{ПО} / (T_H^1 \cdot P_H^0 \cdot C_K^1 \cdot V_K^0) = 4,48; \\ \pi(Q_T) &= Q_T / (T_H^0 \cdot P_H^1 \cdot C_K^0 \cdot V_K^1) = 0,94.\end{aligned}$$

Обобщённые критерии подобия для каждого из рассчитываемых процессов (8) получены перемножением частных критериев подобия и подстановкой их в числитель при прямой зависимости выходного параметра от рассматриваемого, и в знаменатель – при обратной.

Обобщённые критерии подобия процесса влажно-тепловой обработки приводятся ниже.

$$\prod_{i=1}^k \pi_{i_{ВТО}} = \frac{\pi_{I_{ВТО}} \cdot \pi_d \cdot \pi_{m_3} \cdot \pi_{V_{M.K.}} \cdot \pi_{Q_{II}} \cdot \pi_{\rho} \cdot \pi_{C_{ПО}} \cdot \pi_{Q_T} \cdot \pi_D \cdot \pi_{\varphi_{П.С.}} \cdot \pi_{t_K}}{\pi_{P_K} \cdot \pi_{C_B} \cdot \pi_{R_{ПО}} \cdot \pi_{\mu} \cdot \pi_{\tau}}, \quad i = \overline{1, k}, \quad \text{при } k = 16 \quad (8)$$

$$\prod_{i=1}^k \pi_{i_{ВТО}} = 0,39.$$

Формирование обобщённого критериального выражения для интенсивности I выполняется путём использования обобщённого критерия подобия функционирования системы, а затем решения полученного равенства относительно I .

Полученная обобщённая критериальная зависимость интенсивности влажно-тепловой обработки имеет вид:

$$I_{ВТО} = \frac{d \cdot m \cdot V_{М.К} \cdot t_{К} \cdot C_{К}^{3,5} \cdot \rho \cdot C_{ПО} \cdot Q_{Т} \cdot D \cdot \Phi_{П.С} \cdot Q_{П}}{t_{Н}^{0,5} \cdot P_{К} \cdot C_{В} \cdot R_{ПО} \cdot V_{К}^{1,33} \cdot P_{Н}^4 \cdot \mu \cdot \tau} \cdot 0,39. \quad (9)$$

На основе обобщённой критериальной зависимости интенсивности влажно-тепловой обработки (9) были получены следующие графики (рис. 3), свидетельствующие об увеличении интенсивности в 2,8 раза при подаче пара, образованного внутри камеры.

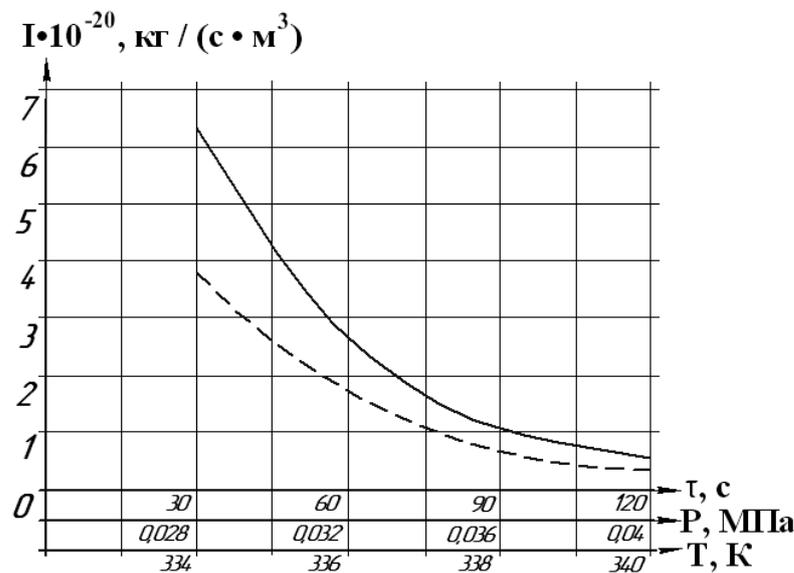


Рис. 3 - Зависимости интенсивности влажно-тепловой обработки от способа подачи пара, времени, температуры и давления:

- при образовании пара внутри камеры;
- - - при образовании пара вне камеры

Реализация метода ПФТС позволила количественно описывать процессы вакуумно-капиллярной гигротермической обработки зерна и управлять ими, внося тем самым вклад в переход сельскохозяйственной отрасли России к шестому технологическому укладу.

Выводы:

1. Аналитический обзор особенностей гигротермических воздействий на капиллярную структуру зерновых культур установил возможности использования вакуума при проведении ряда технологических операций в сельскохозяйственном производстве.

2. Рассмотрены способы обработки зерновых культур с использованием вакуума с позиций нанотехнологий, обеспечивающие производительность и качество обработки.

3. Рассчитаны с применением метода ПФТС режимы гигротермических операций с предварительным вакуумированием зерна в зависимости от параметров среды и строения капиллярно-пористых оболочек зерна.

Литература

1. Нанотехнологии как ключевой фактор нового технологического уклада в экономике / Под ред. академика РАН С.Ю. Глазьева и профессора В.В. Харитонова. – М.: «Травант» 2009. 304 с.

2. Анисимова Л.В., Солтан О.И. Гидротермическая обработка зерна овса с увлажнением под вакуумом// Технология обработки, хранения и переработки злаковых, 2019, №10.
URL: researchgate.net/publication/336262795_Gidrotermiceskaa_obrabotka_zerna_ovsa_s_uvlazneniem_pod_vakuumom.

3. Московский М.Н., Гуляев А.А., Сидоров В.Н. Математическая оценка на основе метода Лотки-Вольтерры количественных показателей переработки соломистого сырья при комбайновой уборки зерновых//Инженерный вестник Дона, 2019, №8.
URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N8y2019/6152.

4. Першин, В.А. Основы подобия функционирования системы «Техника-технология-продукция». – Новочеркасск: ЮРГТУ, 1996. – 120 с.

5. Gangopadhyay N, Hossain M, Rai D, Brunton N. A Review of Extraction and Analysis of Bioactives in Oat and Barley and Scope for Use of Novel Food Processing Technologies// *Molecules*. 2015. № 20. P. 10884–10909.

6. Анисимова Л.В., Серебrenикова Е.С., Каптюхина А.А., Зенина Д.Ю. Исследование влияния параметров сушки при гидротермической обработке зерна сорго на эффективность его шелушения // *Материалы XIV Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, посвященной 90-летию юбилею академика Саковича Г.В. Бийск, 2021* URL: elibrary.ru/item.asp?id=46462818.

7. Ильичев Г.Н., Овчаренко А.В. Патент RU 2399416, МПК6 В02В 1/08 Способ гидротермобарометрической обработки и шелушения зерна овса/ - № 2008142964/13, заявлено 29.10.2008 опубл. 20.09.2010 Бюл. № 26. Сс. 2-6

8. Савенков Д.Н., Щербаков А.А., Мехралиев Р.Э., Сердюк В.А. Инфракрасная сушка с применением конвекционно-вакуумной технологии для высушивания продуктов растительного происхождения // *Инженерный вестник Дона*, 2021, №11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2021/7282.

9. Ларина Л.В., Смирнов В.В., Терехов А.В., Плотникова Н.В., Горяинов М.Ф. Устройство для шелушения зерна овса с нижней крышкой поршнем Патент на полезную модель № 199654 Российская Федерация, МПК В02В 3/12 (2020.02): № 2019145752/10 заявл. 31.12.2019: опубл. 11.09.2020, Бюл. № 26. Сс. 2-4

10. Hartmann U. *Faszination Nanotechnologie*. Elsevier GmbH, Munchen, 2006. 88 с.

References

1. Nanotehnologii kak kljuchevoj faktor novogo tehnologicheskogo uklada v jekonomike [Nanotechnology as a key factor in the new technological order in the

economy]. Pod red. akademika RAN S.Ju. Glaz'eva i professora V.V. Haritonova. M.: «Travant» 2009. 304 p.

2. Anisimova L.V., Soltan O.I. Tehnologija obrabotki, hranenija i prererabotki zlakovyh, 2019, №10

URL:researchgate.net/publication/336262795_Gidrotermiceskaa_obrabotka_zerna_ovsa_s_uvlazneniem_pod_vakuumom.

3. Moskovskij M.N., Guljaev A.A., Sidorov V.N. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, №8. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/N8y2019/6152.

4. Pershin, V.A. Osnovy podobija funkcionirovanija sistemy «Tehnika-tehnologija-produkcija» [Basics of the similarity of the functioning of the system "Technology-technology-products"]. Novocherkassk: JuRGU, 1996. 120 p.

5. Gangopadhyay N, Hossain M, Rai D, Brunton N. Molecules. 2015. № 20. pp. 10884–10909.

6. Anisimova L.V., Serebrenikova E.S., Kaptjuhina A.A., Zenina D.Ju. Materialy XIV Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh s mezhdunarodnym uchastiem, posvjashhennoj 90-letnemu jubileju akademika Sakovicha G.V. Bijsk, 2021 URL:elibrary.ru/item.asp?id=46462818.

7. Il'ichev G.N., Ovcharenko A.V. Patent RU 2399416, MPK6 B02B 1/08 Sposob gidrotermobarometricheskoy obrabotki i shelushenija zerna ovsa № 2008142964/13, zajavleno 29.10.2008 opubl. 20.09.2010 Bjul. № 26. pp. 2-6.

8. Savenkov D.N., Shherbakov A.A., Mehraliev R.Je., Serdjuk V.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, №11. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2021/7282.

9. Larina L.V., Smirnov V.V., Terehov A.V., Plotnikova N.V., Gorjainov M.F. Ustrojstvo dlja shelushenija zerna ovsa c nizhnej kryshkoj porshnem Patent na poleznuju model' № 199654 Rossijskaja Federacija, MPK B02B 3/12



(2020.02): № 2019145752/10 заявл. 31.12.2019: opubl. 11.09.2020, Вjul. № 26.
pp. 2-4.

10. Hartmann U. Faszination Nanotechnologie. Elsevier GmbH, Munchen,
2006. 88 p.