

УДК 631.362.23

ИССЛЕДОВАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СУШКИ СЕМЯН ПОДСОЛНЕЧНИКА ВЫСШИХ РЕПРОДУКЦИЙ

Дидур В.А., д.т.н.,

Ткаченко А.В., к.т.н.

Таврический государственный агротехнологический университет

Тел. (0619) 44-02-74

Аннотация – работа посвящена экспериментальной проверке и численным опытам математической модели процесса сушения семян подсолнуха высших репродукций в толстом неподвижном слое, в частности контейнерной сушилки. Математическая модель базируется на новом представлении физической модели как многослойное строение семянки с воздушным каналом в ее оболочке.

Ключевые слова – математическая модель, предельные условия, численные исследования, семена подсолнуха, сушения, многослойное здание, неподвижный слой.

Постановка проблемы. Для сушки малых партий семян подсолнечника высших репродукций целесообразно использовать сушилку контейнерного типа. Более простым способом сушки семян в контейнере является сушка в толстом неподвижном слое. Такой способ сушки широко применяется в сельскохозяйственном производстве. Однако технологические режимы сушки в толстом слое, применяемые для товарного подсолнечника, не могут быть использованы для сушки семян высших репродукций.

Для обоснования рациональных режимов сушки семян подсолнечника высших репродукций необходима новая математическая модель сушки. Такая модель должна учитывать большие различия термодинамических и теплофизических свойств оболочки и ядра семянки и изменения термодинамических характеристик агента сушки при прохождении сквозь слой семян и изменения технологических свойств самих семян в процессе сушки. Рациональные режимы сушки можно определить в результате численных исследований усовершенствованной модели процесса сушки.

Анализ последних исследований. При моделировании физическую модель семянки подсолнечника обычно рассматривают как од-

нородный шар с эквивалентным диаметром и однородными тепло- и влажопроводными свойствами. На самом деле семянка состоит из двух резко отличающихся по технологическим свойствам частей оболочки и ядра, разделённых между собой воздушной прослойкой.

Процесс внутреннего и внешнего тепло- и влажопереноса разработан на базе решения систем уравнений с частными производными [1]. Разработанная теория предназначена в основном для сушки материалов в среде, что находится неподвижно и имеет постоянные термодинамические и теплофизические параметры. Для использования в расчётах реальных процессов сушки и сушильных устройств математические модели, разработанные А.В.Лыковым должны быть уточнены. Существующая теория, которая рассматривает тепло- и влажоперенос в системе сплошной шар в сферической оболочке решается при условии полного контакта между поверхностями обоих тел [1]. Кроме того при решении системы уравнений принимаются ряд условий, которые не позволяют использовать решения для рассматриваемой задачи.

Формулирование целей статьи. Целью данной работы является обоснование технологических режимов сушки семян подсолнечника высших репродукций в толстом неподвижном слое контейнерной сушилки.

Основная часть. В качестве предмета исследований взята разработанная нами математическая модель сушки семян подсолнечника, которая учитывает резко различающиеся термодинамические и теплофизические свойства оболочки и ядра семянки, изменение термодинамических характеристик агента сушки и конденсацию влаги при прохождении через слой семян [2]. Здесь в качестве расчётной схемы была принята абстрактная трёхслойная модель семянки с воздушным каналом представлена на рис. 1.

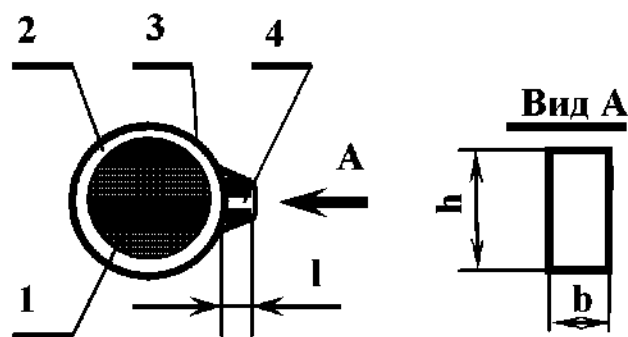


Рисунок 1 – Абстрактная модель семянки подсолнечника:

1 – ядро, 2 – воздухоносная полость; 3 – оболочка;
4 – воздушный канал

В основу пропонованої математическої моделі сушки насіння підсонячника положена система диференціальних взаємозв'язаних рівнянь переносу маси і енергії, розроблена А.В.Лыковым на основі термодинаміки необоротних процесів [1]. Математическі моделі процесу тепло і вологопереносу для оболочкі і ядра насіння представлені в безрозмірному вигляді при граничних умовах третього роду, при постійних і параболических початкових умовах. Оболочка насіння завдяки її малій товщині розглядається як неограничена пластина, а ядро насіння як сфера з еквівалентним діаметром. В якості потенціалу вологопереносу прийнято єдиний потенціал переносу вологи.

При розв'язанні задачі прийнято наступні допущення:

$$P = \text{const.}$$

Для тонкого шару насіння висотою Δh за час $\Delta \tau$

$$u = \text{const}; t = \text{const}; a_q = \text{const}; a_m = \text{const};$$

$$\lambda_q = \text{const}; \lambda_m = \text{const}; \delta_m = \text{const};$$

$$c_q = \text{const}; c_m = \text{const}; \alpha_q = \text{const}; \alpha_m = \text{const};$$

$$x_f = \text{const}; t_f = \text{const}; \lambda_f = \text{const};$$

$$[j_q(\tau)]_n = \alpha_q [t_f(\tau) - t_n(\tau)]; [j_m(\tau)]_n = \alpha_m (p_n - p_f);$$

де:

P – барометрическе тиск, н/м², Па;

u – вологосодержання матеріалу кг/кг;

t – температура матеріалу, °С;

a_q, a_m – коефіцієнти відповідно температуропроводності і потенціалопроводності, м²/с;

λ_q, λ_m – коефіцієнти відповідно теплопроводності, Вт/(м·К) і вологопроводності, кг/(м·с·ед.потенціала);

δ – термоградиентний коефіцієнт, 1/град;

c_q, c_m – відповідно удельна теплоємність, Дж/(кг·°С) і удельна ізотерміческа вологоємність, кг/(кг·°М);

α_q, α_m – коефіцієнти відповідно теплоотдачі, Вт/(м²·К) і масоотдачі, м/с;

x_f, t_f, λ_f – відповідно вологосодержання, кг/кг, температура °С і коефіцієнт теплопроводності, Вт/(м·К) агента сушки;

t_n, p_n – відповідно температура поверхності тіла і парціальне тиск пари у поверхності тіла;

j_q – кількість підведеного тепла к поверхності насіння;

j_m – кількість випаровуваної вологи з поверхності насіння.

Система уравнений тепломассопереноса [по А.В. Лыкову],

$$\frac{\partial T(X, Fo)}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 T(X, Fo)}{\partial X^2} + \frac{\Gamma}{X} \frac{\partial T(X, Fo)}{\partial X} - Ko^* \frac{\partial \theta(X, Fo)}{\partial Fo};$$

$$\frac{\partial \theta(X, Fo)}{\partial Fo} = Lu \left[\frac{\partial^2 \theta(X, Fo)}{\partial X^2} + \frac{\Gamma}{X} \frac{\partial \theta(X, Fo)}{\partial X} \right] - Lu Pn \left[\frac{\partial^2 T(X, Fo)}{\partial X^2} + \frac{\Gamma}{X} \frac{\partial T(X, Fo)}{\partial X} \right];$$

Безразмерные граничные условия третьего рода:

$$\frac{\partial T(1, Fo)}{\partial X} - Bi_q [1 - T(1, Fo)] + (1 - \varepsilon) Ko Lu Ki_m = 0;$$

$$\frac{\partial \theta(1, Fo)}{\partial X} + Pn \frac{\partial T(1, Fo)}{\partial X} + Ki_m = 0.$$

Постоянные начальные условия:

$$T(X, 0) = \theta(X, 0) = 0;$$

$$T = \frac{t - t_o}{t_s - t_o}; \quad \theta = \frac{\theta_o - \theta}{\theta_o - \theta_p}.$$

Параболические начальные условия:

$$T(X, 0) = -(1 - X^2) W_1; \quad \theta(X, 0) = -(1 - X^2) V_1;$$

$$W_1 = \frac{t - t_n}{t_o - t_n}; \quad V_1 = \frac{\theta_n - \theta}{\theta_n - \theta_p}.$$

где

Γ – постоянная формы: для неограниченной плоскости $\Gamma=0$; для шара $\Gamma=2$;
Индексы p, r – соответственно параметры поверхности, равновесного значения;

$X = \xi/R$ – безразмерная координата (ξ – текущая координата, R – характерный размер, равный для неограниченной пластины половине её толщины, а для шара – радиусу);

Fo – теплообменный критерий Фурье;

Ko^* – модифицированный критерий Коссовича $Ko^* = \varepsilon Ko$;

Ko – критерий Коссовича;

Lu – критерий Лыкова;

Pn – критерий Поснова для переноса влаги массопроводностью;

Bi_q – теплообменный критерий Био;

Ki_m – массообменный критерий Кирпичёва;

ε – критерий фазового перехода;

T, θ – соответственно безразмерные потенциалы тепло- и влагопереноса;

Для создания замкнутой системы уравнений проведены экспериментальные исследования, которые позволили определить теплофизические и термодинамические зависимости оболочки и ядра семянки (табл. 1).

Таблиця 1 – Уравнения регрессии термо- и влагопроводных характеристик оболочки (О) и ядра (Я) семянки подсолнечника

О, Я	Уравнения регрессии
О	$\lambda_q = (0,807\Pi^3 - 1,1772\Pi^2 + 0,5691\Pi + 0,0569)u + 0,4471e^{-2,0827\Pi}$
Я	$\lambda_q = -0,5418\Pi + 0,2175$; $\lambda_q = 0,2026u + 0,1701$; $\lambda_q = -0,0017M + 0,2713$
О	$\rho = -0,2272u^2 + 0,5811u + 0,4338$
Я	$\rho = 2,8388u^3 - 2,8873u^2 + 0,94u + 0,8625$
О	$\alpha_q = -0,0006u^3 + 0,0013u^2 - 0,0014u + 0,0004$
Я	$\alpha_q = 0,0003u^3 + 0,0003u^2 - 0,0001u + 0,0001$
О	$u = 0,0002\varphi^3 - 0,091\varphi^2 + 0,2479\varphi + 0,0068$
Я	$u = 0,0807\varphi^3 - 0,1461\varphi^2 + 0,1485\varphi - 0,0051$
О	$\theta = 2 \cdot 10^7 u^5 - 8 \cdot 10^6 u^4 + 993630u^3 - 53951u^2 + 1271,5u - 0,1917$
Я	$\theta = 1 \cdot 10^8 u^5 - 2 \cdot 10^7 u^4 + 1 \cdot 10^6 u^3 - 36283u^2 + 867,62u - 0,0195$
О	$c_m = -64,324u^4 + 25,414u^3 - 3,6598u^2 + 0,2164u + 4 \cdot 10^{-6}$
Я	$c_m = -231,84u^4 + 52,528u^3 - 4,66772u^2 + 0,1725u + 1 \cdot 10^{-5}$
О	$a_m = 0,011u^3 - 0,0005u^2 + 0,0003u - 3 \cdot 10^{-6}$
Я	$a_m = -0,0196u^3 + 0,0052u^2 + 0,0002u + 3 \cdot 10^{-6}$
О	$\delta_m = 31,939u^4 - 67,374u^3 + 42,003u^2 - 6,6245u + 0,5836$
Я	$\delta_m = -85,572u^4 + 129,9u^3 - 72,624u^2 + 17,743u - 1,5247$

где

ρ – плотность, кг/м³;

$\ddot{I}, \dot{I}, \varphi$ – соответственно пористость оболочки, масличность ядра, относительная влажность воздуха, доли единицы.

Влагосодержание и температура агента сушки определялись соответственно из материального и теплового баланса. Баланс составлялся с учётом свойств оболочки и ядра. При определении температуры агента сушки в гигроскопической области учитывалось тепло, затрачиваемое на удаление связанной влаги. Определение влагосодержания, температуры и максимального влагосодержания агента сушки позволило учитывать конденсацию влаги в элементарных слоях в процессе прохождения агента сушки через толстый неподвижный слой.

Для проверки адекватности математической модели сушки семян подсолнечника в толстом неподвижном слое была создана экспериментальная установка, разработана специальная методика исследований и аппаратная схема замеров параметров кинетики сушки.

Проверка адекватности математической модели. Исследования процесса сушки проводились на семенах гибрида подсолнечника Запорожский-9 массой 1000 зёрен 59,6 г, масличностью 50,9 % с исходной влажностью семян относительно сухого вещества 17,51 %. Температура окружающего воздуха колебалась от 18 до 27° С, относительная влажность составляла 78 %, барометрическое давление 770 мм рт. ст.

Начальная температура семян 20° С, температура агента сушки на входе в контейнер изменялась в пределах 45-50° С, средняя скорость агента сушки в контейнере без учёта семян составляла 0,3 м/с.

Результаты проведенного опыта позволили построить экспериментальную кривую сушки и сравнить с ней теоретическую кривую, полученную численным исследованием описанной математической модели (рис.4). Относительная ошибка численных исследований при описании кривой сушки не превышает 16,8 %. На рис.5 построены экспериментальные и теоретические температурные кривые ядра в четвёртом элементарном слое. Относительная ошибка численных исследований температурных кривых –15 %.

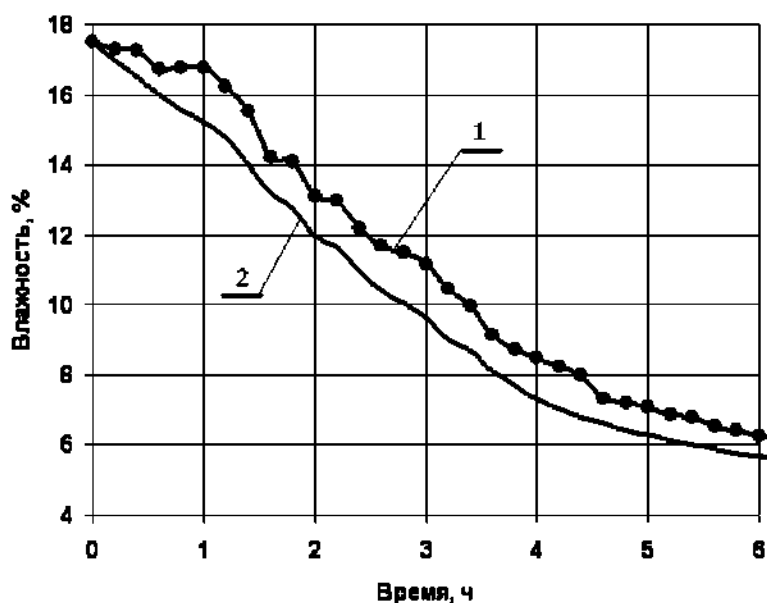


Рисунок 4 – Кинетика сушки семян подсолнечника в толстом слое:
1 – экспериментальная; 2 – расчетная.

При экспериментальном исследовании неравномерности температурного поля в сушильном контейнере проводились две серии опытов. Цель первой серии опытов – исследование неравномерности температурного поля по горизонтальному сечению сушильного контейнера. Для этой серии опытов датчики температуры устанавливались в двух слоях: на высоте 320 мм и 640 мм от уровня решета контейнера. В каждом слое по 5 датчиков: четыре в углах четырехугольника со

стороной 800 мм, и один в центре, на пересечении диагоналей. Высота слоя семян подсолнечника в контейнере равна 960 мм. Размеры горизонтального сечения контейнера – 1300×1300 мм.

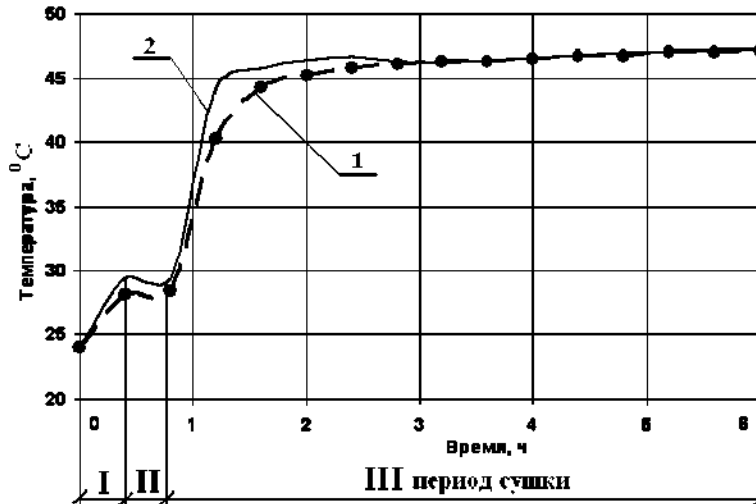


Рисунок 5 – Динамика температуры ядра в элементарном слое:
1 – экспериментальная; 2 – расчётная.

Результаты исследований неравномерности температурного поля в сушильном контейнере по горизонтальным сечениям контейнера представлены на рис.6. Верхняя кривая показывает изменение температуры теплоносителя на входе в сушильный контейнер. Нижняя кривая показывает температуру окружающего воздуха. Первый пучок температурных кривых, возрастающих через час после начала сушки семян, даёт разброс температурного поля по сечению контейнера на высоте 300 мм. Второй пучок температурных кривых, возрастающих через два с половиной часа после начала сушки, даёт разброс температуры семян на высоте 650 мм.

Неоднородность температурного поля в горизонтальном сечении контейнера обусловлена неоднородностью потока теплоносителя внутри насыпного слоя. Эта неоднородность вызвана условиями подвода теплоносителя (внешняя макронеоднородность) и неоднородностью укладки семян в слое (внутренняя макронеоднородность). Не следует исключать и влияние неоднородности на уровне одной семянки (микронеоднородность). Указанная неоднородность потока теплоносителя и, соответственно, температурного поля влияет на эффективность сушки, а при высоких температурах может вызвать локальный перегрев семян.

Цель второй серии опытов – исследование неравномерности температурного поля по высоте контейнера. Результаты экспериментальных исследований (кривые с экспериментальными точками) температурного поля по высоте сушильного контейнера представлены на

рис.7. На этом же графике представлены температурные кривые, полученные методом численных исследований (кривые в виде пунктирных линий без экспериментальных точек). Относительная ошибка численных исследований неравномерности температурного поля по высоте слоя семян в контейнерной сушилке по сравнению с экспериментальными данными не превышает 15 %.

В процессе сушки записывалась разность температур между центром семянки и её оболочкой. Величина разности на протяжении сушки не превышала $0,5^{\circ}\text{C}$.

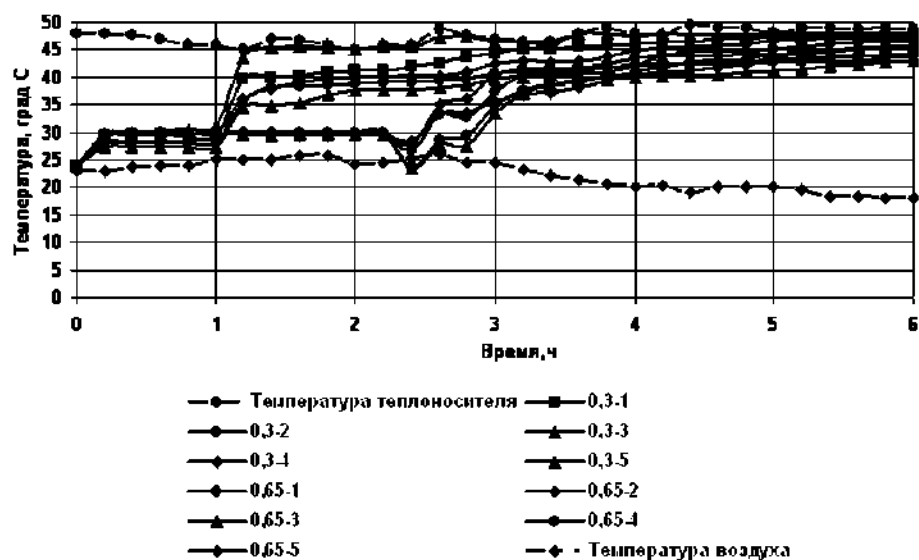


Рисунок 6 – Экспериментальные температурные кривые ядра в двух горизонтальных сечениях сушильного контейнера (на высоте 0.3 м и 0.6 м)

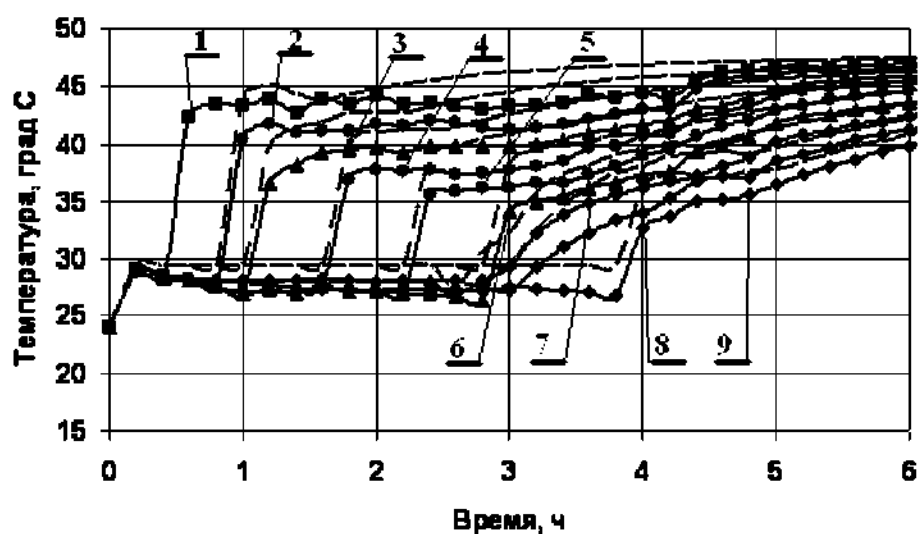


Рисунок 7 – Экспериментальные (сплошные) и расчётные (пунктирные) температурные кривые ядра по высоте неподвижного слоя семян: 1 – 50 мм; 2 – 150 мм; 3 – 250 мм; 4 – 350 мм; 5 – 450 мм; 6 – 550 мм; 7 – 650 мм; 8 – 750 мм; 9 – 850 мм

Таким образом, по результатам сравнения экспериментальных и теоретических данных кривых сушки семян подсолнечника в толстом неподвижном слое и температурных кривых ядра семечки по высоте слоя, можно сделать вывод об адекватности полученной модели процесса сушки действительному процессу в толстом неподвижном слое. Это позволяет проводить численные исследования процесса сушки [3].

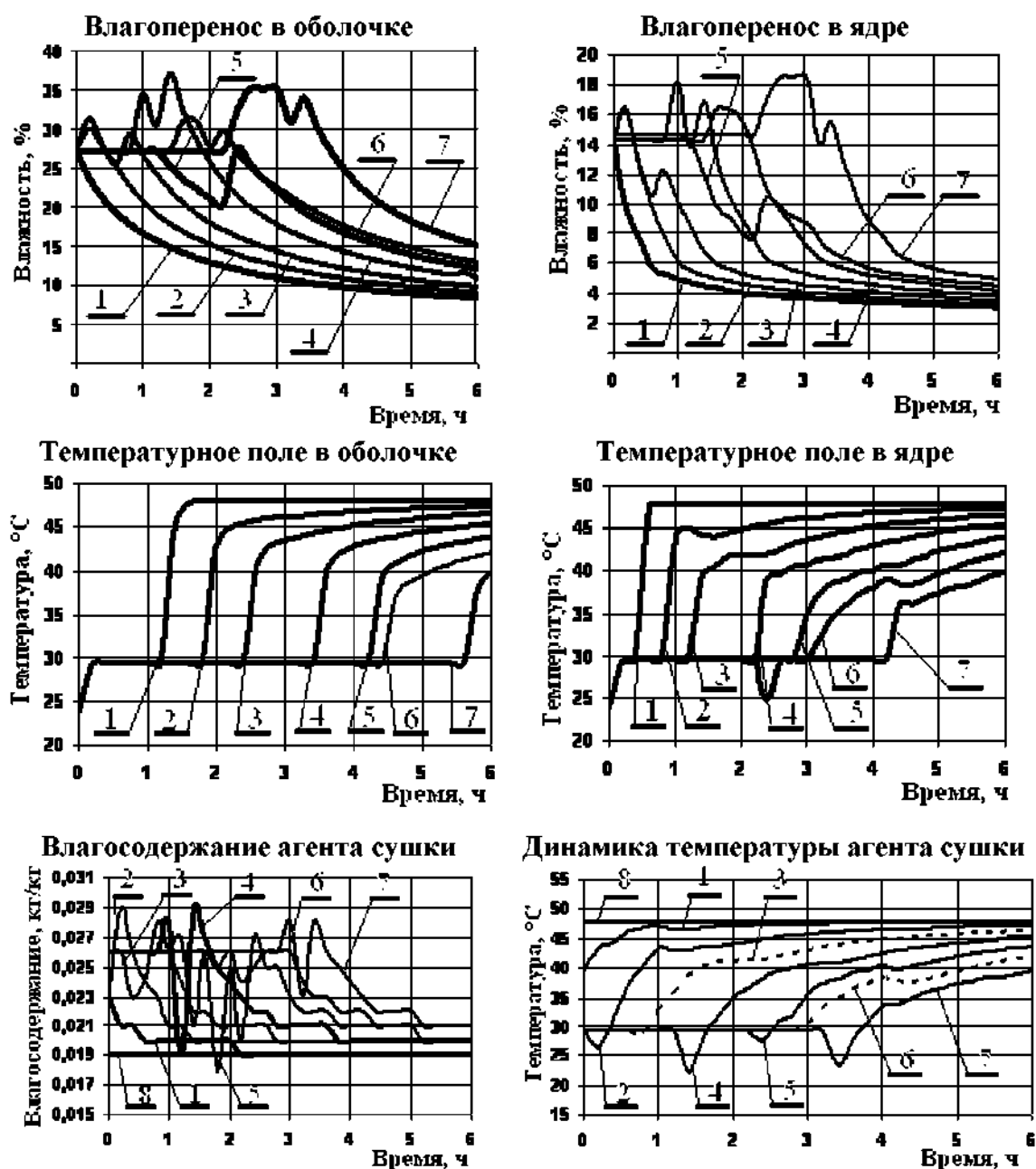


Рисунок 8 – Результаты численных исследований динамики сушки семян подсолнечника высших репродукций в неподвижном слое при начальной влажности 17,5 % и скорости фильтрации агента сушки 0,3 м/с; высота насыпи семян 1 м, высота элементарного слоя 0,05 м:

1 – 1-й слой; 2 – 4-й; 3 – 7-й; 4 – 10-й; 5 – 13-й; 6 – 16-й;

7 – 19-й слой; 8 – вход в 1-й слой

Обоснование рациональных режимов процесса сушки. Первая серия численных исследований проводилась при исходных данных, близких к экспериментальным применительно к контейнерной сушилке. Температура агента сушки на входе принималась равной 48°C , скорость фильтрации агента сушки – $0,3\text{ м/с}$. Начальная влажность W_c оболочки семянки – $27,28\%$, ядра – $14,36\%$, семян $17,51\%$. Толщина слоя семян в контейнере высотой 1 м разбивалась на элементарные слои высотой $0,05\text{ м}$ каждый. Для анализа результатов численных исследований пронумеруем условно принятые слои: самый нижний – первый, самый верхний – двадцатый. Элементарный отрезок времени – 12 мин . Сушка производилась в течение 6 ч .

В первые 12 мин интенсивность сушки выше в первом нижнем слое: влагосодержание оболочки снижается с $27,28\%$ до $23,79\%$ (рис.8), влагосодержание ядра снижается с $14,36\%$ до $9,94\%$. В последующих двух элементарных слоях интенсивность сушки снижается: во втором слое оболочки – до $24,5\%$, ядра – до $10,67\%$, в третьем слое: оболочки – до $25,18\%$, ядра – до $11,48\%$. В это же время параметры агента сушки в этих слоях изменяются следующим образом. Влагосодержание на выходе первого слоя от $0,0194$ повышается до $0,023$, второго слоя – до $0,026$, третьего слоя – до $0,0283$. Температура агента сушки соответственно понижается: при выходе из первого слоя от 48°C до $39,58^{\circ}\text{C}$, при выходе из второго слоя – до $32,7^{\circ}\text{C}$, третьего слоя до $27,42^{\circ}\text{C}$. Это ниже температуры мокрого термометра. Поэтому в четвёртом слое пар конденсируется. Влажность оболочки возрастает с $25,28\%$ до $31,46\%$, влажность ядра возрастает с $14,36\%$ до $16,56\%$, влагосодержание агента сушки снижается от $0,0283$ до $0,0233$. При конденсации влаги выделяется тепло: температура агента сушки на выходе из четвёртого слоя повышается с $27,42^{\circ}\text{C}$ до $29,5^{\circ}\text{C}$. Температура оболочки и ядра не повышается, поскольку она равна температуре мокрого термометра, а сушка проходит во влажной области. При повышении влажности материала, за счёт увеличения её разности с влажностью равновесной, повышается интенсивность сушки. Влажность оболочки в следующие 12 минут снижается с $31,4$ до $28,05\%$, влажность ядра – с $16,5$ до $12,45\%$. Расход тепла на испарения влаги оболочки и ядра семянки вызывает снижение температуры агента сушки с $34,08$ до $26,34\%$ и повышение его влагосодержания с $0,0254$ до $0,0287$.

На рис.9 показано образование и продвижение характерных зон сушки в толстом неподвижном слое семян подсолнечника с исходным влагосодержанием семян $u = 0,2$ (влажностью $16,7\%$) при температуре агента сушки 45°C и скоростях фильтрации его от $0,1$ до $0,4\text{ м/с}$.

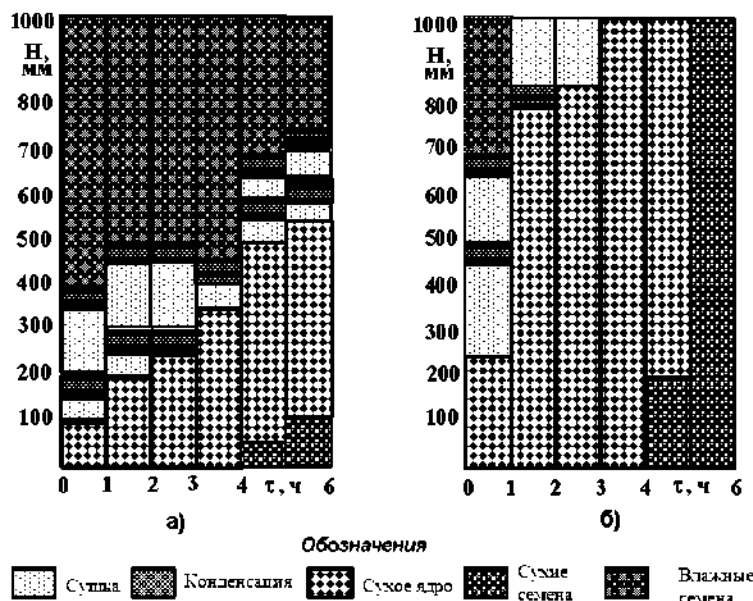


Рисунок 9 – Образование и продвижение характерных зон сушки в толстом неподвижном слое семян при исходном влагосодержании $u=0,2$ кг/кг: а – при скорости фильтрации агента сушки $0,1$ м/с; б – при скорости фильтрации агента сушки $0,4$ м/с

При скорости фильтрации агента сушки $0,1$ м/с через 1 час высота зоны сушки повторялась дважды по 150 мм, в том числе высота зоны сухого ядра – 100 мм в первой зоне. Зона конденсации по высоте слоя также повторилась дважды. С течением времени высоты зоны сушки и зоны сухого ядра медленно возрастали. Две зоны конденсации влаги по высоте насыпи на протяжении 6 часов перемещались по высоте, но не исчезали. Через 6 часов сушки высота зоны сухих семян составила 100 мм, сухого ядра – 450 мм, зоны влажных семян – 750 мм.

При скорости фильтрации $0,4$ м/с интенсивность сушки резко возрастает. Так, высота зоны сухого ядра через час составляет 200 мм, через 2 часа – 800 мм. Через 4 часа зона сухого ядра распространилась по всей высоте насыпи, происходила сушка оболочки семян. Через 5 часов зона сухих семян составила 220 мм, а через 6 часов – всю высоту насыпи.

Проведены численные исследования кинетики сушки семян подсолнечника высших репродукций в неподвижном слое высотой 1 м при исходном влагосодержании семян $u_c - 0,12$ и $0,15$; скоростях v фильтрации агента сушки $0,1$ м/с; $0,2$ м/с; $0,3$ м/с; $0,4$ м/с; при $u_c - 0,2$ и $v - 0,2$ м/с; $0,3$ м/с; $0,4$ м/с; $0,5$ м/с; при $u_c - 0,25$ и $0,3$ и $v - 0,4$ м/с; $0,5$ м/с; $0,6$ м/с; $0,7$ м/с; $0,8$ м/с; $0,9$ м/с. Проведены численные исследования кинетики сушки при высоте неподвижного слоя 2 м с разбивкой на элементарные слои $0,05$ м при скорости фильтрации $0,7$ м/с и исходном влагосодержании семян $0,12$; $0,15$; $0,2$; $0,25$. Анализ прове-

денных численных исследований при различной исходной влажности и разных режимах фильтрации агента сушки позволил установить рациональные режимы сушки и высоту неподвижного слоя семян. Кинетика сушки семян подсолнечника при высоте неподвижного слоя 1 м и рациональных режимах представлены на рис. 10.

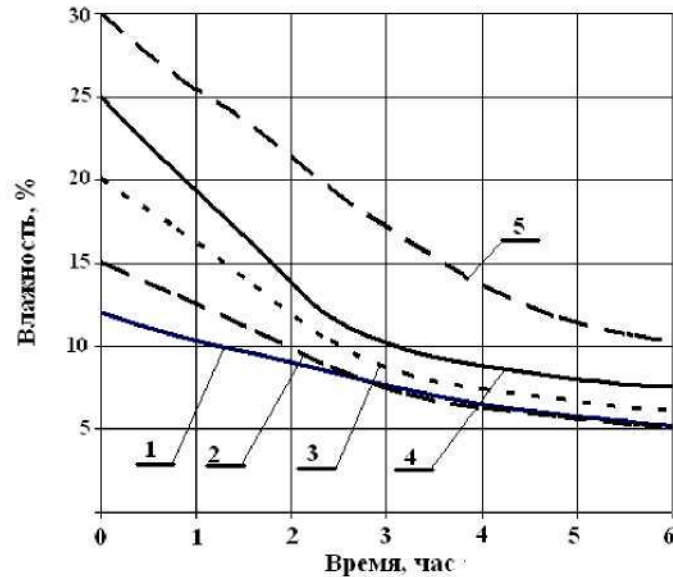


Рисунок 10 – Кинетика сушки семян подсолнечника в толстом неподвижном слое при рациональных режимах:

1 – $u_c = 0,12$, $v = 0,2$ м/с; 2 – $u_c = 0,15$, $v = 0,3$ м/с; 3 – $u_c = 0,2$, $v = 0,3$ м/с; 4 – $u_c = 0,25$, $v = 0,6$ м/с; 5 – $u_c = 0,3$, $v = 0,7$ м/с

Из представленных кривых кинетики сушки видно, что при высоте неподвижного слоя 1 м, температуре агента сушки $46 - 48^\circ\text{C}$ времени сушки 6 ч влажность семян достигнет кондиционного значения при исходном влагосодержании $u_c = 0,12$ и скорости фильтрации агента сушки $v = 0,2$ м/с, при $u_c = 0,15 \div 0,2$ и $v = 0,3$ м/с. Однако при $u_c = 0,25$ и $v = 0,6$ м/с; при $u_c = 0,3$ и $v = 0,7$ м/с время сушки значительно увеличивается и по расчётным данным достигает 24 часов. Однако в нашей зоне при обычных условиях уборки исходное влагосодержание семян подсолнечника не превышает величины 0,2.

Таким образом, численные исследования математической модели позволили обосновать следующие рациональные технологические режимы сушки семян подсолнечника высших репродукций:

- температура агента сушки – $46 - 48^\circ\text{C}$;
- при исходном влагосодержании семян $u_c = 0,12$ скорость фильтрации агента сушки $v = 0,2$ м/с, при $u_c = 0,15 \div 0,2$ $v = 0,3$ м/с, при $u_c = 0,25$ $v = 0,6$ м/с, при $u_c = 0,3$ $v = 0,7$ м/с.

Сравнительные производственные испытания контейнерной и шахтной сушилок. Установленные на основе численных исследований математических моделей рациональные режимы сушки семян подсолнечника высших репродукций были проверены в производственных условиях на созданной контейнерной сушилке в семеноводческом хозяйстве «Солнечное» Института масличных культур УААН. Сравнительные испытания шахтной и контейнерной сушилок при сушке гибрида Запорожский - 28 показали, что энергия прорастания и лабораторная всхожесть у семян после сушки в контейнерной сушилке значительно выше, чем в шахтной сушилке [4] (табл.2).

Таблица 2 – Сравнительные испытания шахтной и контейнерной сушилок

Исходная влажность, %	Агент сушки		Время сушки, ч	Энергия прорастания, %	Лабораторная всхожесть, %
	температура, °С	скорость, м/с			
Шахтная сушилка СЗШ-16А					
12.5	60	0.6	1.4	82	88
13.4	80	0.6	1.0	80	85
Контейнерная сушилка					
12.7	45	0.3	6,0	96	94
14.1	48	0.3	6.3	94	91

При испытании контейнерной сушилки были использованы режимы сушки, полученные расчётным путём и подтверждено правильность выбора этих режимов. Сушка семян родительских форм гибридов подсолнечника в толстом неподвижном слое сушильного контейнера обеспечивает энергию прорастания до 92-98 %, лабораторную всхожесть – до 90-98 %.. Применение контейнерной сушилки позволяет повысить урожайность родительских форм и гибридов первого поколения семян подсолнечника на 8-10 % и исключить смешивание разных видов, сортов, гибридов и партий семян.

Выводы. На основании анализа предлагаемых численных исследований математических моделей сушки семян подсолнечника высших репродукций можно сделать следующие выводы:

1. Аналитически и экспериментально определены закономерности изменения теплофизических, термодинамических характеристик оболочки и ядра семянки подсолнечника в зависимости от их технологических свойств и параметров агента сушки. Это позволило подтвердить факт резкого отличия определяемых характеристик, а следовательно невозможности применения абстрактной модели семянки в виде сплошного шара.

2. Разработана математическая модель процесса сушки, которая включает ранее не учитываемые факторы, изменяющиеся во времени (физико-механические, морфологические, теплофизические и термодинамические свойства семян подсолнечника и их отдельных элементов). Исследования этой модели позволили определить динамику тепло- влагопереноса, термодинамических характеристик агента сушки и установить место и время конденсации водяного пара по слоям. Массу конденсируемого пара можно уменьшить, управляя скоростью фильтрации агента сушки. В частности, установлено, что при исходной влажности семян 16 – 17 % и повышении скорости фильтрации агента сушки с 0.1 м/с до 0.4 м/с высота зоны сушки уже в первый час увеличивается в 2.5 раза, а конденсация водяного пара через 2 часа прекращается.

3. Численные исследования математической модели позволили обосновать рациональные технологические режимы сушки семян подсолнечника высших репродукций:

- температура агента сушки – 46 – 48° С;
- при исходном влагосодержании семян $u_c = 0,12$ скорость фильтрации агента сушки $v = 0,2$ м/с, при $u_c = 0,15 \div 0,2$ $v = 0,3$ м/с, при $u_c = 0,25$ $v = 0,6$ м/с, при $u_c = 0,3$ $v = 0,7$ м/с.

4. На базе усовершенствованных методов экспериментальных исследований и приборного обеспечения проведены исследования кинетики сушки и динамики температурного поля в неподвижном слое семян, которые подтвердили адекватность разработанных математических моделей. Расхождение результатов численных исследований по сравнению с экспериментальными данными кинетики сушки не превышает 16.8 %, а динамики температурного поля по высоте слоя семян в контейнерной сушилке – 15 %.

5. Производственной проверкой доказано, что практическая реализация контейнерной сушилки с предлагаемыми режимами позволили повысить:

- энергию прорастания до 92-98 %;
- лабораторную всхожесть до 90-98 %.

Литература

1. *Лыков В.А.* Теория тепло- и массопереноса /А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов. – Л.: Госэнергоиздат., 1963. – 535 с
2. *Дидур В.А.* Контейнерная технология послеуборочной обработки семян подсолнечника высших репродукций /В. А. Дидур, А.В. Ткаченко // Східноєвропейський журнал передових технологій. Математика і кібернетика – фундаментальні і прикладні аспекти. – 2007. – №3/6 – С. 62 – 72.

3. Дидур В.А. Обоснование технологических режимов сушки семян подсолнечника высших репродукций / В.А. Дидур, А.В. Ткаченко // Известия Международной академии аграрного образования. Информационные технологии в эксплуатации МТП АПК. – 2008. – Вып.7, том. 1. – С. 27 – 34.

4. Ткаченко А.В. Эффективность контейнерной сушилки для послеуборочной обработки семян высших репродукций / А.В. Ткаченко, В.А. Дидур // Праці ТДАТА – Мелітополь, 2006. – Вип.45. – С. 58 – 64.

ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СУШІННЯ НАСІНЬ СОНЯШНИКА ВИЩИХ РЕПРОДУКЦІЙ

Дідур В.А., Ткаченко А.В.

Анотація

Робота присвячена експериментальній перевірці й чисельним дослідом математичної моделі процесу сушіння насіння соняшника вищих репродукцій у товстому нерухливому шарі, зокрема контейнерної сушарки. Математична модель базується на новій уяві фізичної моделі як багатошарової будови сім'янки з повітряним каналом у її оболонки.

RESEARCHES OF MATHEMATICAL MODEL OF DRYING OF SEEDS OF SUNFLOWER OF THE HIGHER REPRODUCTIONS

V. Didur, A. Tkachenko

Summary

The work is devoted experimental check and numerical researches of mathematical model of process of drying of seeds of sunflower in a thick motionless layer, particularly container dryer. The mathematical model is based on new representation of physical model as a multilayered structure seeds with air channels in its cover.