

УДК 631.362.23

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ РЕПРОДУКТИВНЫХ СЕМЯН МАСЛИЧНЫХ КУЛЬТУР ПРИМЕНИТЕЛЬНО К КОНТЕЙНЕРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ**

Дидур В.А., д.т.н.

*Таврический государственный агротехнологический университет*

Тел. (0619) 44-02-74

E-mail: didurva@mail.ru

**Аннотация** – работа посвящена моделированию процесса сушки семян масличных культур высших репродукций применительно к контейнерной технологии. Математическая модель базируется на новом представлении физической модели как многослойного шара с воздушным каналом в его оболочке.

**Ключевые слова** – многослойный шар, теплофизические характеристики, тепломассоперенос, постоянные начальные условия, параболические начальные условия, безразмерные критерии тепломассопереноса, кинетика сушки, динамика температуры, агент сушки, скорость фильтрации агента сушки.

*Постановка проблемы.* Для сушки малых партий, что характерно для репродуктивных семян масличных культур перспективным направлением является использование контейнерной технологии для сушки, кондиционирования и хранения. Более простым способом сушки семян в контейнере является сушка в толстом неподвижном слое по сравнению с псевдосжиженным.

Однако технологические режимы сушки в толстом слое, применяемого для товарного зерна, 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 семечки 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 обычно рассматривают как однородный шар с эквивалентным диаметром и однородными тепло - и влагопроводными 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 влагопереноса 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 Лыковым должны быть уточнены. Существующая теория, которая рассматривает тепло - и влагообмен 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 масличных культур 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.

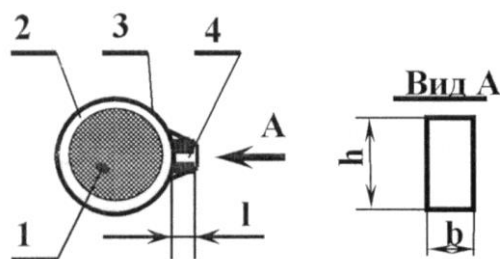


Рис. 1. Абстрактная модель семянки подсолнечника:

- 1 - ядро; 2 - воздухоносная полость; 3 - оболочка;
- 4 - воздушный канал

В основу предлагаемой математической модели сушки семян подсолнечника положена система дифференциальных взаимосвязан-

ных уравнений переноса массы и энергии, разработанная А.В.Лыковым на основе термодинамики необратимых процессов [1]. Математические модели процесса тепло и влагопереноса для оболочки и ядра семянки представлены в безразмерном виде при граничных условиях третьего рода, при постоянных и параболических начальных условиях. Оболочка семянки благодаря её малой толщине рассматривается как неограниченная пластина, а ядро семянки как шар с эквивалентным диаметром. В качестве потенциала влагопереноса принят единый потенциал переноса влаги.

При решении задачи приняты следующие допущения:  $P = \text{const}$ .  
Для тонкого слоя семян высотой  $\Delta h$  за время  $\Delta \tau$

$$u = \text{const}; t = \text{const}; a_q = \text{const}; a_m = \text{const}; \quad (1)$$

$$\lambda_q = \text{const}; \lambda_m = \text{const}; \delta_m = \text{const}; \quad (2)$$

$$c_q = \text{const}; c_m = \text{const}; \alpha_q = \text{const}; \alpha_m = \text{const}; \quad (3)$$

$$x_f = \text{const}; t_f = \text{const}; \lambda_f = \text{const}; \quad (4)$$

$$[j_q(\tau)]_n = \alpha_q [t_f(\tau) - t_n(\tau)]; [j_m(\tau)]_n = \alpha_m (p_n - p_f); \quad (5)$$

где:

$P$  - барометрическое давление, н/м<sup>2</sup>, Па;

$u$  - влагосодержание материала кг/кг;

$t$  - температура материала, °С;

$a_q, a_m$  - коэффициенты соответственно температуропроводности и потенциало-проводности, м<sup>2</sup>/с;

$\lambda_q, \lambda_m$  - коэффициенты соответственно теплопроводности, Вт/(м·К) и влагопроводности, кг/(м·с·ед. потенциала);

$\delta$  - термоградиентный коэффициент, 1/град;

$c_q, c_m$  - соответственно удельная теплоёмкость, Дж/(кг·°С) и удельная изотермическая влагоёмкость, кг/(кг·М);

$\alpha_q, \alpha_m$  - коэффициенты соответственно теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К) и массоотдачи, м/с ;

$x_f, t_f, \lambda_f$  - соответственно влагосодержание, кг/кг, температура °С и коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К) агента сушки;

$t_n, p_n$  - соответственно температура поверхности тела и парциальное давление пара у поверхности тела;

$j_q$  - количество подведенного тепла к поверхности семян;

$j_m$  - количество испаряемой влаги с поверхности семян.

Система уравнений тепломассопереноса, [1]:

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

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

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: Параболические начальные условия:

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

$$T = \frac{t - t_0}{t_c - t_0}; \quad \theta = \frac{\theta_0 - \theta}{\theta_0 - \theta_p}; \quad W_1 = \frac{t - t_n}{t_c - t_n}; \quad V_1 = \frac{\theta_n - \theta}{\theta_n - \theta_p}.$$

где:

$\Gamma$  - постоянная формы: для неограниченной плоскости  $\Gamma=0$ ;

для шара  $\Gamma=2$ ;

Индексы  $p$ ,  $r$  - соответственно параметры поверхности, равновесного значения;  $X = \xi/R$ - безразмерная координата ( $\xi$ , - 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;

$\varepsilon$  - критерий фазового перехода;

$T, \theta$  - 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.

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 влагосодер-

жания, температуры и максимального влагосодержания агента сушки позволило учитывать конденсацию влаги в элементарных слоях в процессе прохождения агента сушки через толстый неподвижный слой.

Проверка адекватности математической модели. Исследование процесса сушки проводилось 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. Относительная ошибка численных исследований при описании кривой сушки не превышает 16,8 %.

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 четырёхугольника со стороной 800 мм, и один в центре, на пересечении диагоналей. Высота слоя семян подсолнечника в контейнере равна 960 мм. Размеры горизонтального сечения контейнера - 1300x1300 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.

Относительная ошибка температурного поля по высоте слоя семян в контейнерной сушилке по сравнению с экспериментальными данными не превышает 15 %. В процессе сушки записывалась раз-

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

Таким образом, по результатам сравнения экспериментальных и теоретических данных кривых сушки семян подсолнечника в толстом неподвижном слое и температурных кривых ядра семянки 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]. 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  $48^{\circ}\text{C}$ , 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  $1\text{ м}$  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 -  $12\text{ мин}$ . Сушка производилась в течение  $6\text{ ч}$ .

В первые  $12\text{ мин}$  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  $48^{\circ}\text{C}$  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  $12\text{ минут}$  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 2 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  $45^{\circ}\text{C}$  и скоростях фильтрации его от 0,1 до 0,4 м/с.

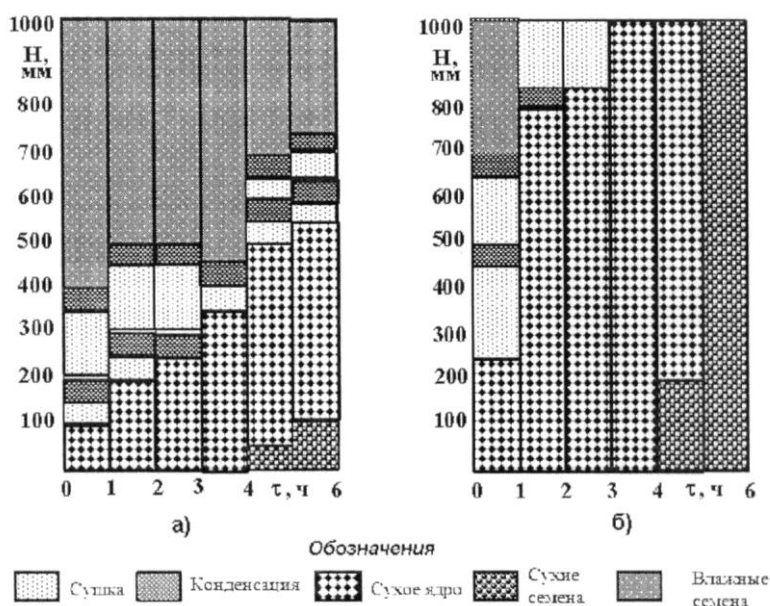


Рис. 2. Образование и продвижение характерных зон сушки в толстом неподвижном слое семян при исходном влагосодержании  $u = 0,2$  кг/кг: а - при скорости фильтрации агента сушки 0.1 м/с; б - при скорости фильтрации агента сушки 0.4 м/с

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 вла-госодержании 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 проведенных 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. 3.

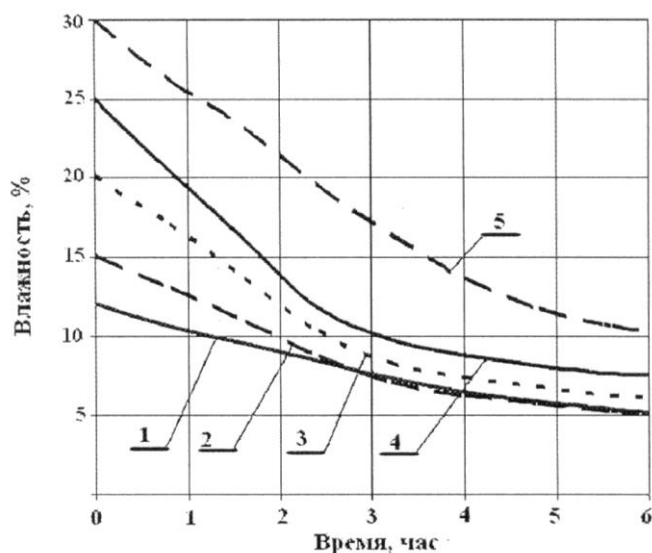


Рис. 3. Кинетика сушки семян подсолнечника в толстом неподвижном слое при рациональных режимах:

$$1 - u_c = 0,12, v = 0,2 \text{ м/с}; 2 - u_c = 0,15, v = 0,3 \text{ м/с}; 3 - u_c = 0,2, v = 0,3 \text{ м/с}; 4 - u_c = 0,25, v = 0,6 \text{ м/с}; 5 - u_c = 0,3, v = 0,7 \text{ м/с}$$

Из представленных кривых кинетики сушки видно, что при высоте неподвижного слоя 1 м, температуре агента сушки 46 - 48°C времени сушки 6 ч влажность семян достигнет кондиционного значения при исходном влагосодержании  $u_c=0,12$  и скорости фильтрации агента сушки  $u = 0,2$  м/с,

при  $u_c = 0,15$ - $0,2$  и  $u = 0,3$  м/с. Однако при  $u_c=0,25$  и  $u = 0,6$  м/с; при  $u_c = 0,3$  и  $u = 0,7$  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° С;
- при исходном влагосодержании семян  $w_c=0,12$  скорость фильтрации агента сушки  $u = 0,2$  м/с, при  $w_c = 0,15$  ч- 0,2  $u = 0,3$  м/с, при  $w_c = 0,25$

$V = 0,6$  м/с, при  $w_c = 0,3$   $u = 0,7$  м/с.

*Выводы.* На основании анализа предлагаемых численных исследований математических моделей сушки семян масличных культур 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, тепло физические 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 подсолнечника 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  $w_c = 0,12$  скорость фильтрации агента сушки  $u = 0,2$  м/с, при  $w_c = 0,15$  ч- 0,2  $u = 0,3$  м/с, при  $w_c=0,25$   $V = 0,6$  м/с, при  $w_c = 0,3$   $u = 0,7$  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 %.

#### Литература

1. *Лыков В.А.* Теория тепло- и массопереноса /*А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов.* - М. - 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 и кибернетика - фундаментальные и прикладные аспекты. - 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. - С. 58 - 64.

### МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СУШКИ РЕПРОДУКТИВНОГО НАСІННЯ ОЛІЙНИХ КУЛЬТУР СТОСОВНО КОНТЕЙНЕРНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

В.А. Дідур

**Анотація** - робота присвячена моделюванню процесу сушки насіння олійних культур високих репродукцій в умовах контейнерної технології кондиціонування та збереження. Математична модель базується на новому уявленні фізичної моделі як багатосферної кулі з повітряним каналом в її оболонці

### DESIGN OF PROCESS OF DRYING GENESIAL SEED OF OIL-BEARING CULTURES AS IT APPLIES TO CONTAINER TECHNOLOGY

V. Didur

#### *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.**