

УДК 631.365:631.53.01:633.2

Л. Кокалюк

Луцький національний технічний університет

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ВОРОХУ НАСІННЯ ТРАВ

**Резюме.** Наведено результати експериментальних досліджень процесів сушіння вороху насіння трав для інтенсифікації процесу та розроблення енергоефективної технології. Розглянуто модель процесу сушіння вороху насіння трав.

**Ключові слова:** ворох насіння трав, кінетика сушіння, барабанна сушарка.

L. Kokalyuk

## MODELING OF GRASS SEED PILE DRYING PROCESS

**The summary.** The results of experimental investigations of grass seed pile drying processes are represented, aiming at process intensification and development of energy efficient technology. The model of grass seed drying process is considered.

**Key words:** grass seed pile, drying kinetics, drum dryer.

### Умовні позначення:

- $t$  – температура сушильного агента, °С;
- $d$  – вологовміст сушильного агента, г/кг сухого повітря;
- $W$  – вологість насіння, %;
- $\theta$  – температура насіння, °С;
- $V$  – швидкість сушильного агента;
- $C_n, C_n$  – теплоємність насіння і повітря, кДж/(кг·К);
- $\varepsilon$  – шпаруватість насінневого шару;
- $r'$  – теплота пароутворення води, кДж/кг;
- $\alpha_g$  – коефіцієнт тепловіддачі, ккал/(кг·год);
- $\gamma_n$  – об'ємна маса насіння, кг/м<sup>3</sup>;
- $\gamma_n$  – питома маса повітря, кг/м<sup>3</sup>;
- $K$  – коефіцієнт сушіння, 1/год;
- $W_p$  – рівноважна вологість насіння, %;
- $x$  – просторова координата, м;
- $\tau$  – час, год;
- $\delta$  – товщина тонкого шару, м;
- $t_{i-1}, t_i$  – температура сушильного агента на вході в  $i$ -ий шар і виході з нього, °С.

**Вступ і актуальність проблеми.** Теплове сушіння, без якого проблематичне тривале зберігання насіння трав, одна з основних і найбільш енерготехнологічних операцій післязбирального обробітку насіння трав. Якісне сушіння не тільки забезпечує зберігання зібраного урожаю, запобігає його втратам, а й у деяких випадках підвищує якість готового продукту. Саме на цій стадії витрачається до 80% усієї енергії післязбирального оброблення насіння, а корисне використання енергії у самих сушарках – до 40-45%.

Широке впровадження стаціонарних технологій післязбирального обробітку вороху насіння трав стримують кілька причин, серед них – нестача високопродуктивних засобів для сушіння насінневого вороху. Усунути цю перешкоду можна, якщо застосовувати для сушіння вороху насіння трав високопродуктивні барабанні сушарки. Проте досі недостатніми є наявні конструктивні рішення, які б дозволяли здійснювати цей процес без зниження якісних показників матеріалу. Актуальне розроблення енергоощадних методів сушіння та засобів їхньої реалізації, які б забезпечували повне використання потенціалу сушильного агента. Окрім того,

доцільним є перемішування матеріалу, який обробляють, для інтенсифікації процесу сушіння.

Незважаючи на значну кількість теоретичних і експериментальних досліджень, присвячених загальній теорії сушіння, тепломасообміну та інтенсифікації процесів перенесення вологи, а також широкому впровадженню технологічних енергозаощаджувальних заходів у галузі енергозберігаючого сушіння, залишається багато невикористаних резервів, тому дослідження у цьому напрямку актуальні та своєчасні.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Процес сушіння – нестационарний, тобто вологість, температура матеріалу та швидкість його зневоднення змінюються із часом. У теорії сушіння усі зміни прийнято ілюструвати графічно – у вигляді трьох типових кривих: сушіння  $W(\tau)$ , швидкості  $dW/d\tau$  і температури  $t(\tau)$ . Виділяють такі найхарактерніші ділянки на графіках зміни цих параметрів. Перша ділянка – це процес нагрівання матеріалу, її тривалість залежить від розмірів зразка та режиму сушіння матеріалу. Протягом цього періоду температура матеріалу і швидкість сушіння зростають, досягаючи в кінці періоду постійного значення. Після періоду прогрівання починається період постійної швидкості сушіння (або перший період сушіння). Під час нього швидкість сушіння та температура матеріалу не змінюються, а вологовміст змінюється за лінійним законом. При сушінні вороху насіння трав немає чітко вираженого періоду постійної швидкості. Умови сушіння змінюються за висотою шару, внаслідок цього відбувається нерівномірне сушіння (матеріал з боку сушильного агента пересушується, а з іншого – залишається вологим). Після того, як вологовміст сягне критичного значення, швидкість сушіння зменшується, а температура матеріалу зростає. Саме у цей період, який отримав назву другого періоду сушіння, вологість матеріалу досягає кондиційного значення [1-3].

Переміщення вологи у матеріалі відбувається під дією градієнтів вологості, температури і тиску [4]. При випаровуванні вологи з поверхні матеріалу створюється перепад її вмісту в зовнішньому і внутрішньому шарах. Виникає градієнт вмісту вологи, який зумовлює її випаровування. Градієнт температури має великий вплив на переміщення вологи у матеріалі. Якщо температура матеріалу на поверхні вища, ніж усередині, то температурний градієнт гальмує випаровування, бо волога рухається від вищої до нижчої температури.

Великий вклад у розроблення теорії процесу сушіння різних сільськогосподарських матеріалів внесли А.В. Ликов, А.С. Гінзбург, В.А. Суметов, А.П. Гержой, В.Ф. Самочетов, Б.І. Котов, В.Ф. Дідух [1-6]. Вони обґрунтували зміни температури сушильного агента і вологості матеріалу при сушінні у тонкому шарі. Як правило, дослідження проводили з наступним переходом до товстого шару. При цьому приймали деякі припущення. Приклад розрахунку цієї задачі з використанням ЕОМ наведено в роботах Г.С. Окуня [7].

Дослідження процесу сушіння зернових, льону та інших сільськогосподарських культур дозволили розібратися у багатьох питаннях, які стосуються механізації процесу сушіння. У той же час процес сушіння вороху насіння трав досліджений недостатньо.

**Метою дослідження** є розроблення моделі процесу сушіння вороху насіння трав, що дозволить встановити раціональні значення параметрів і режимів роботи сушильного обладнання.

**Результати досліджень.** Конвективне сушіння вороху насіння трав – складний процес одночасного перенесення теплоти і маси, який описується складною системою диференціальних рівнянь. Розв'язок цих рівнянь отримано лише для тіл класичної форми. Тому для розв'язку прикладних задач для описування процесу сушіння шару використовують спрощений механізм тепло- і масообміну між вологим матеріалом і агентом сушіння.

Для проведення розрахунку процесу сушіння вороху насіння трав використано ступінчастий метод [7]. В його основі – спрощений механізм тепло- і масообміну (волога в насініні – у рідкому стані, тепло- і масообмін відбувається лише між сушильним агентом і насінням, температурний градієнт всередині окремих насінін дуже малий, теплообмін між сушильним агентом і насінням здійснюється конвекцією), який описується системою диференціальних рівнянь:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + 3600 \cdot V \cdot \frac{\partial t}{\partial x} = - \frac{\gamma_n \cdot C_n}{\gamma_n \cdot C_n \cdot \varepsilon} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \tau} - \frac{\gamma_n \cdot r'}{\gamma_n \cdot C_n \cdot \varepsilon} \cdot \frac{\partial W}{\partial \tau} \cdot \frac{1}{100}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = - \frac{\gamma_n \cdot \varepsilon}{10 \cdot \gamma_n} \left( \frac{\partial d}{\partial \tau} + 3600 \cdot V \cdot \frac{\partial d}{\partial x} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + 3600 \cdot V \cdot \frac{\partial t}{\partial x} = - \frac{\alpha_g \cdot \gamma_n}{\gamma_n \cdot C_n \cdot \varepsilon} \cdot (t - \theta), \quad (3)$$

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = -K \cdot (W - W_p). \quad (4)$$

Перше рівняння відображає закон збереження енергії у процесі сушіння: теплота; друге – закон збереження речовини; останні два – закон тепло- і масообміну між матеріалом і сушильним агентом.

Для числового рішення процесу сушіння використовували ступінчастий метод.

Ступінчастий метод розрахунку процесу сушіння насіння трав базується на послідовному (в часі та просторі) розрахунку процесу сушіння тонкого шару, за висотою якого зміною вологості й температури можна знехтувати. Процес сушіння тонкого насінневого шару за проміжок часу  $\Delta\tau$ , за який швидкість сушіння майже не змінюється, описується системою алгебраїчних рівнянь (5) – (8):

$$\Delta t = - \frac{C_n \cdot \gamma_n \cdot \delta}{3600 \cdot V \cdot \gamma_n \cdot C_n} \cdot \frac{\Delta \theta}{\Delta \tau} - \frac{\gamma_n \cdot \delta}{3600 \cdot V \cdot \gamma_n \cdot C_n} \cdot \frac{r'}{100} \cdot \frac{\Delta W}{\Delta \tau}, \quad (5)$$

$$\Delta d = - \frac{10 \cdot \gamma_n \cdot \delta}{3600 \cdot V \cdot \gamma_n} \cdot \frac{\Delta W}{\Delta \tau}, \quad (6)$$

$$\Delta t = - \alpha_g \cdot \frac{\gamma_n \cdot \delta}{3600 \cdot V \cdot \gamma_n \cdot C_n} \cdot (\theta - t), \quad (7)$$

$$\Delta W = -K \cdot (W - W_p) \cdot \Delta \tau. \quad (8)$$

Ця система при  $\Delta\tau \rightarrow 0$  переходить у систему диференціальних рівнянь (1) – (4). Таким чином, послідовність у просторі (для усіх тонких шарів, які в сумі складають товстий шар) і часі (починаючи з першого періоду  $\Delta\tau$ , до закінчення сушіння  $\tau$ ) рішення системи (5) – (8) дає чисельне рішення системи (1) – (4).

Точність розрахунку процесу сушіння вороху насіння трав ступінчастим методом визначають достовірністю розрахунку тонкого шару за рівняннями (5) – (8) та обмеженнями на тривалість періоду  $\Delta\tau$  і товщиною тонкого шару. Для розрахунку процесу сушіння рухомого шару вороху насіння трав необхідно встановити кінетичні коефіцієнти і обмеження, у межах яких допустимо використовувати системи (5) – (8).

За товщину тонкого шару доцільно взяти шар товщиною в одну насініну.

Досліджували процес конвективного сушіння вороху насіння трав на розробленій лабораторній установці, що складається із вентилятора, калорифера, гнучкого з'єднання, сушильної камери з касетами для матеріалу (рис. 1).

Сушильна камера виготовлена у вигляді циліндра, у який встановлено вісім касет з перфорованим днищем. У калорифер вмонтовано регулятор температури. З його допомогою вручну встановлюють температуру теплоносія. За необхідності подавання атмосферного повітря калорифер вимикають. Витрата повітря регулюється повітророзподільною заслінкою.

Дослідна установка працює так: вологе атмосферне повітря вентилятором подається до калорифера, де нагрівається до заданої температури, і повітропроводом – у сушильну камеру. Тут сушильний агент проходить крізь касети, наповнені ворохом насіння трав. Відпрацьований сушильний агент виводиться із сушильної камери.

Експериментальні показники брали після запускання установки і встановлення сталих теплових та аеродинамічних характеристик теплоносія. Дослідження проводили на штучно зволоженому воросі насіння вівсяниці лучної та суміші насіння вівсяниці лучної і райграса пасовищного. Діапазон вимірювань параметрів був таким: початкова вологість вороху насіння трав  $W_n = 19\%...35\%$ ; температура агента сушіння  $t_{ac} = 50 \div 55^\circ C$ .



Рисунок 1 – Лабораторна установка для дослідження процесу конвективного сушіння вороху насіння трав

Перед проведенням дослідів зважили матеріал і касети. Заповнені касети вставляли в сушильну камеру й починали процес сушіння. Зважували касети разом із ворохом насінням через кожні 10 хвилин протягом часу сушіння. Підраховуючи різницю між масою касети із насінням та порожньою касетою, визначали кількість видаленої вологи. Вологість матеріалу у наважках встановлювали висушуванням вороху насіння у термошафі.

Проведене опрацювання дослідних даних дало змогу отримати криві сушіння вороху насіння трави. Результати досліджень зображено на рис. 2. Експериментальні точки на графіку є середнім значенням за трьома повторюваностями. Цифрами 1,2,...,7,8 показано номери касет, починаючи із нижньої.

На основі експериментальних даних отримано значення коефіцієнта сушіння  $K$ , що є необхідним для теоретичного описування процесу.

Для тонкого шару матеріалу його температура матеріалу і температура сушильного агента пов'язані співвідношенням:

$$\theta = \frac{t_{i-1} + t_i}{2} \quad (9)$$

Рівняння (9) дозволяє виключити із розгляду рівняння (7) і розраховувати теплообмін у процесі сушіння тонкого шару насіннєвого матеріалу за рівнянням теплового балансу (5) без урахування коефіцієнта теплообміну і температурного напору, визначення яких пов'язане з відомими труднощами.

Таким чином, для  $i$ -го тонкого шару в інтервалі часу  $(j-1)\Delta\tau - j\Delta\tau$  розв'язок системи (5) – (8) з урахуванням кінетичних коефіцієнтів та вказаних обмежень, початкових у момент часу  $(i-1)\Delta\tau$  параметрів матеріалу ( $W_{i,j-1}$  і  $\theta_{i,j-1}$ ) і сушильного агента на вході в шар ( $t_{i-1,j}$  і  $d_{i-1,j}$ ), а також рівняння (9) визначають параметри сушильного агента на виході із шару і матеріалу в момент  $j\Delta\tau$ :

$$t_{i,j} = (1 - A)t_{i-1,j} + A \cdot \theta_{i,j-1} - B \cdot K \cdot (W_{i,j-1} - W_p) \cdot \Delta\tau, \quad (10)$$

$$d_{i,j} = d_{i-1,j} + \frac{K}{10,2} \cdot (W_{i,j-1} - W_p), \quad (11)$$

$$W_{i,j} = W_{i,j-1} - K(W_{i,j-1} - W_p)\Delta\tau, \quad (12)$$

$$\theta_{i,j} = \frac{t_{i-1,j} + t_{i,j}}{2}, \quad (13)$$

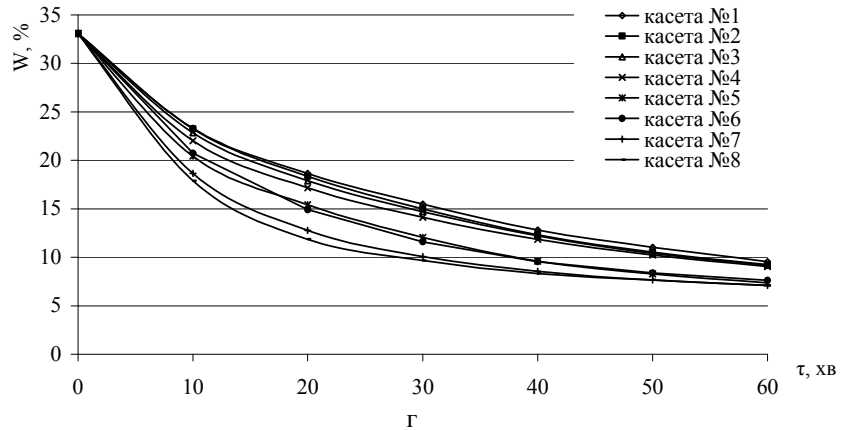
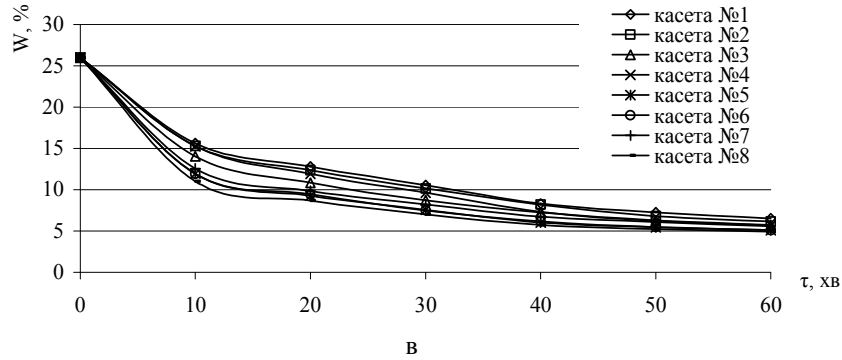
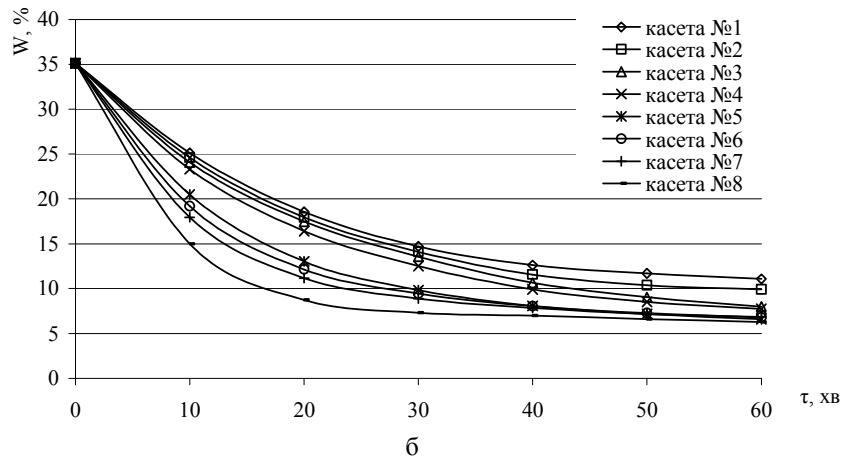
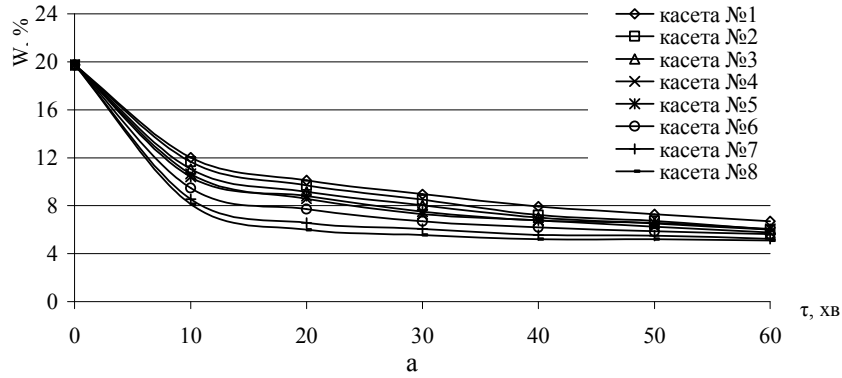


Рисунок 2 – Зміна вологості вороху насіння трав з часом при вентиляванні сушильним агентом температурою  $t_{c.a.} = 50 \div 55^\circ C$  : а – суміш вівсяниці лучної та райграсу пасовищного  $W_n = 19,75\%$ ; б – суміш вівсяниці лучної та райграсу пасовищного  $W_n = 35,12\%$ ; в – вівсяниці лучної  $W_n = 25,98\%$ ; г – вівсяниці лучної  $W_n = 33,08\%$

де

$$A = \frac{C_3}{102C_{II} \cdot \Delta\tau + 0,5 \cdot C_M}, \quad (14)$$

$$B = \frac{0,01 \cdot r'}{102C_{II} \cdot \Delta\tau + 0,5 \cdot C_M}. \quad (15)$$

Розрахунок процесу сушіння шару вороху насіння трав здійснюють за схемою, зображеною на рис. 3.

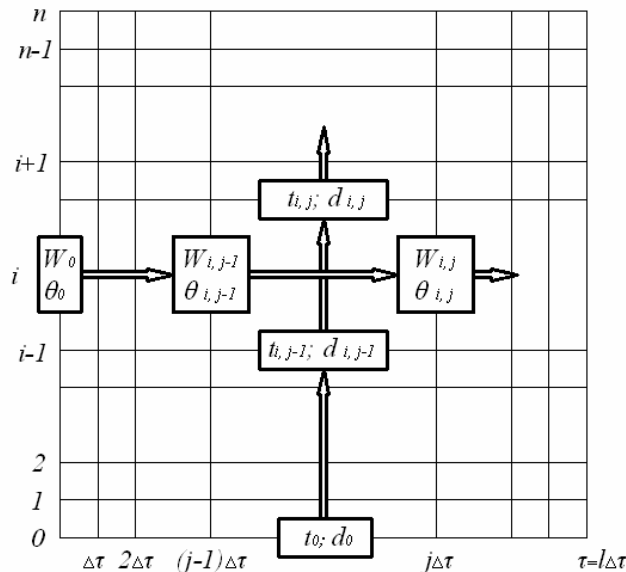


Рисунок 3 – Принципова схема сушіння вороху насіння трав ступінчастим методом

На основі розробленої методики за допомогою Free Pascal/Lazarus IDE розроблено програмне забезпечення (рис. 4), яке дозволяє проводити розрахунки процесу сушіння насіння на основі описаної математичної моделі.

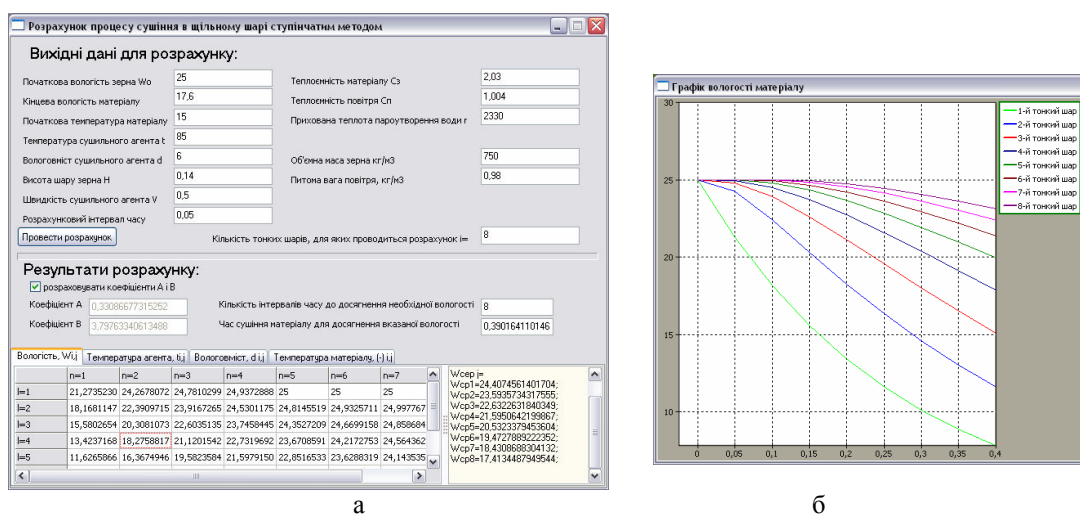


Рисунок 4 – Приклад для розрахунку процесу сушіння вороху насіння трав ступінчастим методом: а – розрахунок; б – побудова графіка зміни вологості тонких шарів матеріалу

Враховуючи результати аналізу засобів сушіння, теоретичних та експериментальних досліджень процесу сушіння вороху насіння трав, запропоновано конструкцію барабанної сушарки (рис. 5), яка містить сушильну камеру, розміщену на

рамі, вентилятор, електрокалорифер та завантажувальний шнек. Усередині сушильної камери – спіралеподібна перфорована поверхня.

Мета створення даної конструкції сушарки – використання переваг барабанної сушарки з одночасним уникненням її основного недоліку – неконтрольованого часу перебування матеріалу в зоні сушіння та низького коефіцієнта заповнення матеріалом сушильної камери.

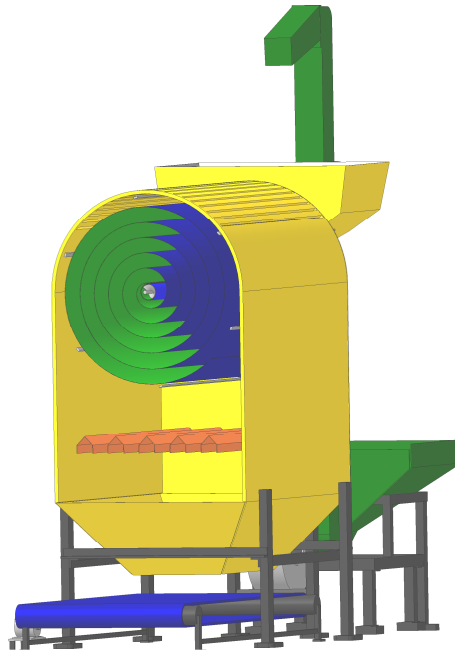


Рисунок 5 – Барабанна сушарка

**Висновки.** Проведено теоретичне і експериментальне дослідження кінетики конвективного сушіння вороху насіння трав. Отримано математичну модель процесу сушіння вороху насіння трав, яка пов’язує початкову вологість, вологовміст і температуру матеріалу, а також температуру сушильного агента. Розроблена система ступінчастого методу розрахунку на ЕОМ дозволила реалізувати модель процесу сушіння вороху насіння трав.

Запропонована конструкція сушарки дає можливість чітко контролювати час перебування матеріалу в зоні сушіння підбиранням частоти обертання спіралі, збільшити площу контакту матеріалу із сушильним агентом і тим самим підвищити ефективність використання його енергетичного потенціалу, інтенсифікувати процес сушіння, забезпечивши високий ступінь пористості шару матеріалу внаслідок його перемішування.

Конструкція сушарки дає змогу розробляти і застосовувати енергозберігаючі методики сушіння вороху насіння трав. Забезпечити це можна, підібравши раціональні параметри сушарки, зокрема крок спіралі та частоту обертання барабана.

#### **Література**

1. Гинзбург А.С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов / Гинзбург А.С. – М.: Пищевая промышленность, 1973. – 528 с.
2. Дідух В.Ф. Підвищення ефективності сушіння сільськогосподарських матеріалів / Дідух В.Ф. – Луцьк: ЛДТУ, 2002. – 165 с. – (Монографія).
3. Котов Б.И. Технологические и теплоэнергетические основы повышения эффективности сушки растительного сырья: дис. доктора техн. наук: 05.20.01 / Котов Борис Иванович. – Глеваха, 1994. – 440 с.
4. Зеленко В.И. Конвективная сушка сельскохозяйственных материалов в плотном слое / Зеленко В.И. – Тверское областное книжно-журнальное издательство, 1998. – 96с. – (Основы теории).
5. Лыков А.В. Теория сушки / Лыков А.В. – М.: Энергия, 1968. – 471 с.
6. Гержой А.П. Зерносушение и зерносушилки / А.П. Гержой, В.Ф. Самочетов – М.: Колос, 1967. – 255 с.

7. Окунь Г.С. Расчет продолжительности и энергоемкости процесса сушки зерна в плотном слое с помощью ЭВМ / Окунь Г.С., Верцман Н.И., Есаков Ю.В. // Труды ВИМ. – М., 1984. – Т.100 – С. 73 – 80.

Одержано 30.12.2009 р.