



Національна Академія Наук України  
Інститут технічної теплофізики

# **Інтенсифікація тепло- та масообміну в технологіях сушки органічних матеріалів сумісних з одночасним диспергуванням в роторних апаратах**

**Ляшенко Андрій Володимирович**  
С.Н.С., К.Т.Н.

**2021 рік**

## Мета роботи

Мета роботи – інтенсифікація процесів тепло- та масообміну в технологіях сушки органічних матеріалів при використанні метода сумісних процесів сушки і диспергування в одній камері за допомоги механічного ротора та практична його реалізація.

# Актуальність роботи



- 1. Переробка відходів птахівництва:**
  - курячий послід, шкаралупа яєць, тушки загиблих пташенят.
- 2. Виробництво кормів для с/г тварин і риб з відходів харчової промисловості та використання органічної сировини.**
- 3. Переробка відходів шкіряного виробництва.**
- 4. Різні органічні шлами, мули, відходи біомаси та інш..**



**Основні групи установок сумісних процесів диспергування  
і сушки**  
**Розробка ІТТФ НАН України**

**Високошвидкісні**

**Частота обертів ротора  
вала установки**

**$n = 300 - 1000$  об/хв.**

**або**

**$V = 15 - 40$  м/с**

**Низькошвидкісні**

**Частота обертів ротора  
вала установки**

**$n =$  до  $300$  об/хв.**

**або**

**$V =$  до  $10$  м/с**

## Технічні характеристики установок, що використовують для сушки відходів птахівництва (курячий послід)

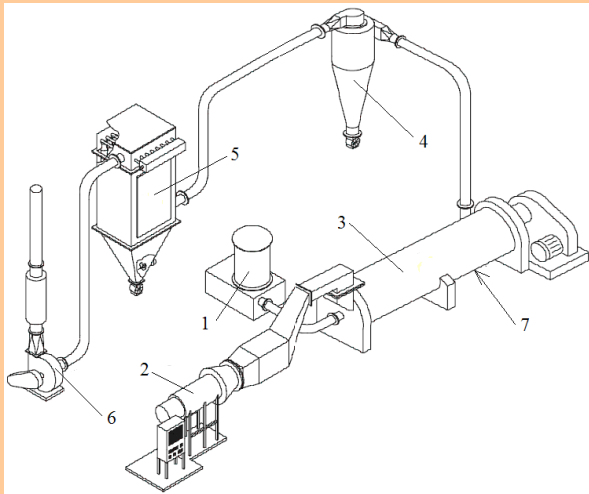
Фирма	Тип установки	Температура на входе в рабочую камеру, t °С	Температура на выходе из рабочей камеры, t °С	Пределы изменения влажности,%	Расход энергии на сушку, кДж/кг
Хейл Адриер, USA	Барабанная трехходовая	980	160 - 220	70 - 15	-
Санва Кочио, Япония	Двухбарабанная одноходовая		140 - 160	75 - 30 30 - 10	-
Хамада, Япония	Барабанная двухходовая		120 - 140	70 - 10	-
Атлас Дания	Барабанная с трубчатой насадкой	-	-	-	-
Гиза, Джи-Э-Джи, Италия	Барабанная с насадками	800 - 900	-	62 - 14	5280
УПП-100 Россия	Барабанная одноходовая		140-160	70 - 17	5573
ОПП-2 Россия	Барабанная одноходовая	900	160	65 - 15	4180
УСПП-1 Россия	Барабанная двухходовая со спиральными насадками	500 - 1000	120	65 - 15	-

## Установка компанії «Atritor»

Компанія «Atritor» пропонує сушарку для переробки термолабільних пастоподібних матеріалів і в точу числі курячого посліду, з можливістю обробки матеріалів з високою початковою вологістю. Позволяє отримати готовий продукт у вигляді порошка або гранул з регулюванням вологості кінцевого продукту.



Сушарка «AST Dryer». Загальний вид.



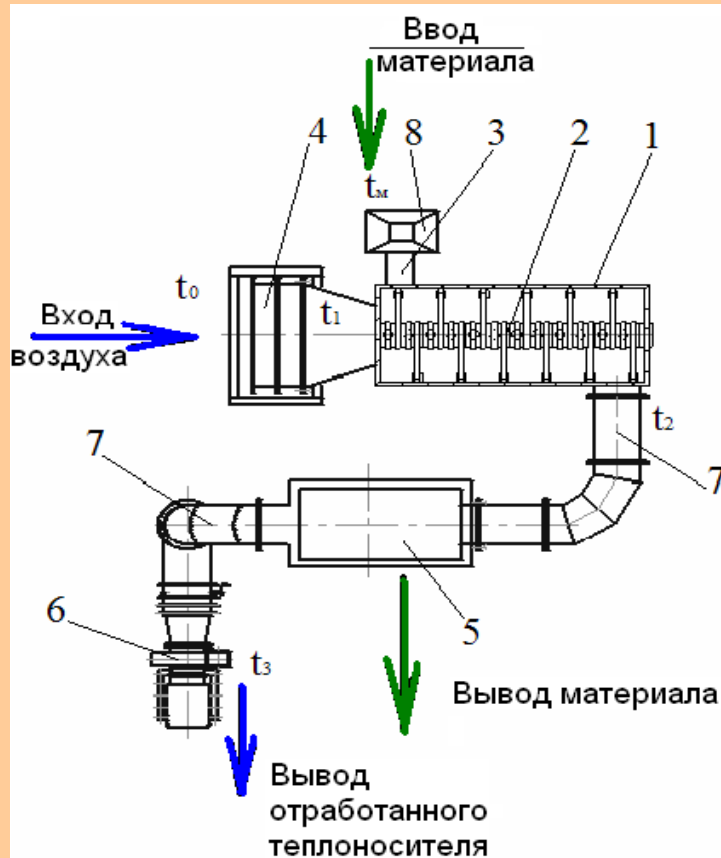
## ТЕПЛОТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Продуктивність по сировині – до 800 кг/год;  
Початкова вологість сировини – до  $W=65\%$ ;  
Кінцева вологість сировини – до  $W=12\%$ ;  
Дисперсність готового продукту – 1-3 мм;  
Температура на вході в камеру:  $t=550-600^{\circ}\text{C}$ ;  
Пит. витр. енергії: до 4000 кДж/кг вик. вологості (900 ккал/кг випар. вологості);  
Встановл. ел. потужність –  $N=65$  кВт час/ т. матер.

**Технологічна схема по обробці термолабільних пастоподібних матеріалів компанії «Atritor» з використанням сушарки «AST Dryer»:**

1 – шнековий живильник; 2 – теплогенератор; 3 – сушарка; 4 – циклон; 5 – фільтр; 6 – вентилятор; 7 – зона вивантаження.

# Дослідження процесів тепломасообміну у камері сумісних процесів сушки і диспергування



## Теплотехнічні характеристики:

1. Установлена потужність:  
 $N=700$  кВт ( $65$   $\text{м}^3/\text{год}$ ).
2. Температура теплоносія:  
 $t= 500 - 700^\circ\text{C}$ ;
3. Діапазон обертів ротора:  
 $n=300 - 700$  об/хв.
4. Аеродинамічний опір:  
 $\Delta p=100$  кПа (у номін. реж.);
5. Продуктивність:  
до  $G=600$  кг/год (по сировині).

## Схема дослідно-промислової установки сумісних процесів сушки та диспергування

### Умовні позначення:

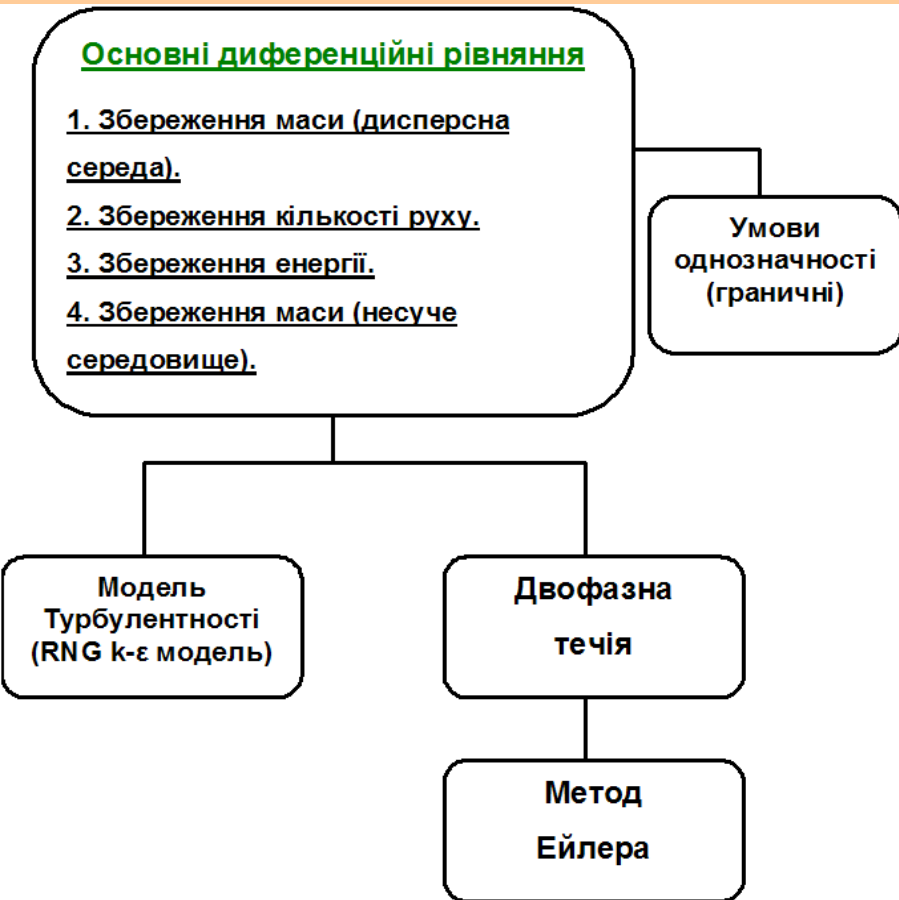
1- камера сумісних процесів сушки та подрібнення; 2 - ротор; 3 - шнековий податчик-дозатор для початкової сировини; 4 – теплогенератор; 5 – пристрій для розділення твердої і газоподібної фаз, що відокремлює готовий продукт від теплоносія; 6 – вентилятор; 7 - система повітроводів; 8 - приймальний бункер.

$t_0$  – температура навколишнього середовища;  $t_1$  – температура на вході в установку;  $t_2$  – температура на виході з установки;  $t_3$  – температура на виході з циклонів в навколишню середу;  $t_m$  – початкова температура матеріалу.

# Чисельне дослідження сумісного процесу сушіння та диспергування в одній камері

## Математична модель тепломасообміну, динаміки руху твердої фази та теплоносія

### Структура математичної моделі



### Параметри процесу:

1. Температура теплоносія на вході в камеру:  $t_1=300 - 700^{\circ}\text{C}$ .
2. Початкова температура матеріалу –  $t_2=20^{\circ}\text{C}$ .
3. Кінцева температура матеріалу –  $t_3=70^{\circ}\text{C}$ .
4. Витрата теплоносія – до  $1,0 \text{ м}^3/\text{с}$ .
5. Фізичні характеристики сировини та теплоносія.
6. Початкова вологість сировини – до 80%.
7. Швидкість обертання ротора:  $n=300 - 700 \text{ об/хв}$ .
8. Продуктивність по сировині:  $G_1=300 - 600 \text{ кг/год}$ .

### Припущення:

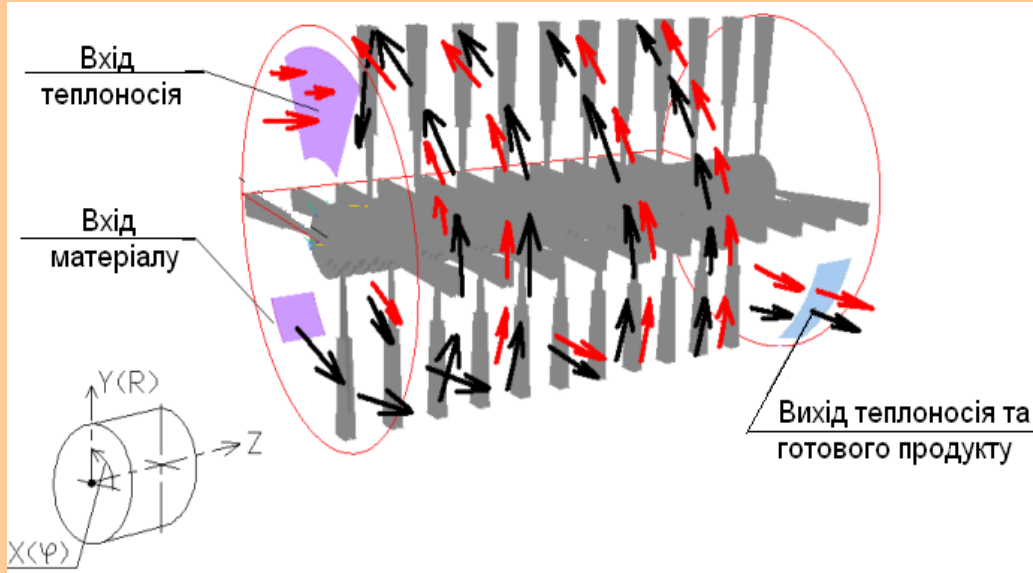
1. Частини твердої фази одного розміру:  $d=1...3\text{мм}$ .
2. Подрібнення відсутнє.
3. Зменшення маси твердої фази за рахунок випаровування вологи.

Математична модель розроблена в пакеті PHOENICS

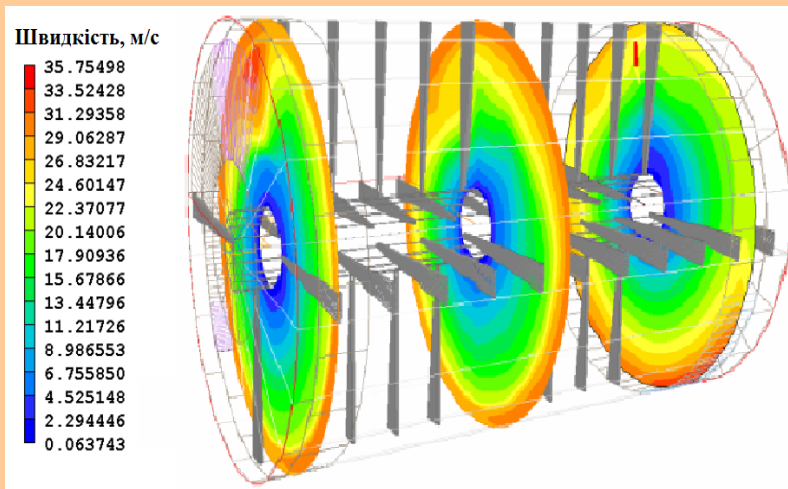


# Чисельне дослідження сумісного процесу сушіння та диспергування в одній камері

## Схема комп'ютерної моделі робочої камери

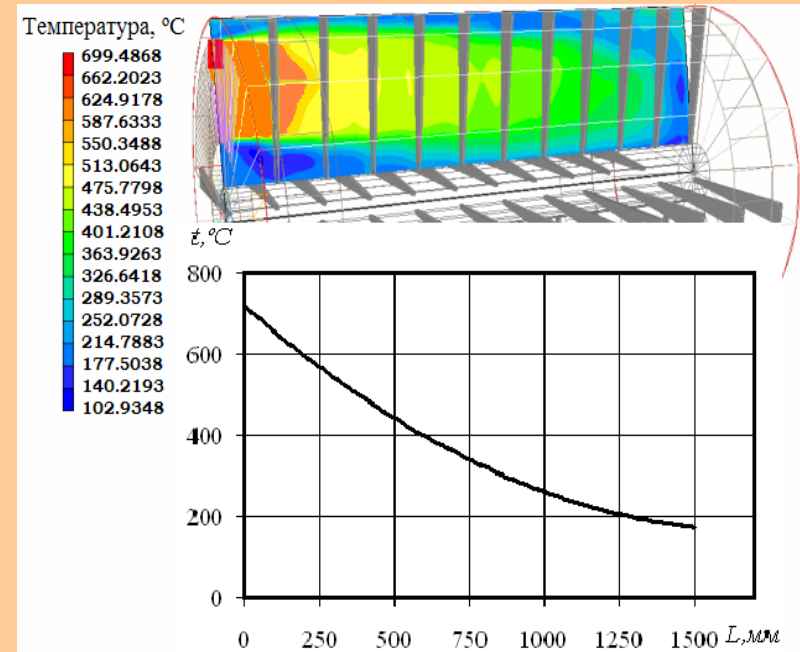


## Поля швидкості руху твердої фази



Зміна полів швидкості руху твердої фази по довжині камери

## Поле температури теплоносія



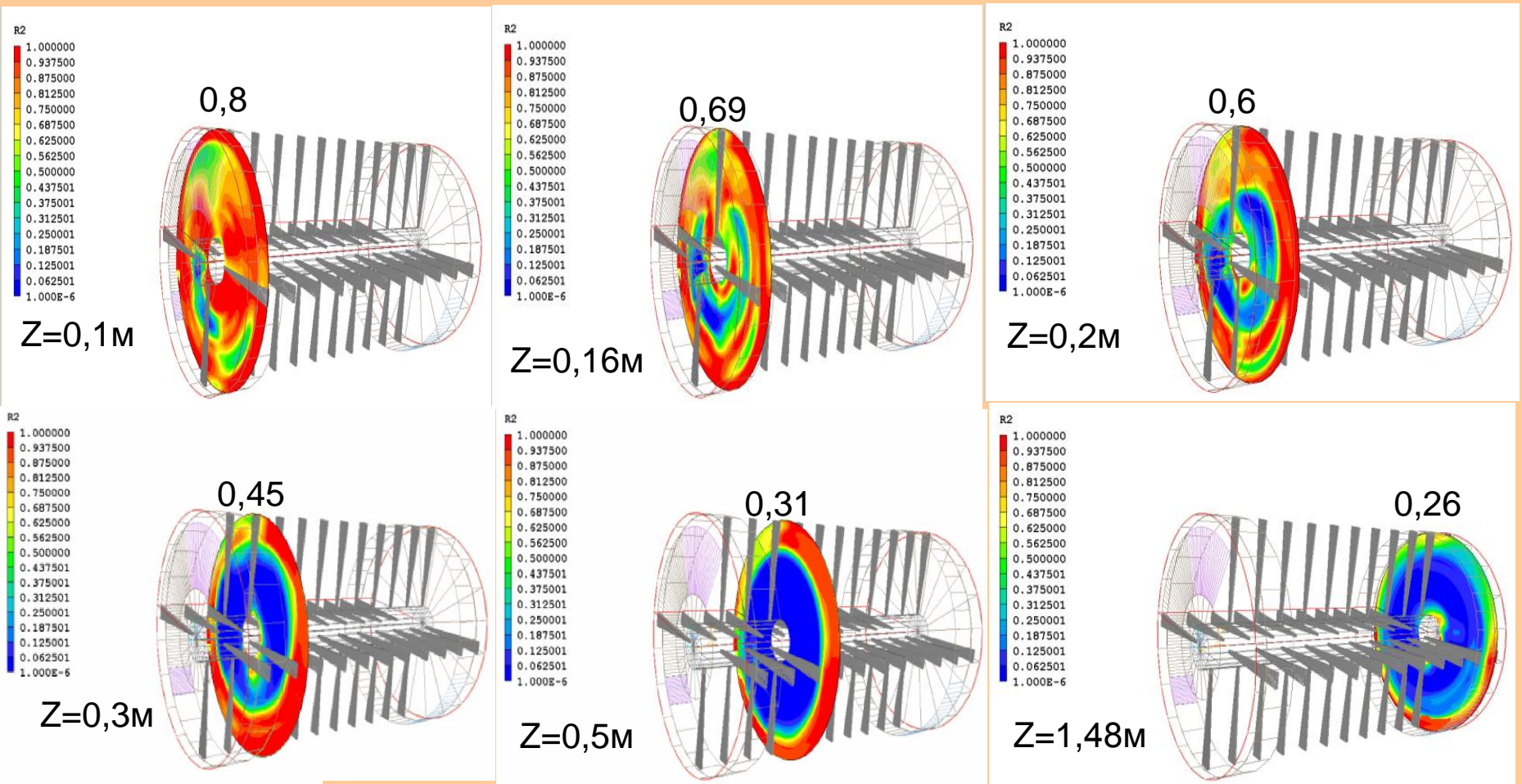
Зміна середньої температури теплоносія по довжині камери

## Граничні умови:

[  $t_1=700^\circ\text{C}$ ;  $t_2=20^\circ\text{C}$ ;  $t_3=70^\circ\text{C}$ ;  $V= 0,8 \text{ м}^3/\text{с}$ ;  
 $\lambda=0,17 \text{ Вт/м}\cdot\text{град}$ ;  $c_p=4,06 \text{ кДж/кг}\cdot\text{град}$ ;  $W=80\%$   
 $n= 700 \text{ об/хв}$ ;  $d=1,3\text{мм}$ ;  $G_1=600 \text{ кг/год}$ ]

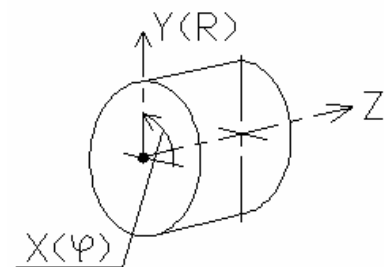
# Чисельне дослідження сумісного процесу сушіння та диспергування в одній камері

## Поверхня розподілу твердої фази у камері в перерізах по її довжині.



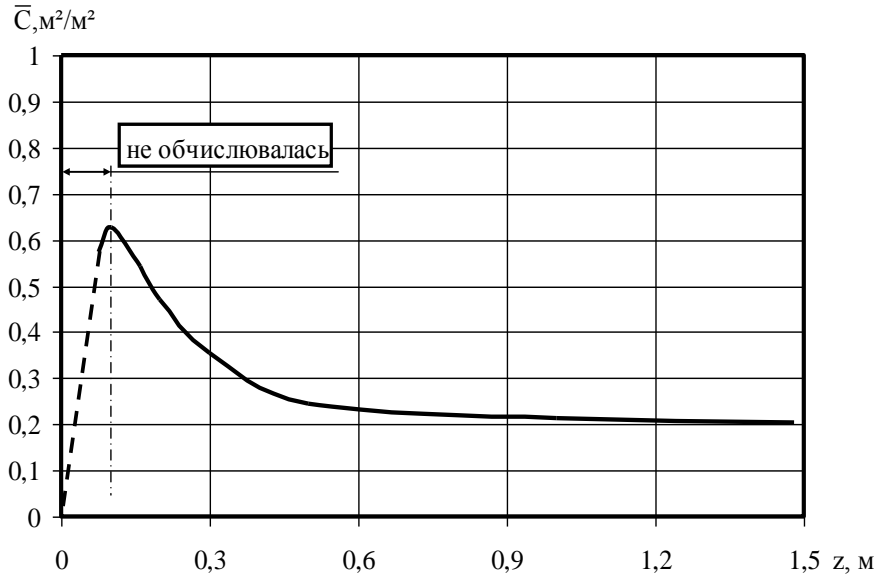
### Граничні умови:

[  $t_1=700^\circ\text{C}$ ;  $t_2=20^\circ\text{C}$ ;  $t_3=70^\circ\text{C}$ ;  $V=0,8\text{ м}^3/\text{с}$ ;  $\lambda=0,17\text{ Вт/м}\cdot\text{град}$ ;  
 $\text{ср}=4,06\text{ кДж/кг}\cdot\text{град}$ ;  $n=700\text{ об/хв}$ ;  $d=1,3\text{мм}$ ;  $G=600\text{ кг/год}$  ]



# Чисельне дослідження сумісного процесу сушіння та диспергування в одній камері

Поверхня розподілу твердої фази у камері в перерізах по її довжині.



## Граничні умови:

[  $t_1=700^{\circ}\text{C}$ ;  $t_2=20^{\circ}\text{C}$ ;  $t_3=70^{\circ}\text{C}$ ;  $V=0,8\text{ м}^3/\text{с}$ ;  $\lambda=0,17\text{ Вт/м}\cdot\text{град}$ ;  $c_p=4,06\text{ кДж/кг}\cdot\text{град}$ ;  $n=700\text{ об/хв}$ ;  $d=1,3\text{ мм}$ ;  $G=600\text{ кг/год}$  ]

Для шароподібної частинки:

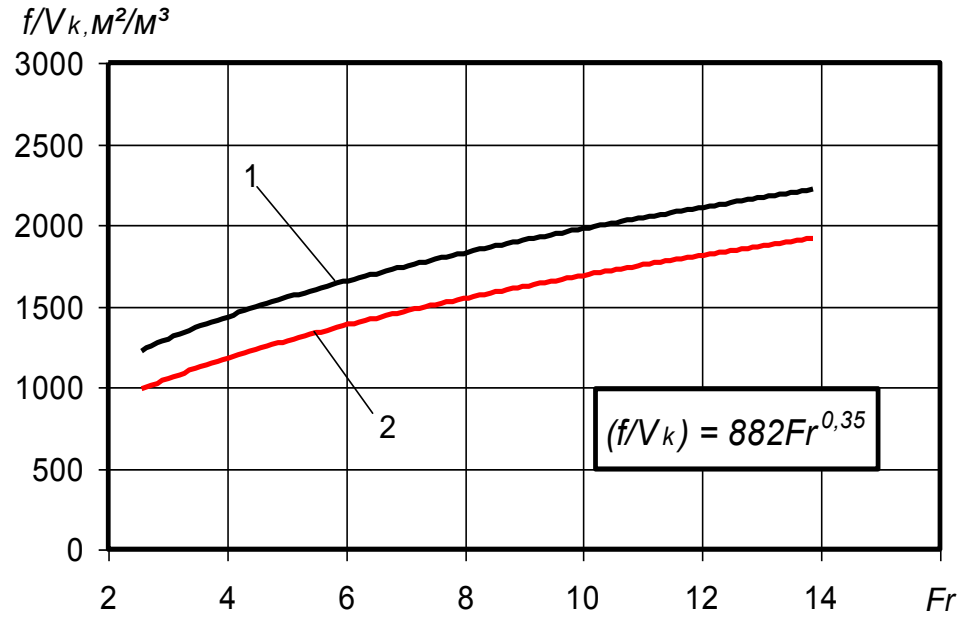
$$F = \frac{6 \cdot G}{\rho \cdot d_e}$$

де,  $G$  – продуктивність по сировині, кг/год;

$\rho$  – густина частин матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;

$d_e$  – середній розмір частин полідисперсної системи, м.

Розподіл середньої поверхні контакту фаз від числа Фруда



1 – за даними комп'ютерного моделювання;

2 – згідно методики Ю. І. Дитнерського.

$$Fr = \frac{n^2 \cdot d}{g}$$

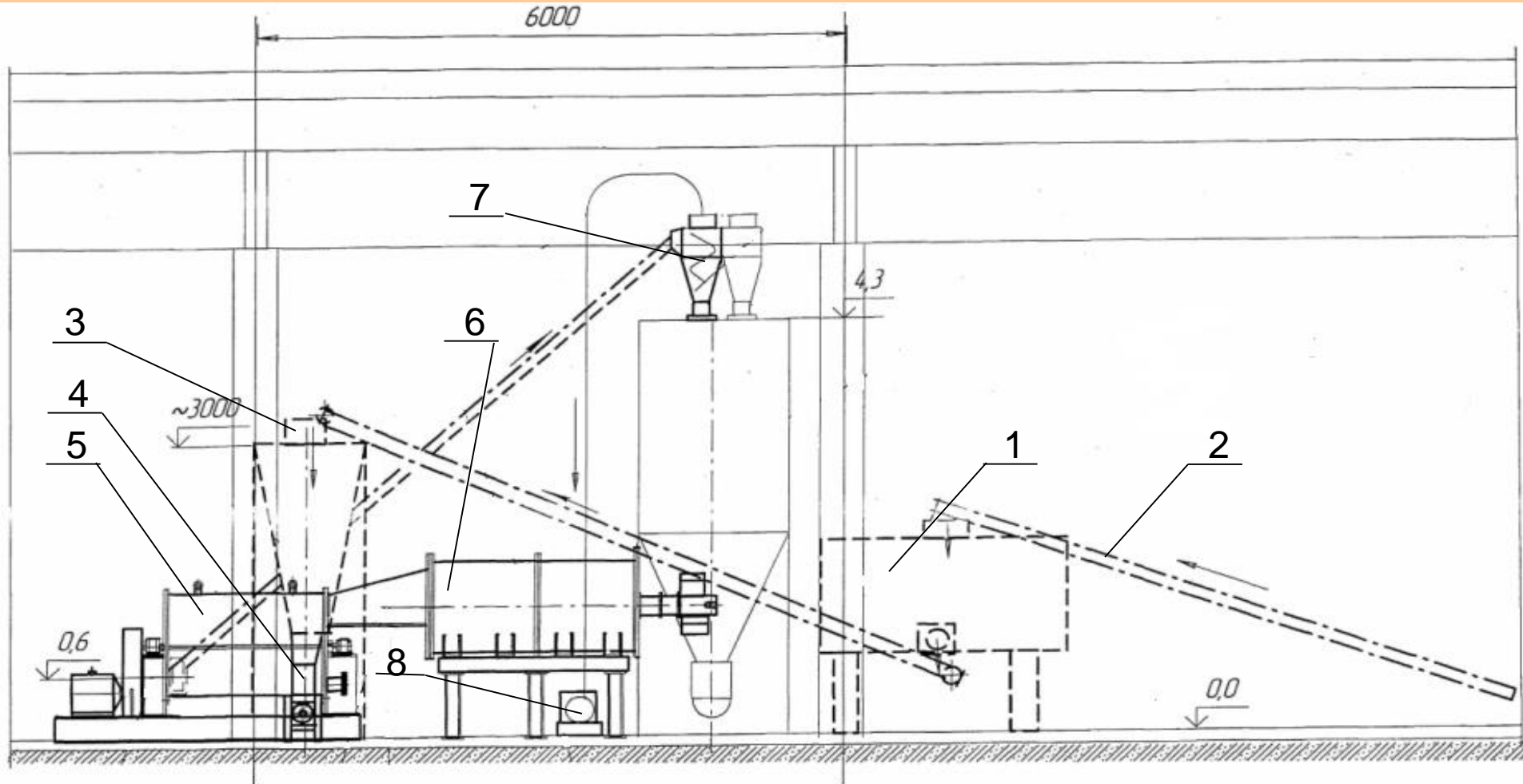
де,  $n$  – частота обертання ротора подрібнювача, об/с;

$d$  – діаметр ротора, м;

$g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>. 11

# Розробка енергоресурсозберігаючої технології одержання органо-мінеральних добрив на основі відходів птахівництва

Загальний вигляд виробництва органо-мінерального добрива на основі курячого посліду з використанням установки сумісних процесів  
УСКУ 01.00.000



## Умовні позначення:

1 – допоміжна ємність; 2 – конвеєр скребковий РП – 500Ш – 40М; 3 – накопичувач; 4 – живильник (обладнання ІТТФ); 5 – сушарка сумісних процесів (обладнання ІТТФ); 6 – теплогенератор (обладнання ІТТФ); 7 – група циклонів; 8 – вентилятор.

# Розробка енергоресурсозберігаючої технології одержання органо-мінеральних добрив на основі відходів птахівництва

## Якісний склад отриманих органо-мінеральних добрив

**ЕКОТЕРРА** TM

За результатами випробувань, порівняно з традиційними мінеральними добривами, отримано позитивний результат

**ХАРАКТЕРИСТИКА ДОБРИВА**

Особливі властивості: підвищення врожайності, збереження біологічно активних сполук, природні мінерали

Макро: мікроелементи N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, B, Si, Mo

Пластичка поліпропілену діаметром 100 мм

Склад: Органічна частка не менше 55,5 %  
 Азот 2,0 - 2,5 %  
 Фосфор 1,9 - 2,2 %  
 Калій 1,5 - 1,7 %  
 NPK 2,0 - 2,5 - 1,9 - 2,2 : 1,5 - 1,7

Властивості: Екологічність, висока здатність вбирати вологу, зберігати, транспортувати

Висока фізична, хімічна якість (не злепюється, не просідає)

Відсутність наслідків бур'янів, токсичних речовин, важких металів

Можливість індивідуальної корекції рецептури під параметри ґрунту

Відновлення родючості ґрунту, зменшення ґрунтової ерозії

Сертифіковані та внесені в державний реєстр серія А №00875

М.П. № А/1-32106466-001-2003

Від 04.09.2003 р.

Термін зберігання 3 роки

Вага нетто вагаю 3, 5, 20, 40 кг

Виробник за даними сезону 2001 - 2003 рр.

Доза добрива, кг/га (оптимальна в рядку)	Продуктивність, ц/га	Прискірі врожайності, %
110	40	
250	32	
100	27	
100	27	
110220	81,1	
100220	1925	

• один кілограм займає об'єм 1,25 л

Перелік культур	Дозування, грами на кв. м*	Термін внесення
<b>Газонні трави</b>	40 - 50	При сівбі, підживленні
<b>Декоративні</b> лілії півонії троянди тюльпани хризантеми, інші.	50 - 70	Весною на початку вегетації, при підживленні
<b>Деревні</b> горіх груша яблуня, інші.	80 - 100	Весною на початку вегетації, при підживленні
<b>Зернові, бобові</b> горох квасоля кукурудза соняшник соя, інші.	60 - 80	При сівбі, підживленні
<b>Коренеплоди</b> бурак картопля морква, інші.	70 - 90	При посадці, сівбі, при підживленні
<b>Овочеві</b> баклажани капустя кабачки огірки патисони перець редис, інші.	40 - 60	При сівбі, підживленні
<b>Плодово - ягідні</b> виноград малина смукиня смородина, інші.	70 - 90	Весною на початку вегетації, при підживленні
<b>Пряно - смакові</b> мята петрушка укріп цибуля, інші.	40 - 60	При посадці, підживленні

### Якісний склад:

Органічна частка не менше – 55,5%

Азот 2,0 – 2,5%

Фосфор 1,9 – 2,2%

Калій 1,5 – 1,7%

Сертифіковані та внесені в державний реєстр.

ТУУ 24.1-32106466-001-2003



# Розробка енергоресурсозберігаючої технології одержання органо-мінеральних добрив на основі відходів птахівництва

## Фото загального виду



## ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

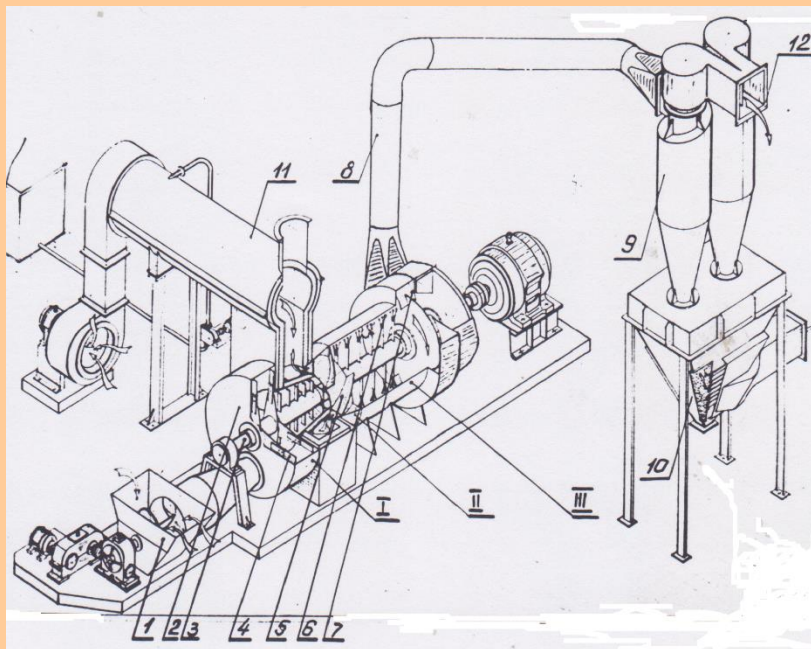
Продуктивність по сировині – до 600 кг/год;  
Початкова волога сировини – до  $W=85\%$ ;  
Кінцева вологість сировини – до  $W=15-18\%$ ;  
Дисперсність готового продукту – 1-3 мм;  
Температура на вході у камеру:  $t=600 - 800^{\circ}\text{C}$ ;  
Питомі енергетичні витрати: до 3500 кДж/кг вип. вологи (800 ккал/кг випареної вологи);

### Масогабаритні характеристики:

Діаметр камери – 1000 мм;  
Довжина камери – 1560 мм;  
Робочий об'єм камери – 1,1775 м<sup>3</sup>;  
Маса камери – 875 кг.

Частота обертів ротора вала – до 700 об/хв;  
Встановлена електрична потужність –  $N=35$  кВт;  
Встановлена теплова потужність – до  $Q=700$  кВт  
(65 м<sup>3</sup>/год).

# Розробка і випробовування дослідної установки одночасного подрібнення та теплової обробки зеленої маси при отриманні складних вітамінізованих кормів для риб (ГОСТ 10385-63)



## Технологічна схема з установкою для сушки зеленої маси:

1 – шнековий живильник; 2 – подрібнювач; 3 – ротор; 4 – диски подрібнювача; 5 – диспергатор; 6 – біли; 7 – доподрібнювач; 8 – повітряводи; 9 – група циклонів; 10 – вузол вивантаження готового продукту; 11 – теплогенератор; 12 – вихід відпрацьованого теплоносія.

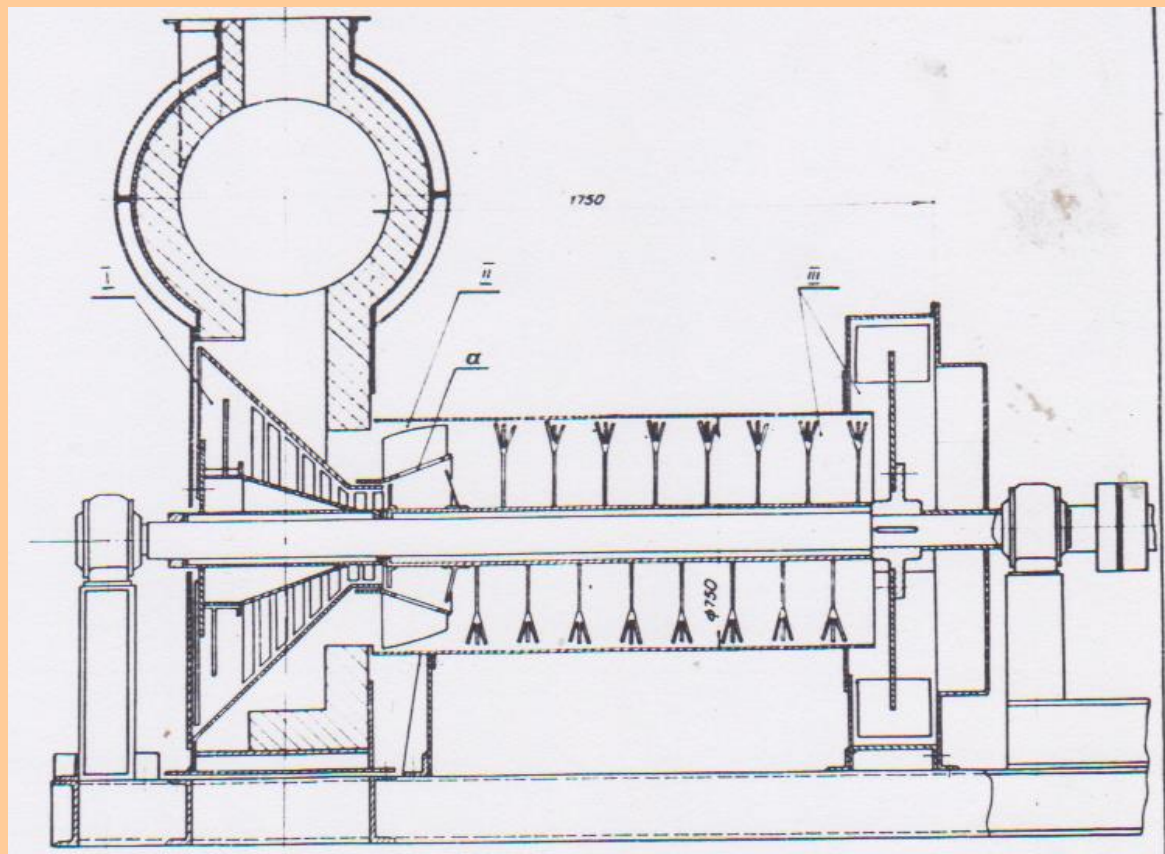
## ТЕПЛОТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Продуктивність по сировині – до 350 кг/год;  
Початкова вологість сировини – до  $W=90\%$ ;  
Кінцева вологість сировини – до  $W=8-12\%$ ;  
Дисперсність готового продукту – 1-3 мм;  
Температура на вході в камеру:  $t=600 - 800^{\circ}\text{C}$ ;  
Пит. витр. енергії: до 3500 кДж/кг вип. вологи (850 ккал/кг випар. вологи);  
Напруження камери по волозі: 350 – 400 кг/м<sup>3</sup> год

## Масогабаритні характеристики:

Діаметр камери – 750 мм;  
Довжина камери – 1750 мм;  
Робочий об'єм камери – 0,8 м<sup>3</sup>;  
Маса камери – 900 кг.  
Частота обертів ротора вала – до 1000 об/хв;  
Встановл. ел. потужність –  $N=25 (14)$  кВт;  
Встановл. теплова потужність – до  $Q=300$  кВт/год.

**Розробка і випробування дослідної установки одночасного подрібнення та теплової обробки зеленої рослинності при отриманні складних вітамінізованих кормів**



**Схема робочої камери в подовжньому розрізі:**

**I, II, III – робочі зони камери;**

**а – вікна в лопатках диспергатора.**



## Результати досліджень втрат каротину в оброблених матеріалах

№ п/п	Сировина			Готовий продукт			
	Назва	Вологість, %	Вміст каротину в мг в перерахунку на 1 кг сухої речовини	Вид	Вологість, %	Вміст каротину в мг в перерахунку на 1 кг сухої речовини	Втрати каротину, %
1	Клевер	80	212	Крупка (1 – 2 мм)	12	208	1,8
2	Суміш клевера і люцерни	83	220	Крупка (1 – 2 мм)	14,5	216	1,8
3	Ботва цукрового буряка	73	61	Крупка (1 – 2 мм)	10	60	1,5
4	Морква (коріння)	89	605	Крупка (1 – 3 мм)	6,2	600	0,85

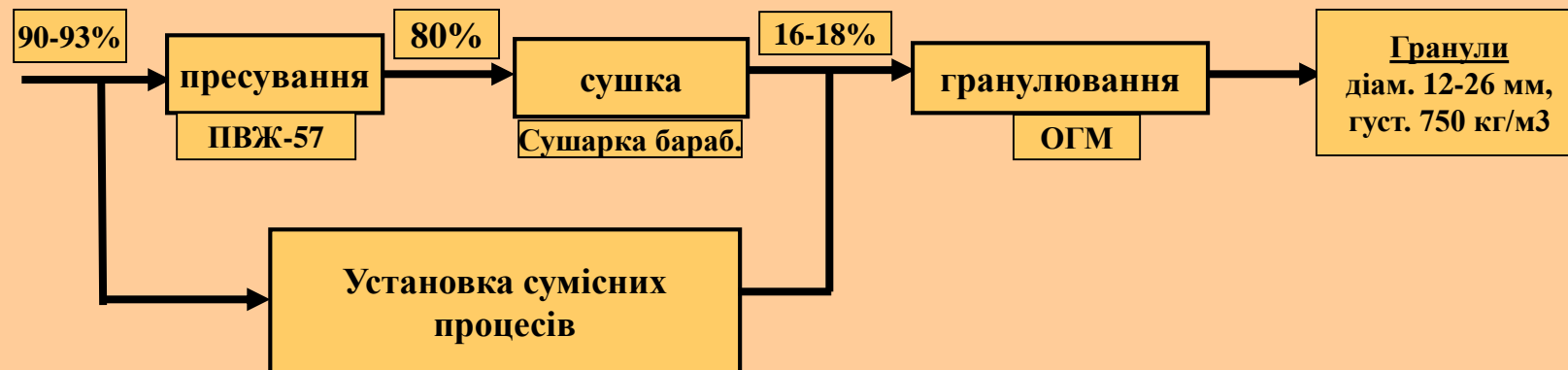
**Сушка зеленої маси в АВМ-0,4 триває 30 – 40 хв. Втрати каротину 20%.**

# Розробка і випробовування дослідно-промислової установки одночасного подрібнення та теплової обробки жома (основного відходу бурякоцукрового виробництва) на тваринний корм (ГОСТ 13456-58)

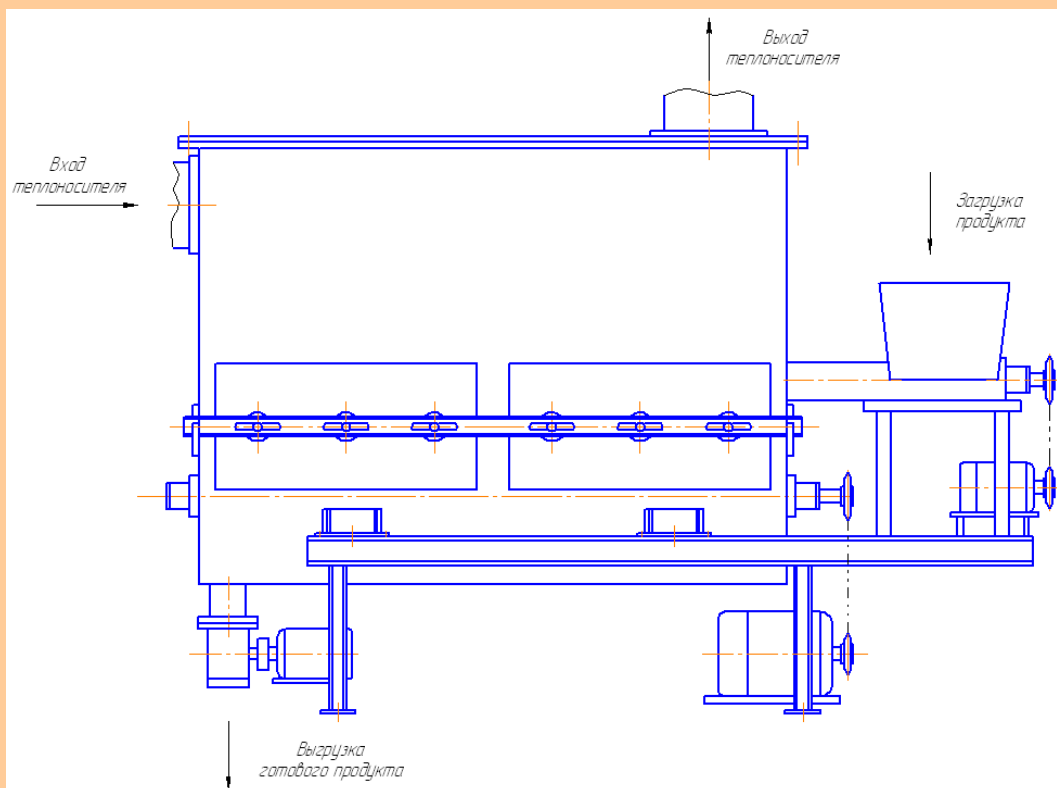
## Результати аналізу, проведеного в лабораторії ВНДЦП

№ п/п	Вид продукту	Колір	Цвіль, %	Волога, %	Цукор, %	Азот, %	Сирий протеїн, %	Окалина у складі мех. домішок, %	Втрати протеїна, %
1	Сирий жом	–	–	85,6	–	1,46	9,13	–	
2	Висуш. жом	сірий	відсутн.	17,2	3,2	1,3	8,6	0,92 (0-2 мм)	5,8

## Технологічна схема отримання жома

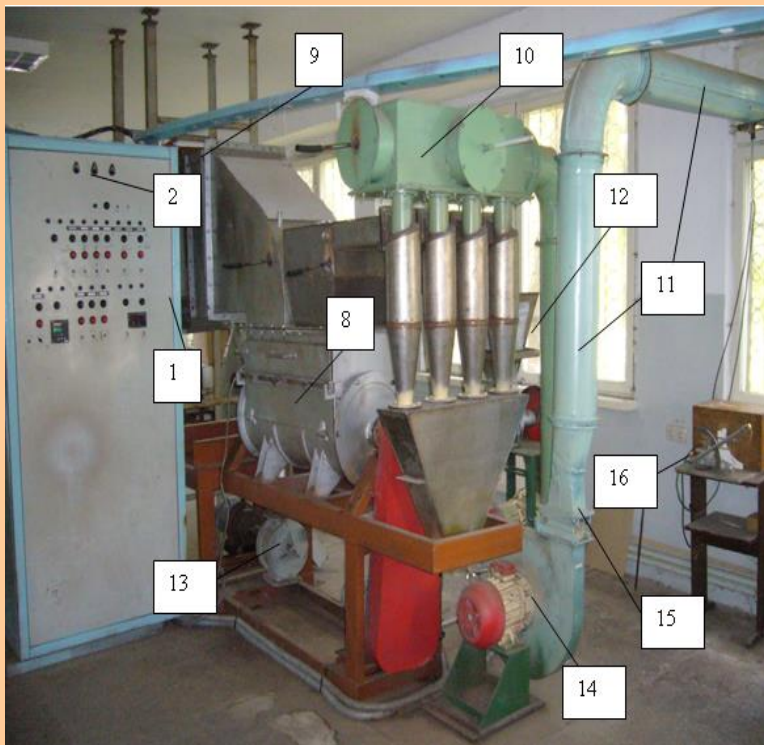


## Загальний вигляд, основні вузли та характеристики розроблених в ІТТФ низькошвидкісних установок сумісних процесів диспергування і сушки



<i>№</i>	<i>Размеры, мм LxVxHxD</i>	<i>Рабочий объем камеры, м³</i>	<i>Температура теплоносителя на входе в камеру, °C</i>	<i>Тепловая мощность, кВт</i>	<i>Производительность по испаренной влаге, кг/час</i>
1	1000x500x700x500	0,6	400	70-100	70
2	2000x400x1400x400	1	400	120-150	120
3	2000x1000x1200x600	2	500	250-300	250
4	3000x1500x1800x900	6	500	750-800	750

## Загальний вигляд дослідно - промислової установки сумісних процесів сушки і диспергування з об'ємом робочої камери $V = 0,6 \text{ м}^3$ .



### ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Об'єм робочої камери сушарки	– 0,6 м <sup>3</sup> .
Продуктивність по матеріалу	– до 200 кг/год.
Діапазон температур теплоносія	– до 400 °С.
Діапазон швидкостей теплоносія	– 0 до 10 м/сек.
Частота обертів ротора вала	– 0 до 120 об./хв.
Електричне обслуговування експериментальної установки 3 ф 380 В.	
Встановлена електрична потужність установки до 100 кВт.	
Режим роботи – циклічно-безперервний.	

**Рис. Загальний вигляд лабораторного стенда:**

**1 – загальний тумблер; 2 – сигнальна лампа; 8 – камера сумісних процесів; 9 – блок електрокалориферів; 10 – блок циклонів; 11 – повітряводи; 12 – живильник; 13 – зона вивантаження; 14 – вентилятор; 15 – шибер; 16 – мікроманометр.**

## Перелік органічних матеріалів, які пройшли технологічні випробовування на установці V=1м3.

<b>№ п/п</b>	<b>Назва матеріалів</b>	<b>Початкова вологість, %</b>	<b>Кінцева вологість, %</b>
<b>1</b>	<b>Шкаралупа з яєць</b>	<b>40 – 60</b>	<b>12 – 4</b>
<b>2</b>	<b>Мінерально-білкова маса інкубаційних ліній (фарш)</b>	<b>90</b>	<b>10 – 5</b>
<b>3</b>	<b>Відходи м'ясопереробної промисловості (фарш)</b>	<b>90</b>	<b>8 – 6</b>
<b>4</b>	<b>Відходи шкіряного виробництва</b>	<b>70</b>	<b>8 – 4</b>

# Загальний вигляд дослідно - промислової установки сумісних процесів сушки і диспергування з об'ємом робочої камери $V = 2 \text{ м}^3$ .

## ПРОЕКТНІ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ (виробництва органо-мінеральних добрив з використанням відходів птахівництва та біомаси, як енергоносія):

Річний об'єм гранульованих добрив – 5,5 тис. тон;  
Річний об'єм переробки відходів – до 8,0 тис. тон;  
Об'єм використання біомаси (деревини) – до 1200 м<sup>3</sup>/рік.

## ПРОЕКТНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РОТОРНОЇ СУШАРКИ:

Продуктивність по сировині – до 1000 кг/год;  
Початкова вологість сировини – до  $W=45\%$ ;  
Кінцева вологість продукту – до  $W=14-18\%$ ;  
Температура на вході в камеру:  $t=250 - 500^\circ\text{C}$ ;  
Питомі енергетичні показники: до 4000 кДж/кг вип. вологи (900 ккал/кг вип. вологи);  
Частота обертів ротора вала – до 150 об/хв.;  
Встановлена електрична потужність –  $N=9,5 \text{ кВт}$ ;  
Встановлена теплова потужність – до  $Q=300 \text{ кВт}$ .



# ПАТЕНТИ УКРАЇНИ

(на корисну модель)

1. Патент № 30802. Спосіб одержання гранульованих біодобрих з шламових зливів.

2. Патент № 49454. Сушарка для пастоподібних матеріалів.

3. Патент № 63874. Спосіб одержання гранульованих органо-мінеральних добрив.

4. Патент № 81996. Спосіб переробки курячого посліду на підстилці.

5. Патент № 63874. Спосіб одержання гранульованих органо-мінеральних добрив.

6. Патент № 81997. Спосіб переробки нативного курячого посліду.

7. Патент № 93564. Спосіб переробки рідких органічних відходів.

8. Патент № 103814. Спосіб переробки відходів деревини.

9. Патент № 103815. Установа для сушіння подрібненої деревини.



# Основні результати та висновки

1. Вперше проведено комп'ютерне моделювання, яке в широкому інтервалі зміни режимних параметрів описує процеси теплообміну, динаміки та концентрації твердої фази, що відбуваються в камері сумісних процесів.
2. Визначені фізико-механічні та теплофізичні властивості сировини і готового продукту на основі курячого посліду та інших матеріалів.
3. Дериватографічним дослідженням вперше визначено межі температури займання термолабільного матеріалу, який досліджується, що має вирішальне значення при високотемпературній обробці.
4. Вперше в камері сумісних процесів отримано залежність площі поверхні контакту фаз від числа обертів ротора, як  $(f/Vk)=f(Fr)$ .
5. Вперше для камери сумісних процесів отримані залежності критерію  $Nu=f(Re)$  і  $Nu=f(Fr)$ .
6. Запропонованим способом з термолабільного матеріалу вперше одержані якісні органо-мінеральні добрива при температурі теплоносія на вході в камеру 600 – 800°C і швидкості обертів ротора вала 650 – 700 об/хв. з виключенням адгезії матеріалу до робочої поверхні.
7. Вперше розроблено методику теплотехнічного розрахунку робочої камери установки сумісних процесів сушіння та подрібнення для термолабільного матеріалу з характерними властивостями до адгезії, яка дозволяє підбирати оптимальні режими сушіння для уникнення адгезії матеріалу до поверхонь установки та мінімізувати енергетичні витрати на сушіння ( $q=3500$  кДж/кг випареної вологи).
8. Розроблено промислову установку сумісних процесів в складі технологічної лінії для виробництва органо-мінеральних добрив продуктивністю 2300 т/рік. Результати експлуатації підтвердили зменшення енергетичних витрат на сушіння в межах 25 – 30 %, що дає економію природного газу при широкому впровадженні до 0,3 – 0,5 млрд. м<sup>3</sup> у рік. Установка впроваджена на підприємстві ТОВ «ЕКОТЕРРА» (Акт промислових випробувань).
9. Продукція відповідає ТУУ 24.1-32106466-001-2003. Якісний склад добрив: органічна частка не менше – 55,5%; азот 2,0 – 2,5%; фосфор 1,9 – 2,2%; калій 1,5 – 1,7%. Новизна запропонованих рішень підтверджена 2 патентами України на корисну модель.