



НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ  
ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

*Інженерно-хімічний факультет*

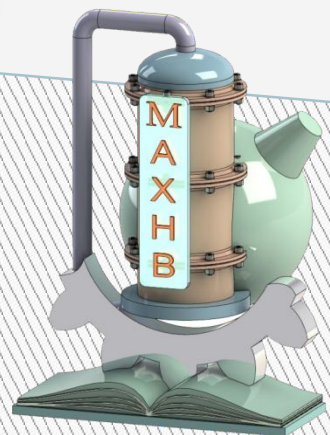
Кафедра машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв

## ПРОЦЕС СУШІННЯ ТОНКОДИСПЕРСНОЇ ПАСТИ ДІОКСИДУ ТИТАНУ

Спеціальність: 05.17.08 – Процеси та обладнання хімічної технології

Здобувач: асистент Гробовенко Я.В.

Науковий керівник: к.т.н., проф. Марчевський В.М.



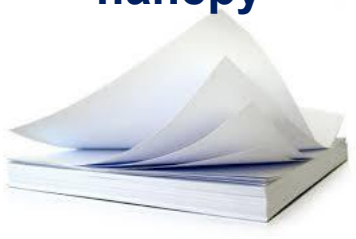
www.kpi.ua

# Області застосування пігменту $TiO_2$



Наповнювач і барвник у фармацевтичній та харчовій галузі

Наповнювач і барвник для паперу



Виробництво пластику



Виробництво посуду та одягу

Виробництво лаків та фарб



Виробництво косметики



# Способи отримання пігменту $TiO_2$

3



Рисунок 1 – Схема отримання пігменту  $TiO_2$

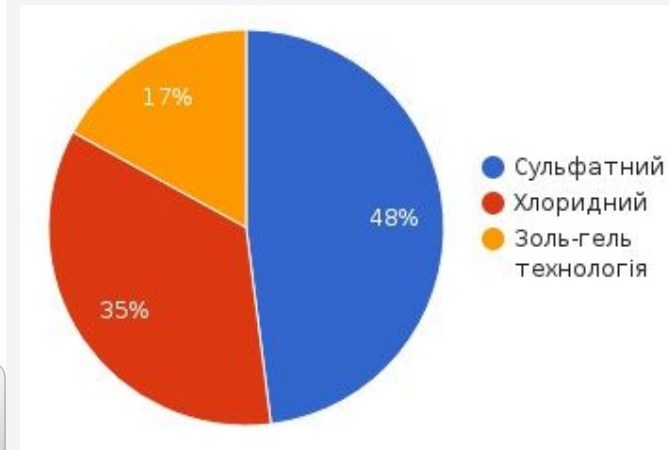
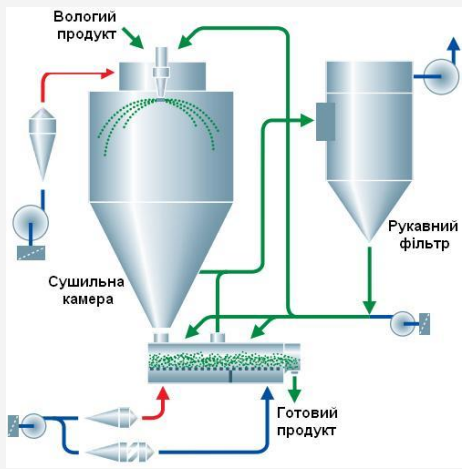


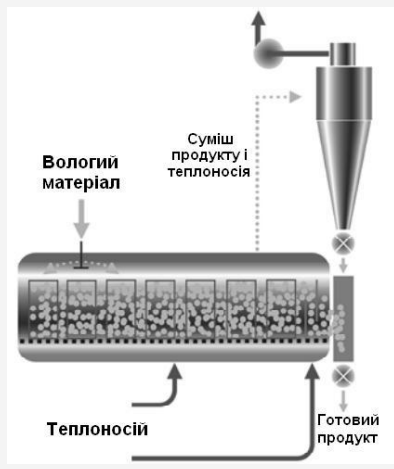
Рисунок 2 – Способи Отримання пігменту  $TiO_2$

# Актуальність роботи

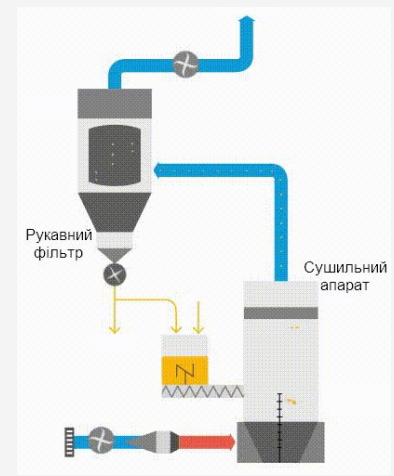
1. Зменшення затрат теплової енергії, що витрачається на сушіння пастоподібних продуктів:



**Рисунок 3 - Розпилююча сушарка:**  
 Початкова вологість матеріалу: 70%



**Рисунок 4 - Сушарка КШ:**  
 Початкова вологість матеріалу: 60%



**Рисунок 5 - Вихрова сушарка типу «Флеш»:**  
 Початкова вологість матеріалу: 50%

- 2. Збільшення швидкості сушіння пастоподібних продуктів.
- 3. Підвищення якості та забезпечення низької залишкової вологості готового продукту.

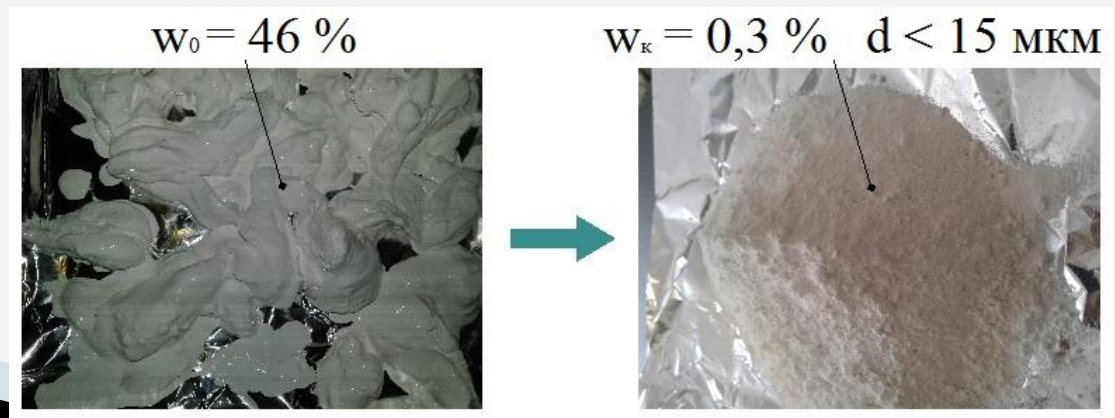
# Науково-технічна задача роботи

Суть науково-технічної задачі полягає в отриманні тонкодисперсного порошку діоксиду титану із пасти  $TiO_2$  при дотриманні технічних вимог державних стандартів, що висуваються до готового продукту

Таблиця 1 – Технічні вимоги до пігменту  $TiO_2$  згідно ДСТУ 30333:2009

Величина	Значення
Залишкова вологість $w$ , %	0,3
Розмір частинок $d$ , мкм	$\leq 15$
Білизна, ум. од.	97,0

Рисунок 6 – паста  $TiO_2$  і тонкодисперсного порошку діоксиду титану



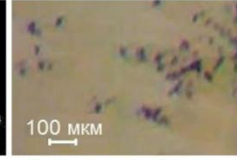


# Науково-технічна ідея роботи

6



Паста  $TiO_2$

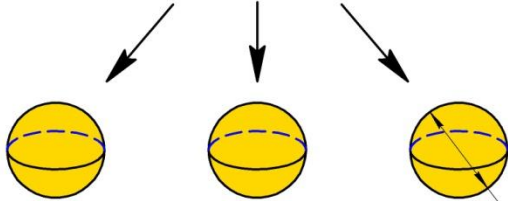


$$W_K \leq 0,3\%$$

$$d_1 \leq 15 \text{ мкм}$$

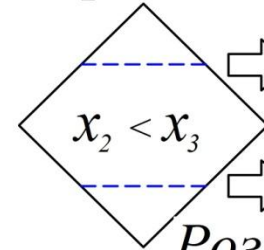
Формування  
агломератів

$W_0$



$$d_0 \approx 4 \text{ мм}$$

Готовий  
продукт  $TiO_2$



Відпрацьований  
теплоносії,  $x_3, \frac{\text{кг}}{\text{кг}}$

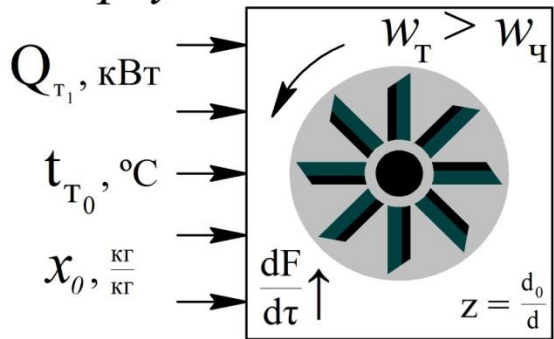
Розділення

Сушіння та  
диспергування

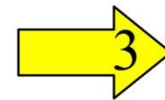
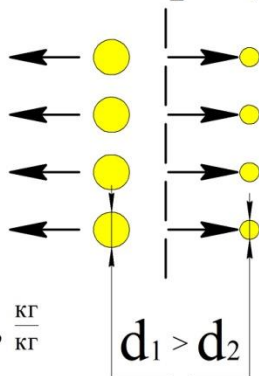


$$x_0 < x_1$$

$z$  - ступінь подрібнення



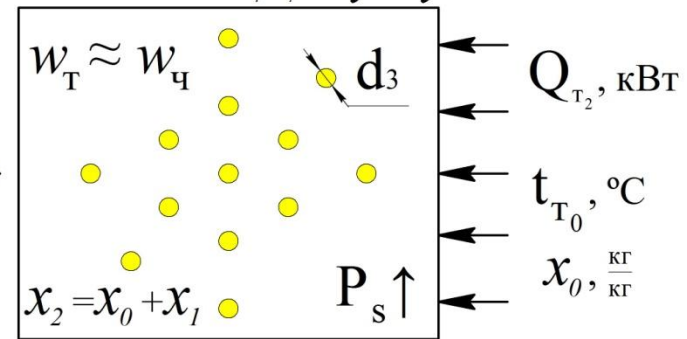
Сепарація



$$x_2 < x_1$$



Досушування



поверхнева волога

адсорбційно-зв'язана волога

## Мета дослідження:

Встановити кінетичні закономірності процесу сушіння тонкодисперсної пасти  $\text{TiO}_2$  та основні технологічні параметри, що необхідні для проектування промислових сушильних установок

## Об'єкт дослідження:

Процес сушіння тонкодисперсної пасти діоксиду титану у вихровому сушильному апараті

## Предмет дослідження:

Кінетика процесу сушіння пасти діоксиду титану та параметри процесу, що необхідні для проектування промислових сушильних установок

## Задачі дослідження:

- 1. Науково обґрунтувати та експериментально підтвердити спосіб поєднання процесів сушіння і подрібнення пасти  $\text{TiO}_2$  та досушування тонкодисперсних частинок діоксиду титану в одному сушильному апараті вихрового типу.**
- 2. Обґрунтувати фізичну і розробити математичну моделі процесів сушіння та досушування тонкодисперсної пасти діоксиду титану у вихрових потоках теплоносія.**
- 3. Отримати кінетичні закономірності та основні параметри процесу сушіння пасти діоксиду титану, що необхідні для проектування промислових сушильних установок.**
- 4. Теоретично визначити поля тангенційних і осьових швидкостей та тисків вихрових потоків теплоносія.**
- 5. Експериментально визначити вплив безперервного подрібнення частинок матеріалу у псевдозрідженому шарі на швидкість сушіння пасти діоксиду титану.**



- 6. Сформулювати фізичну модель сепарації тонкодисперсних частинок  $\text{TiO}_2$  у вихровому потоці теплоносія.**
- 7. Встановити найбільш раціональні параметри здійснення процесу сушіння пасти і досушування тонкодисперсних частинок матеріалу до залишкової вологості 0,3 %.**
- 8. Визначити конструктивно-технологічні параметри сушильної конусоподібної камери, що забезпечують умови створення вихрових потоків теплоносія і сепарації частинок матеріалу  $\text{TiO}_2$ .**
- 9. На основі результатів експериментальних досліджень підтвердити адекватність математичної моделі процесів сушіння та досушування пасти діоксиду титану.**
- 10. Розробити методику та скласти алгоритм і програму розрахунку промислового сушильного апарату.**
- 11. Впровадити результати роботи.**

- 1. Вперше обґрунтовано та експериментально підтверджено спосіб поєднання сушіння пасти  $\text{TiO}_2$  і досушування тонкодисперсних частинок порошку діоксиду титану в одному сушильному апараті вихрового типу.**
- 2. Вперше отримано кінетичні закономірності і основні параметри процесу сушіння ( $U$ ,  $w$ ,  $t$ ,  $\tau$ ) пасти діоксиду титану, необхідні для проектування промислових сушильних установок.**
- 3. Теоретично визначено поля швидкостей  $W$  та тисків  $P$  вихрових потоків теплоносія.**
- 4. Експериментально виявлено вплив безперервного подрібнення часток  $dS/dt$  вихрового шару на швидкість сушіння пасти діоксиду титану.**
- 5. Сформульовано фізичну модель сепарації тонкодисперсних частинок  $\text{TiO}_2$  у вихровому потоці теплоносія, який утворюється в розробленому сушильному апараті.**

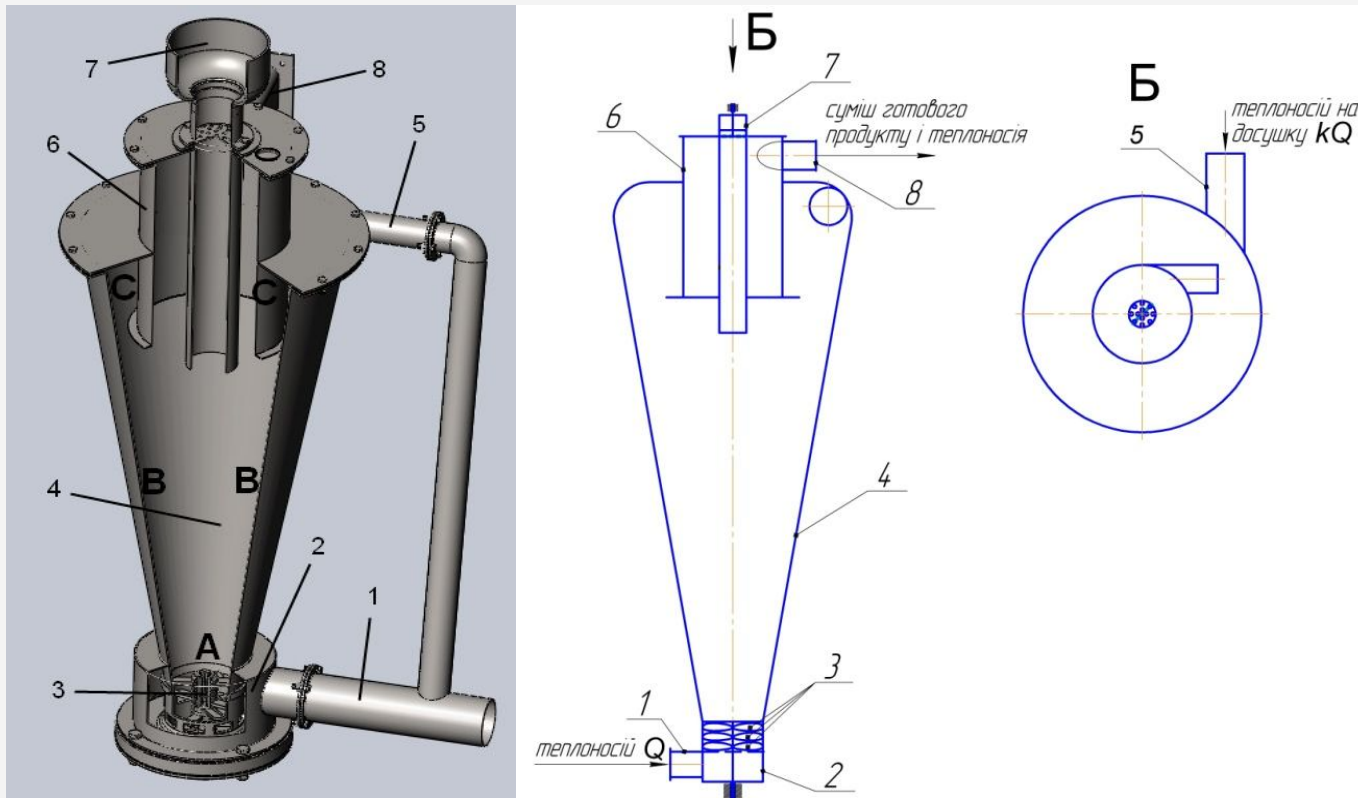
# Практична новизна

1

1

1. Сформульовано послідовність процесів, які забезпечують високу якість кінцевого продукту діоксиду титану з низьким залишковим вмістом вологи;
2. Встановлено найбільш раціональні параметри здійснення процесу сушіння пасти і досушування тонкодисперсних частинок до залишкової вологості 0,3%;
3. Експериментально отримано значення коефіцієнта подрібнення  $K_z$  агломератів пасти діоксиду титану, що дозволило розрахувати математичну модель процесу сушіння матеріалу  $TiO_2$ ;
4. Визначено конструктивно-технологічні параметри сушильної конусоподібної камери, що забезпечують умови створення вихрових потоків теплоносія і сепарації частинок пасти  $TiO_2$ ;
5. Розроблено методику та складено алгоритм і програму розрахунку промислового сушильного апарату, продуктивністю 500 кг/год по випареній волозі, для здійснення процесу сушіння пасти  $TiO_2$  у вихровому потоці теплоносія;
6. За результатами досліджень розроблено конструкцію промислового сушильного апарату, на яку отримано 4 патенти України на корисну модель;
7. Створено дослідну сушильну установку для дослідження кінетики сушіння пастоподібних матеріалів у вихровому потоці теплоносія із безперервним подрібненням висушуваного матеріалу;
8. Науково-технічні результати дисертаційної роботи впроваджено в сушильному обладнанні ТОВ «Мілкіленд» і ТОВ «Лакі-Фарма», а також у навчальний процес кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв інженерно-хімічного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського.

# Схема розробленого сушильного апарату, Патент UA №108688



1 – основний патрубок для подачі теплоносія; 2 – дифузор; 3 – диспергатор;  
 4 – сушильна камера; 5 – патрубок для подачі теплоносія в зону досушування;  
 6 – циліндр сепарації; 7 – система подачі вологого продукту; 8 – вихідний патрубок;  
**А – зона диспергування; В – зона розділення фракцій; С – зона інтенсивного досушування**

Рисунок 7 – Схема оригінального сушильного апарату

# Теоретичні дослідження гідродинаміки сушильного апарату 13

## сушильного апарату

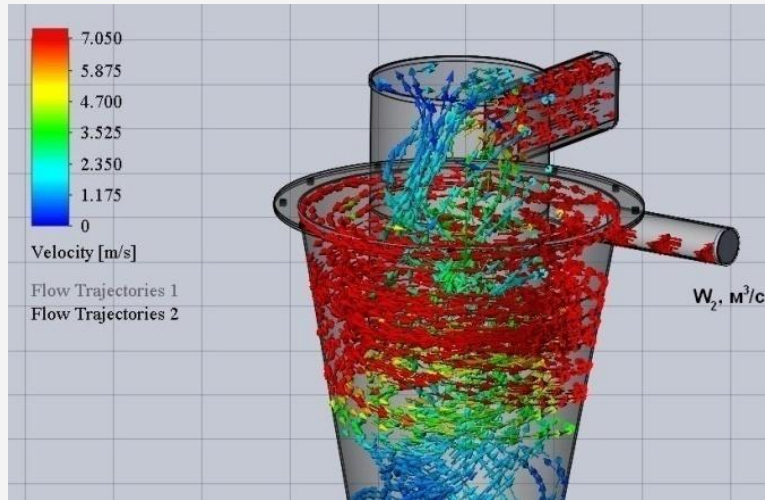


Рисунок 8 – Подача теплоносія на досушування

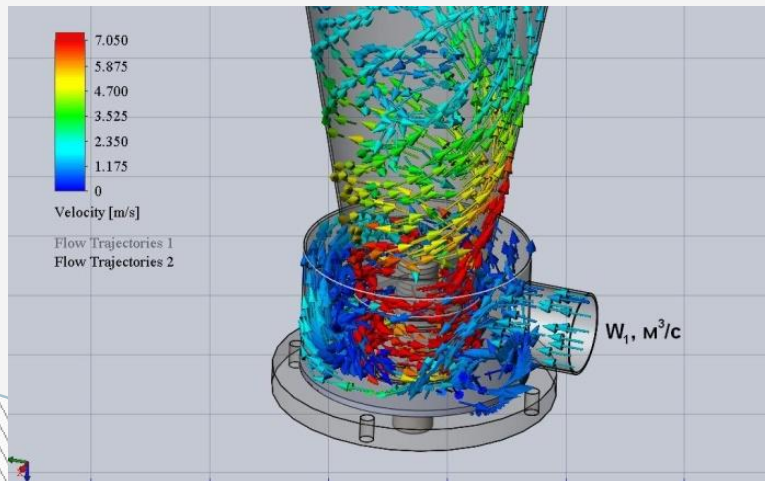


Рисунок 9 – Основна подача теплоносія

$$W = W_1 + W_2, \quad W_2 = k \cdot W_1 \quad (1)$$

$k$  – коефіцієнт подачі кількості теплоносія на досушування, визначається із теплового та матеріального балансів

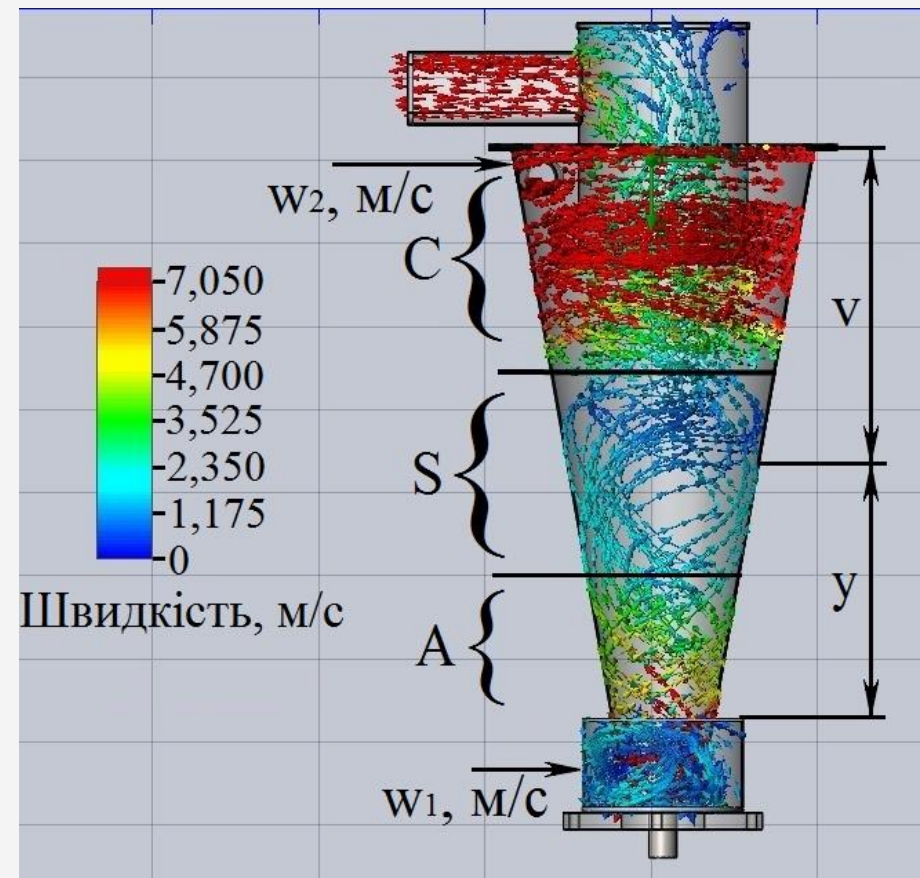


Рисунок 10 – Робочі зони сушильного апарату



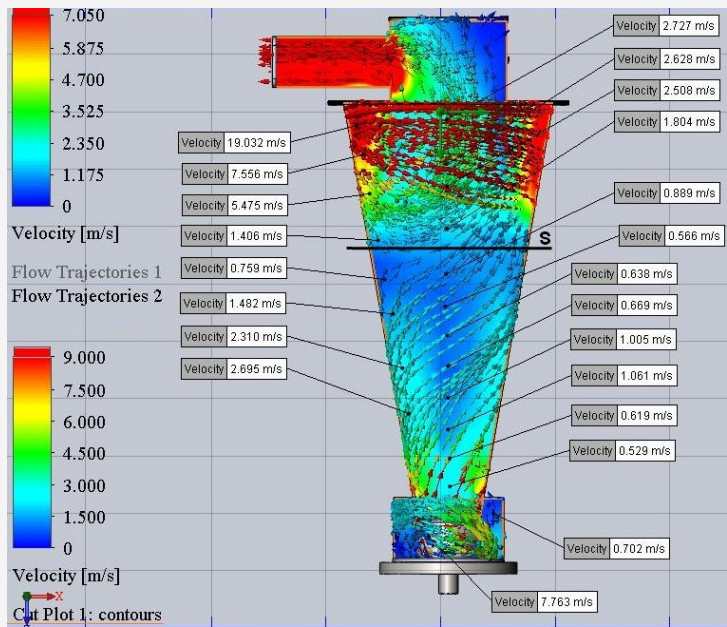


Рисунок 11 –  
Схема потоків теплоносія при відношенні витрат теплоносія  $W_1:W_2 = 1:1,5$

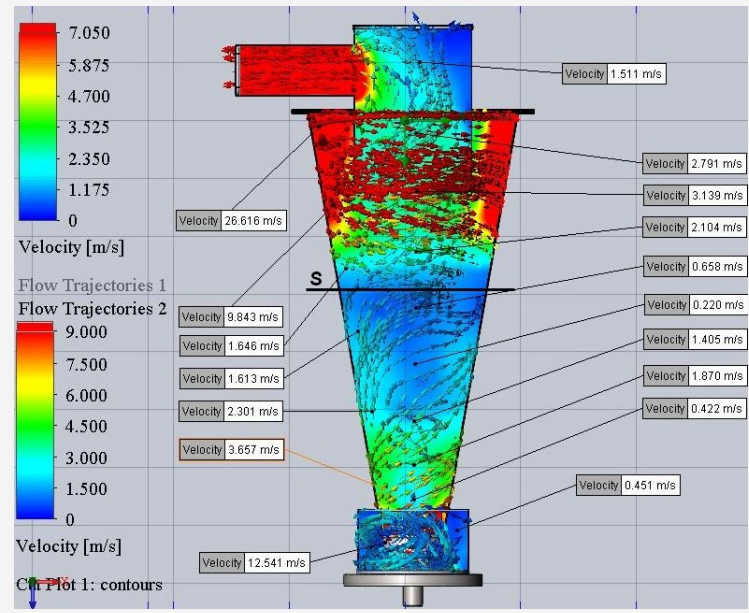


Рисунок 12 – Схема потоків теплоносія при відношенні витрат теплоносія  $W_1:W_2 = 1:2,5$

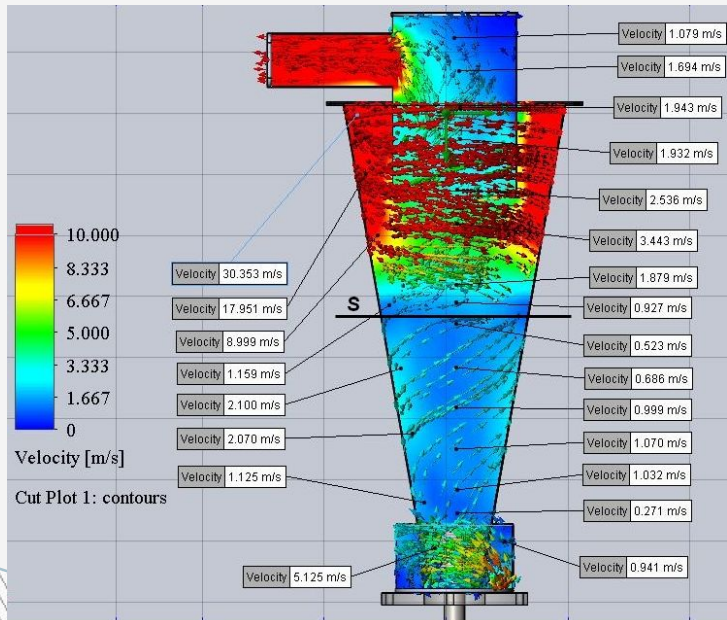


Рисунок 13 – Схема потоків теплоносія при відношенні витрат теплоносія  $W_1:W_2 = 1:4$

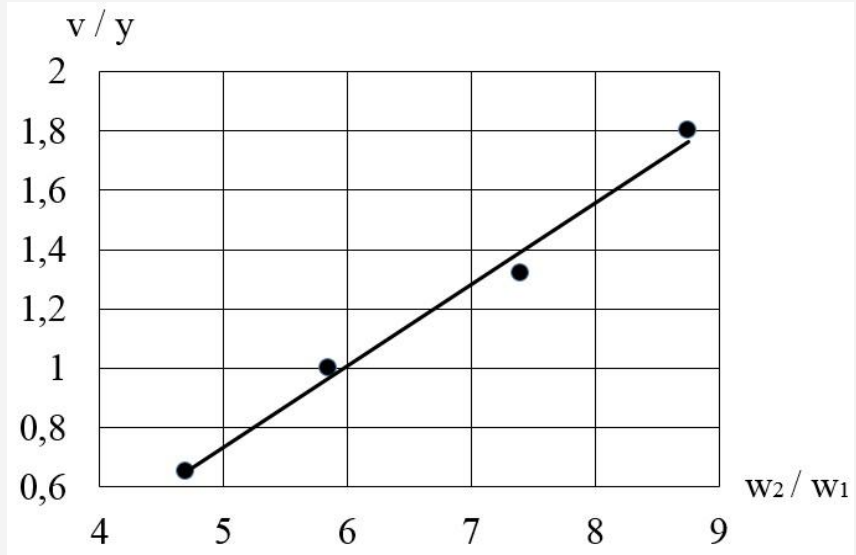
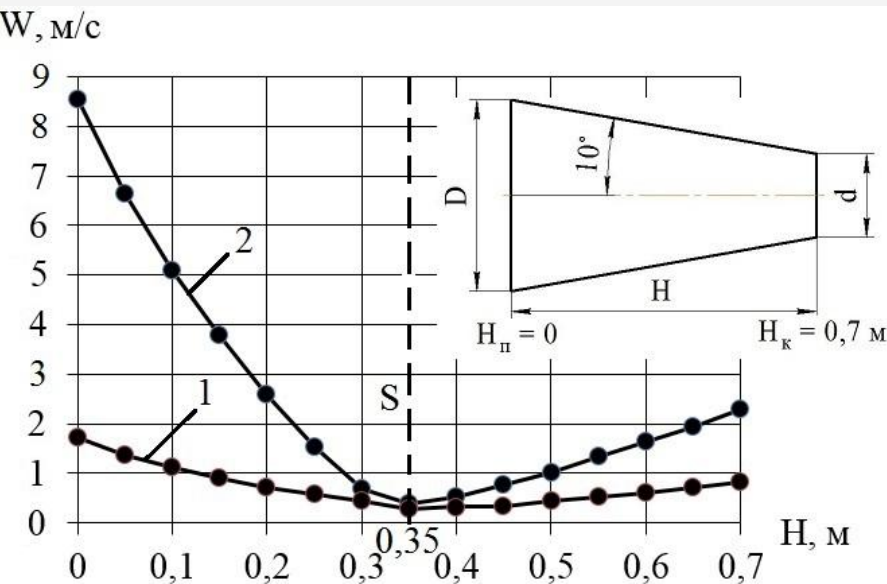


Рисунок 14 – Залежність розміщення зони S від витрат теплоносія





1 – тангенційна; 2 -осьова

Рисунок 15 – Зміна швидкостей по висоті камери

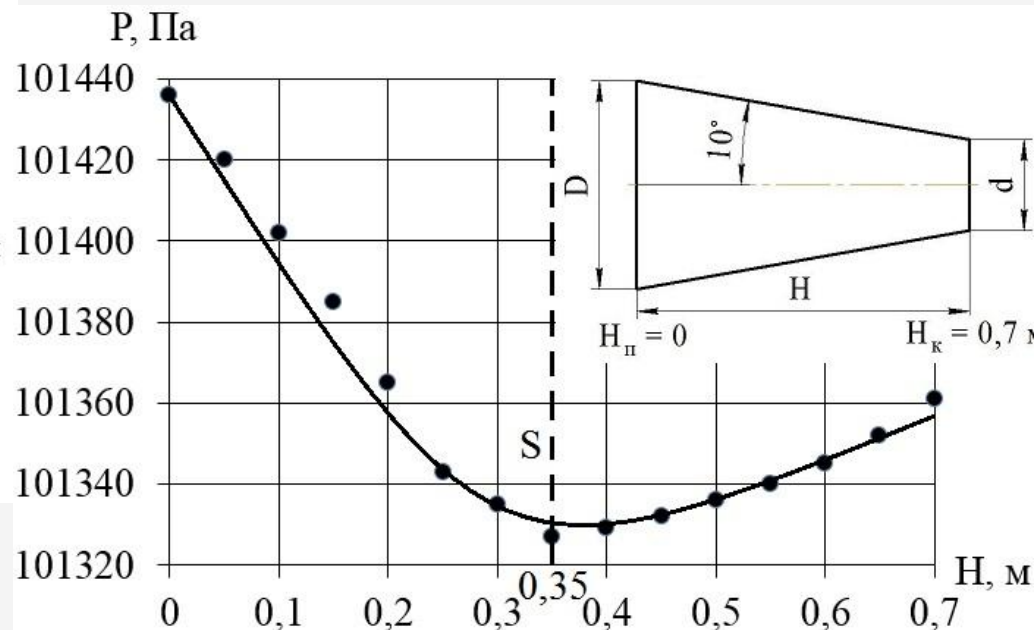


Рисунок 16 – Зміна тиску по висоті камери

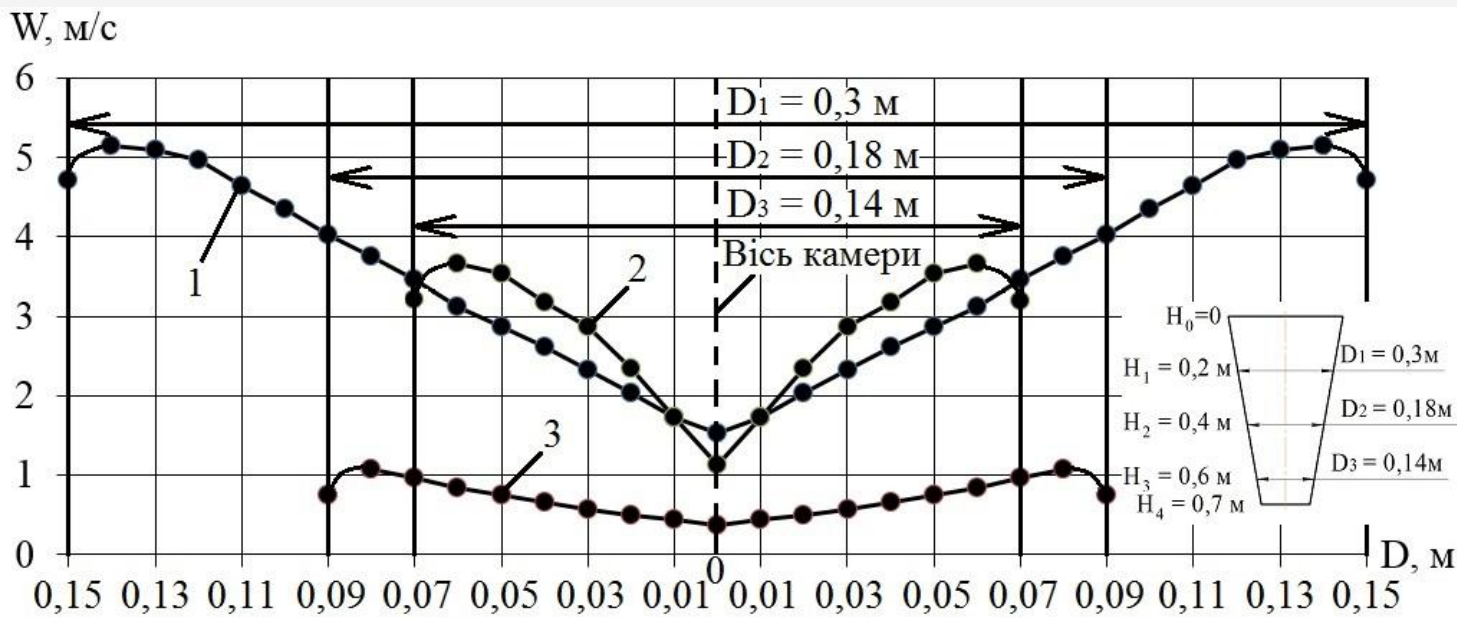
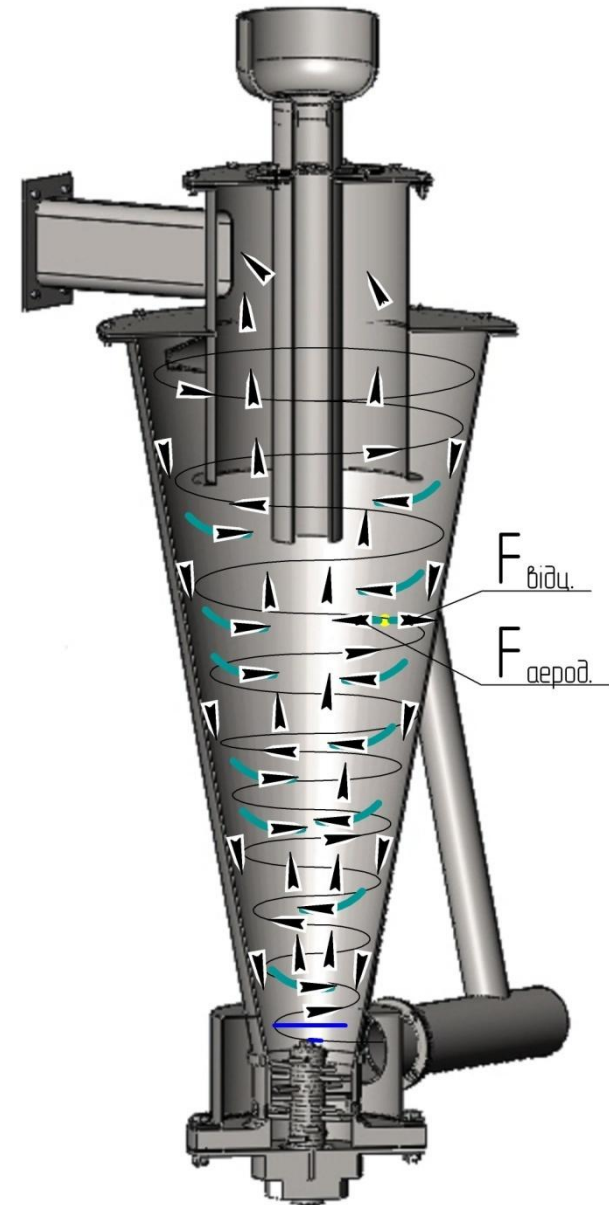


Рисунок 17 – Зміна швидкостей по діаметру камери

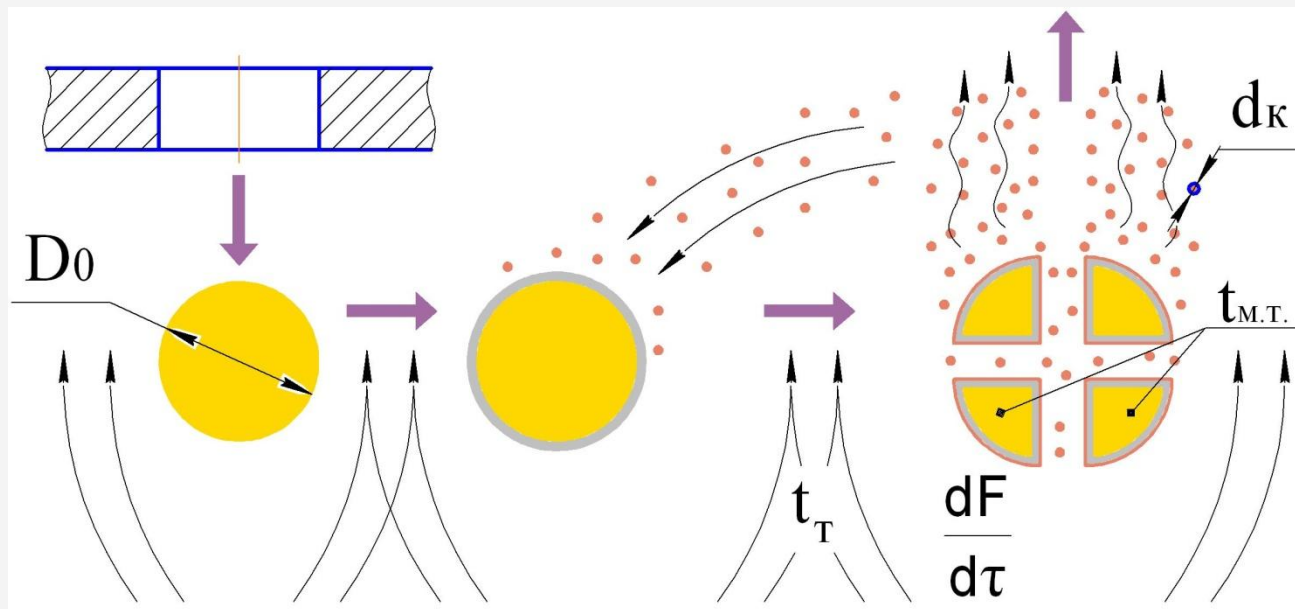
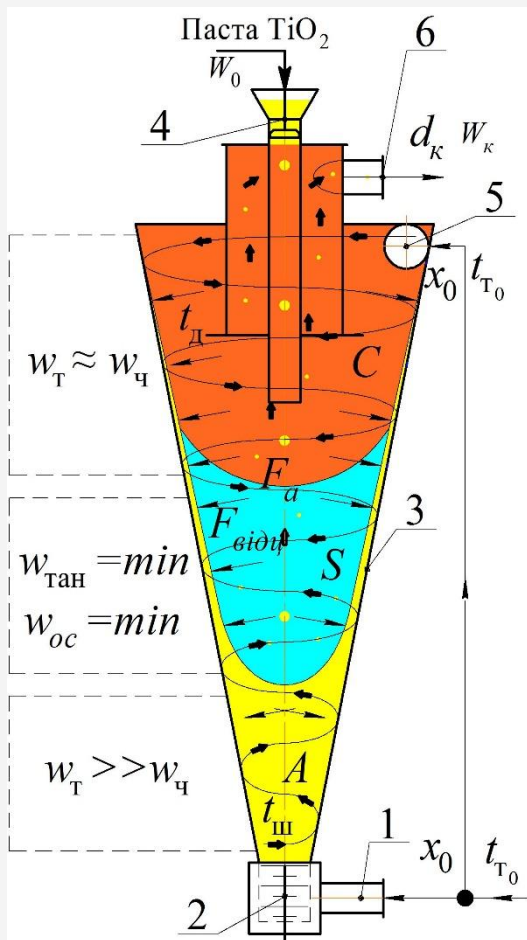
# Сепарація тонкодисперсних частинок

16

1. Висхідний завихрений потік теплоносія, закручується ножами диспергатора і створює над ножами вихровий шар підсушеного продукту.
2. Дрібна фракція продукту із вихрового шару виноситься вертикальною складовою вихрового потоку.
3. З потоку, по мірі його підймання, випадають частинки сила тяжіння яких перевищує аеродинамічну силу.
4. Через дотичний патрубок в зону досушування подається тангенційний потік теплоносія, який інтенсивно обертається і створює тиск над поверхнею сушильної камери.
5. В результаті конічної форми сушильної камери тиск зменшується від верхнього патрубку до зони диспергування.
6. Частина верхнього вихрового потоку із радіальною швидкістю переміщається в центральний висхідний потік.
7. Тангенційна швидкість створює відцентрову силу  $F_{\text{відц.}}$ , а радіальна складова швидкості створює аеродинамічну силу  $F_{\text{аерод.}}$ .



# Фізична модель процесу сушіння тонкодисперсної пасти $\text{TiO}_2$



$$K = \beta_D \quad (2)$$

Опір масопровідності всередині частинок практично не впливає на процес сушіння, швидкість якого повністю визначається дифузією у зовнішній області

# Математична модель процесу сушіння тонкодисперсної пасти $TiO_2$

За основу взято математичні моделі: К. Валентаса, Е. Ротштейна, П. Сіта

$$dq = dq_1 + dq_2 \quad j = \frac{dW}{S \cdot d\tau} = \beta_D \cdot (C_{п.п.} - C_T) \quad \frac{dW_1}{d\tau} = \beta_p(t_T) \cdot S \cdot (P_s - p_T) \quad (3)$$

$$Nu_1 = 2 + 0,16 \cdot Re_p^{0,667} \quad \beta_D = \frac{Nu_D \cdot D}{d_{екв.}} \quad \beta_p = \frac{\beta_D}{R_{п.} \cdot t_T} \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial t_M}{\partial \tau} = \frac{\alpha_1 \cdot S(z, \tau_{п.}) \cdot (t_{T0} - t_{M.T.}) - \frac{\partial W_1}{\partial \tau} \cdot r}{G_M \cdot c_M(t_M)} \\ \frac{dW_1}{d\tau} = \beta_p(t_T) \cdot S(z, \tau_{п.}) \cdot (P_s - p_T) \\ \frac{dz}{d\tau} = K_Z \cdot z \\ dS = \frac{6 \cdot G_M \cdot dz(\tau_{п.})}{\psi \cdot \rho_M \cdot d_{екв.0}} \end{array} \right. \quad (5)$$

$$\alpha_1 = 50 \dots 100 \frac{Вт}{м^2К} \quad K_Z = 0,257 \frac{1}{с} \quad (6)$$

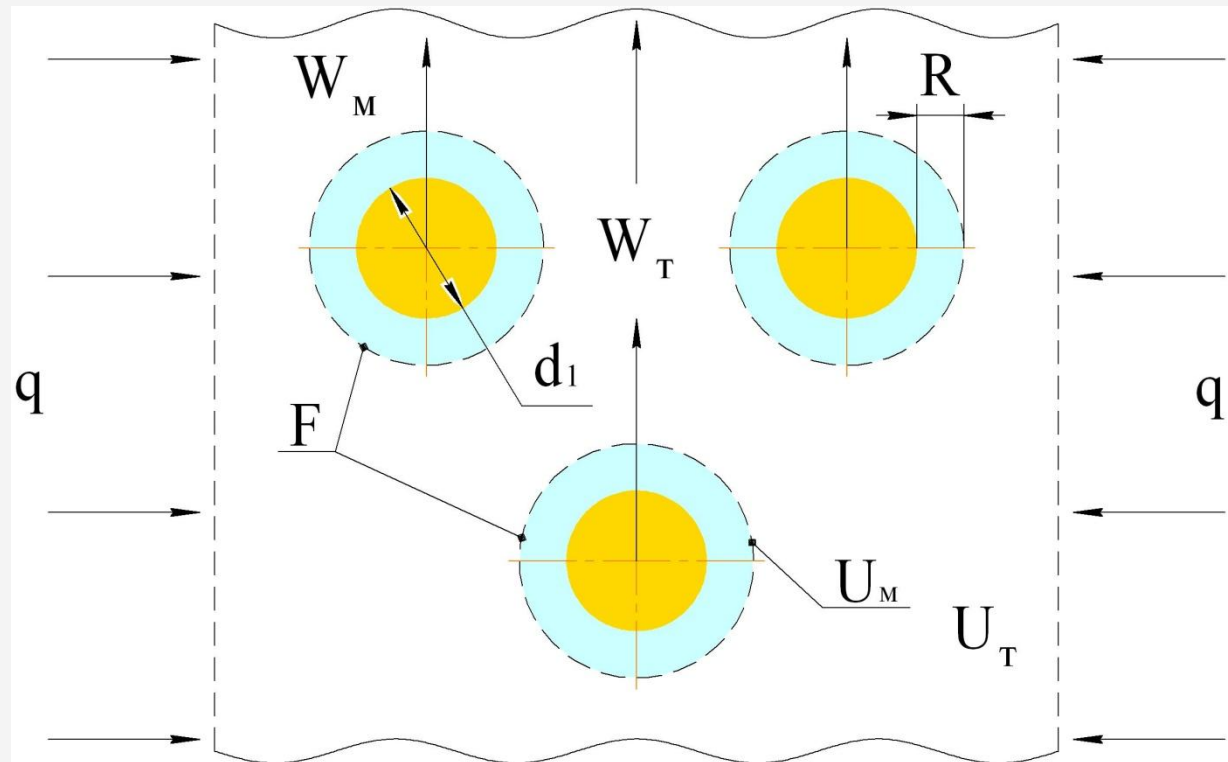
# Фізична модель процесу досушування тонкодисперсних частинок $TiO_2$ 19

- $F$  – загальна поверхня досушування;
- $W_T$  і  $W_C$  – швидкість теплоносія і частинок  $TiO_2$ ;  
 $W_T \approx W_C$

Рухомою силою є:

$$\Delta C = U_{\text{част.}} - U_{\text{с.а.}}$$

Процес досушування частинок лімітується швидкістю дифузії вологи із поверхні частинок матеріалу в об'єм теплоносія



$$Bi = \frac{\alpha_2 \cdot d_{\text{екв.}}}{\lambda} \leq 0,1 \quad (7)$$

Процес досушування лімітується швидкістю дифузії вологи із поверхні частинок в об'єм теплоносія

# Математична модель процесу досушування тонкодисперсних частинок

$$dQ_{\text{нагр.}} = dQ_{\text{заг.}} - dQ_{\text{вип.}}, \quad dQ_{\text{с.а.}} = dQ_{\text{част.}} \quad (8)$$

$$Nu_{\text{д}} = 2, Re_p = 0 \quad \beta'_{\text{д}} = \frac{2 \cdot D}{d_{\text{екв.}}} \approx 43 \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad (9)$$

$$\beta_x = \frac{\beta'_{\text{д}} \cdot p'_{\text{т}}}{R_{\text{т}} \cdot t'_{\text{т}}} \quad \alpha_2 = 4350 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \quad (10)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial t'_{\text{м}}}{\partial \tau} = \frac{\alpha_2 (d_{\text{екв.}}) \cdot S_{\text{дос.}} \cdot (t'_{\text{т0}} - t'_{\text{м}})}{y \cdot \rho_{\text{м}}(t'_{\text{м}}) \cdot c_{\text{м}}(t'_{\text{м}})} - \frac{\partial W_{2.r}}{\partial \tau} \cdot r}{c_{\text{м}}(t'_{\text{м}})} \\ \frac{\partial t'_{\text{т}}}{\partial \tau} = \frac{\alpha_2 (d_{\text{екв.}}) \cdot S_{\text{дос.}} \cdot (t'_{\text{т0}} - t'_{\text{м}})}{(1-y) \cdot \rho_{\text{т}}(t'_{\text{т}}) \cdot c_{\text{т}}(t'_{\text{т}})} \\ \frac{dW_2}{d\tau} = \beta_x(t'_{\text{т}}) \cdot S_{\text{дос.}} \cdot (U_{\text{ч}} - x'_{\text{т}}) \end{array} \right. \quad (11)$$

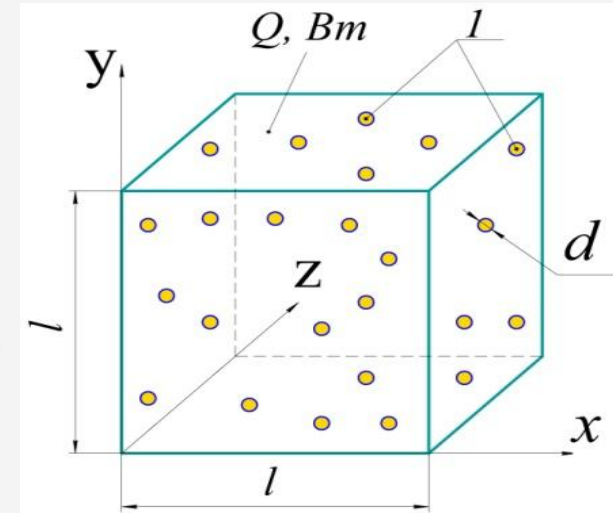


Рисунок 18 – Схема виділеного об'єму для тонкодисперсних частинок та частинка  $\text{TiO}_2$  в зоні досушування



# Розв'язання математичної моделі процесу сушіння пасти діоксиду титану

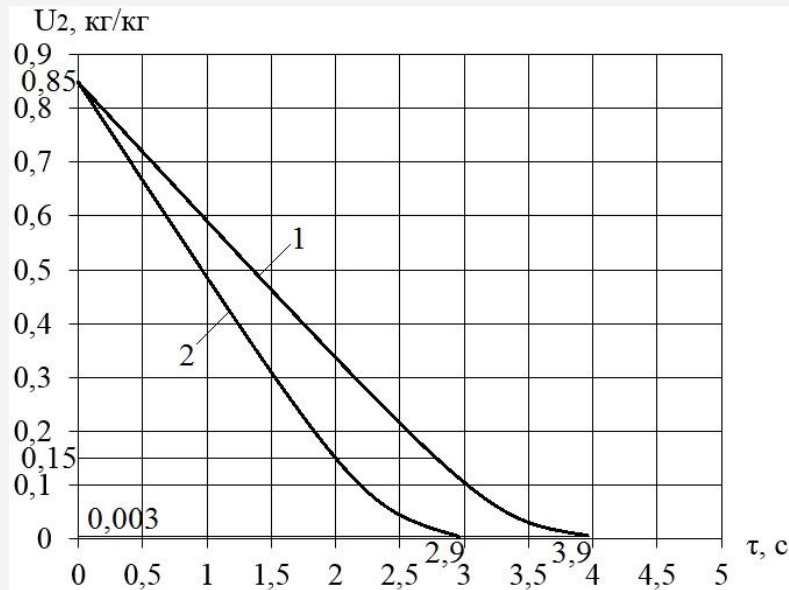


Рисунок 19 – Графічна залежність вологовмісту від часу сушіння

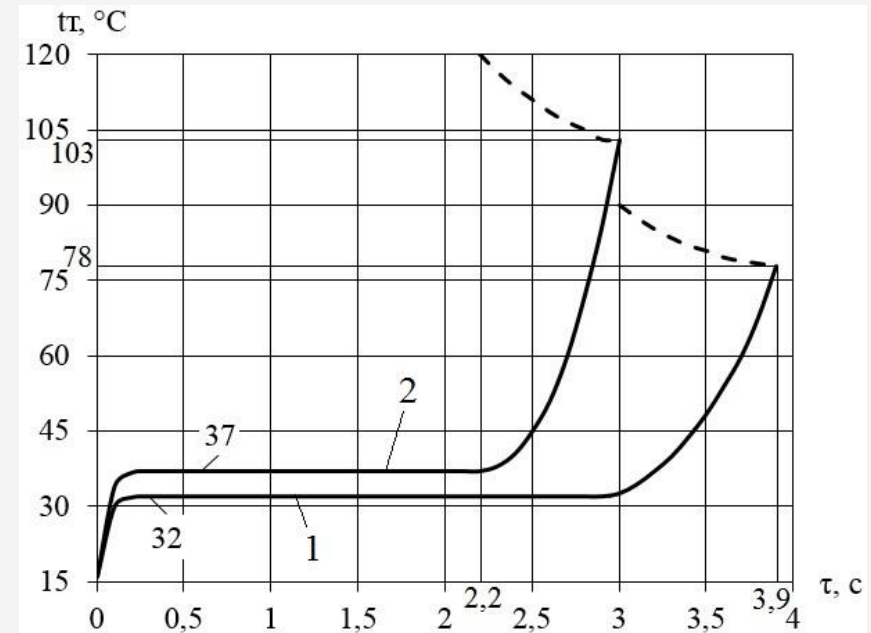


Рисунок 20 – Графічна залежність температури продукту і теплоносія від часу сушіння

Математична модель розв'язана інтегруванням систем диференційних рівнянь методом Рунге-Кутти із наступними початковими умовами:

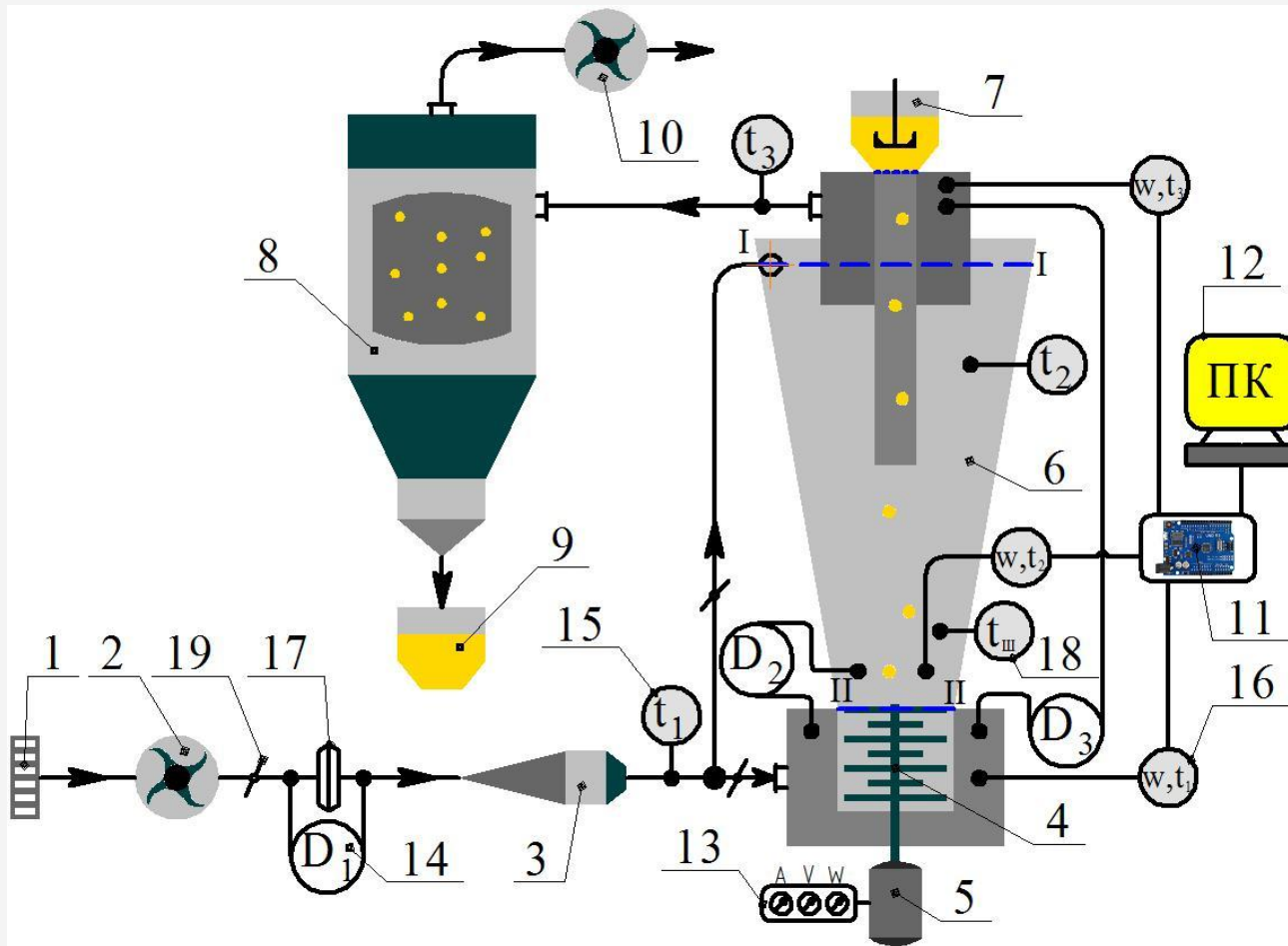
Перший період:

- $D = 4 \cdot 10^{-3}$  м;
- $U(\tau_0) = U_0$ ;
- $t(\tau_0) = t_0$ ;  $\tau_0 = 0$

Другий період:

- $d = 25 \cdot 10^{-6}$  м;
- $U_0 = U_{1кр} = 0,3011$  кг/кг
- $t_0 = t_{m.m.}$ ;  $\tau = \tau_1$

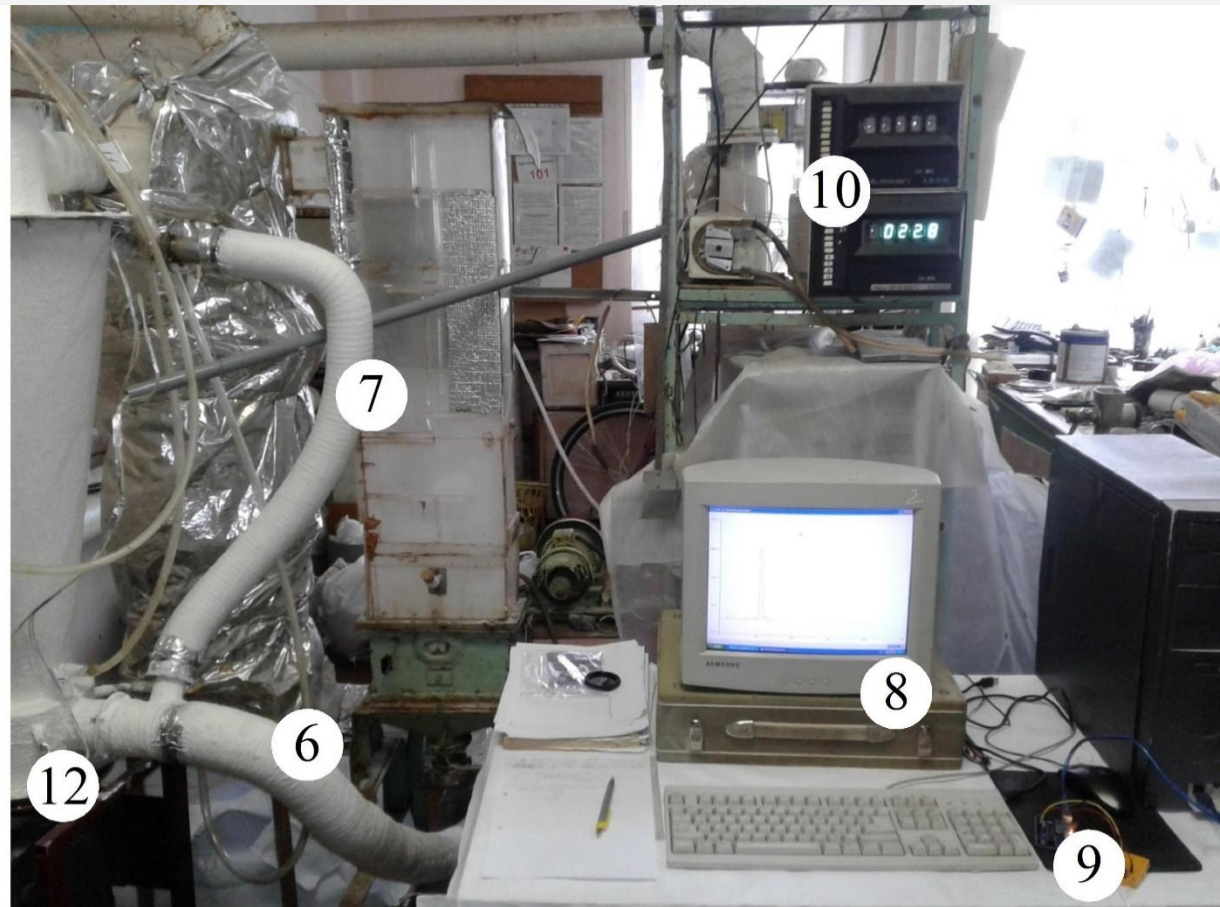
# Схема дослідної сушильної установки 22



1 – повітряний фільтр; 2 – нагнітаючий вентилятор; 3 – калорифер електричний; 4 – диспергатор; 5 – привід диспергатора; 6 – сушильна вихрова камера; 7 – живильник-дозатор; 8 – рукавний фільтр; 9 – вивантажувальний бункер; 10 – витяжний вентилятор; 11 – мікроконтролер Arduino UNO R3; 12 – персональний комп'ютер; 13 – вимірювальний комплекс типу K50 №1654; 14 – дифманометри (1–3); 15 – термометри (1–4); 16 – датчики-модулі температури і вологості GY-21 HTU21; 17 – діафрагма; 18 – температурний датчик PT100; 19 – шибер регулюючий

# Фото дослідної сушильної установки та допоміжного обладнання

23



- 1 – сушильний апарат; 2 – диспергатор; 3 – привід диспергатора; 4 – рукавний фільтр;  
5 – живильник-дозатор; 6 – загальний підвід теплоносія; 7 – підвід теплоносія на досушування;  
8 – персональний комп'ютер; 9 – мікроконтролер Arduino UNO R3; 10 – блок КВП;  
11 – відеокамера; 12 – датчики теператури та вологості; 13 – дифманометри
- Рисунок 21 – Фото дослідної сушильної установки

# Експериментальні дослідження коефіцієнтів гідравлічного опору

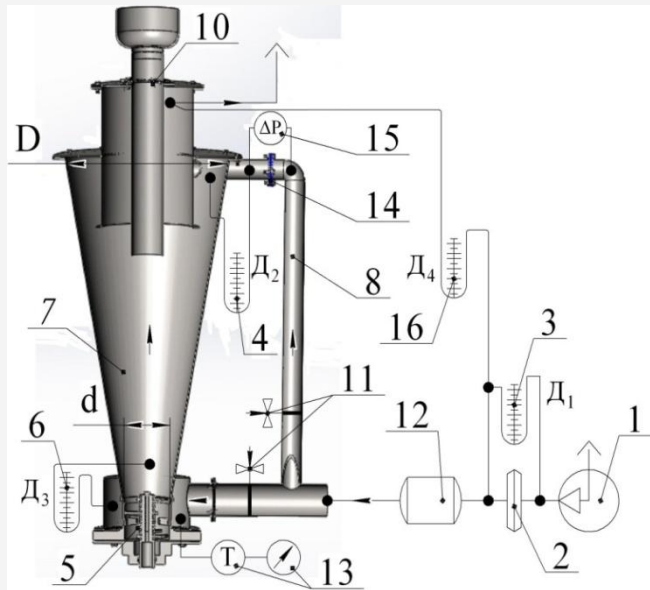
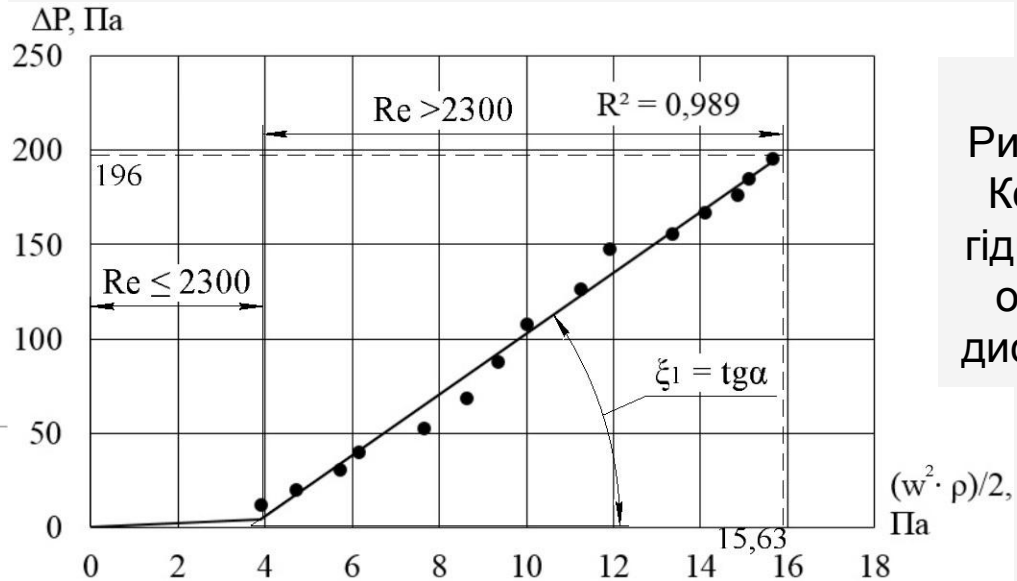
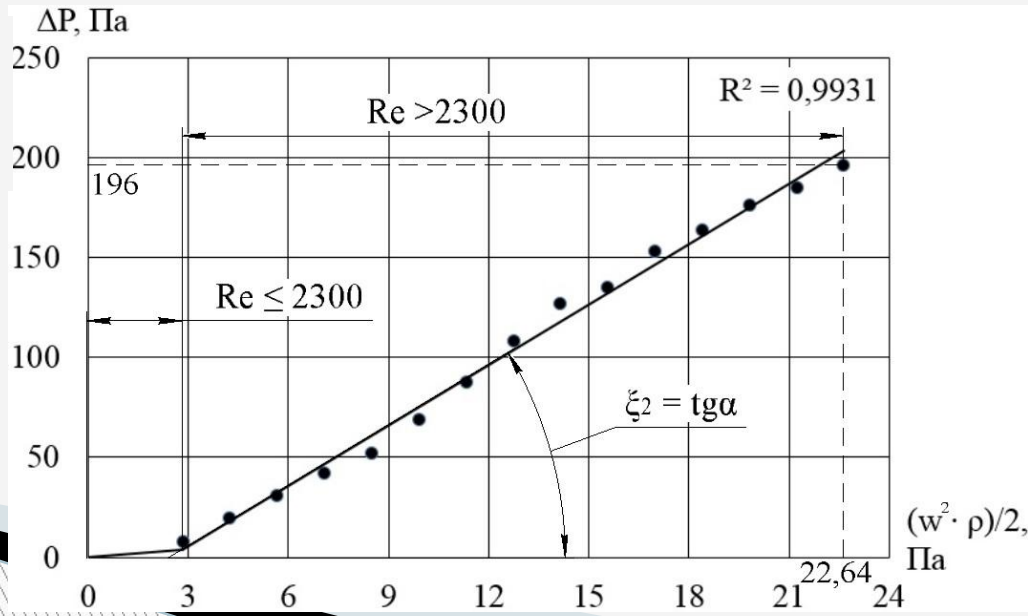


Рисунок 22 – Схема розміщення дифманометрів D1 і D2



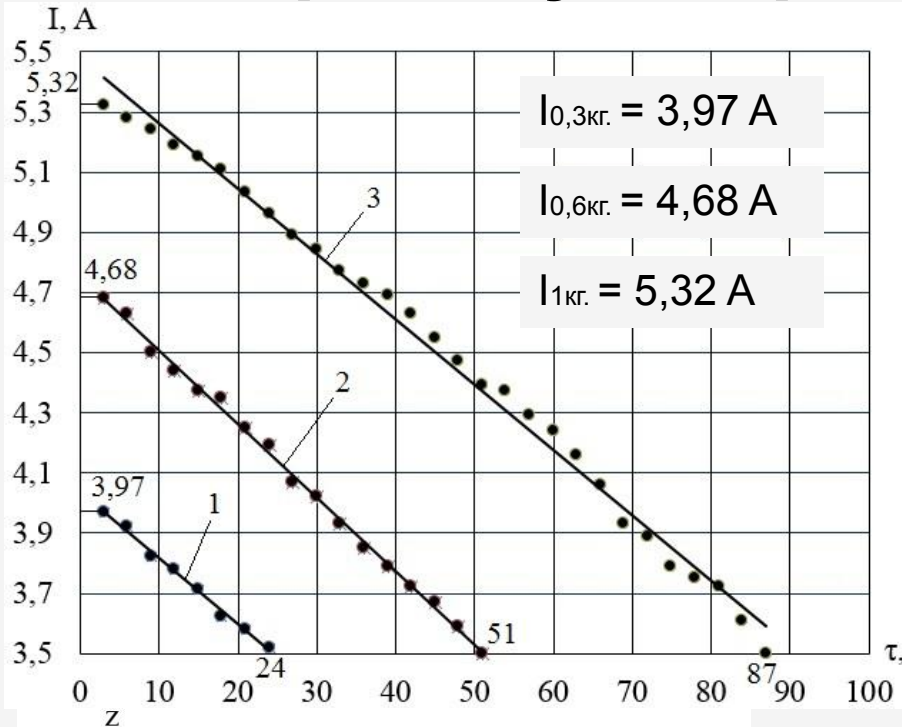
$\xi_1 = 12,54$   
Рисунок 23 – Коефіцієнт гідравлічного опору для диспергатора



$\xi_2 = 8,66$   
Рисунок 24 – Коефіцієнт гідравлічного опору для тангенційного входу



# Експериментальні дослідження процесу подрібнення пасти $TiO_2$



$$I_{x.x.} = 3,5 \text{ A}$$

Рисунок 25 –  
Залежність  
сили струму  
від часу  
подрібнення

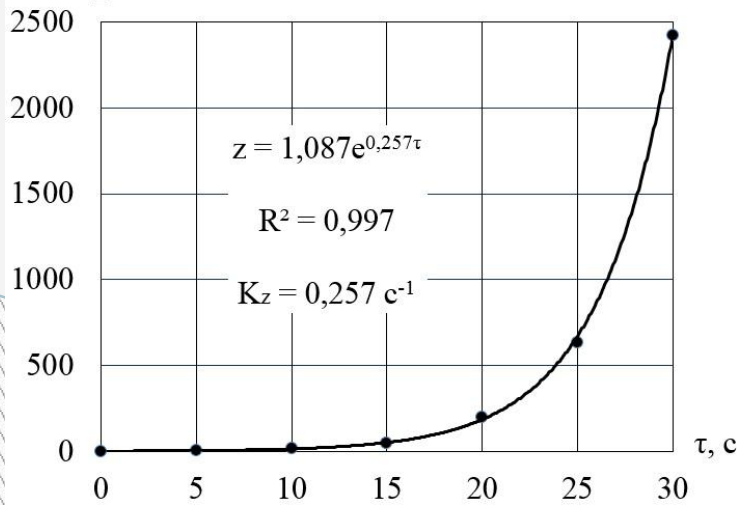


Рисунок 26 –  
Залежність маси  
продукту від часу  
подрібнення



Рисунок 27 – Висушений продукт для подрібнення



Рисунок 28 –  
Вимірювальний комплекс  
типу K50 № 1654

# Експериментальні дослідження процесу сушіння пасти $TiO_2$

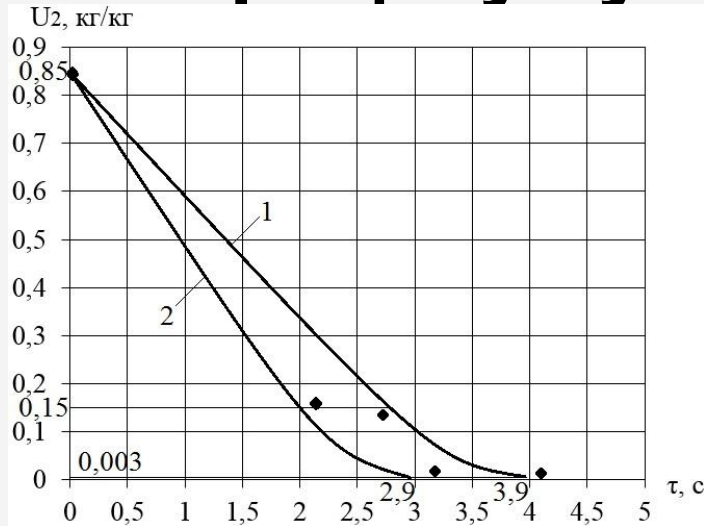


Рисунок 29 – Залежність вологовмісту від часу сушіння

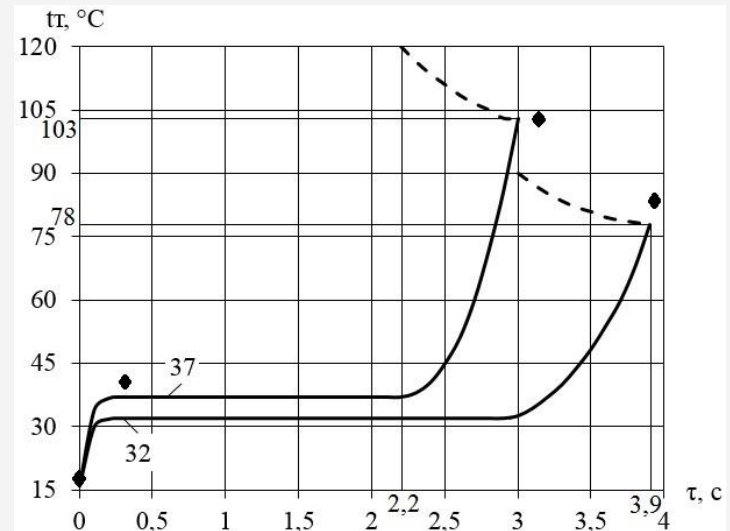


Рисунок 30 – Залежність температури від часу сушіння

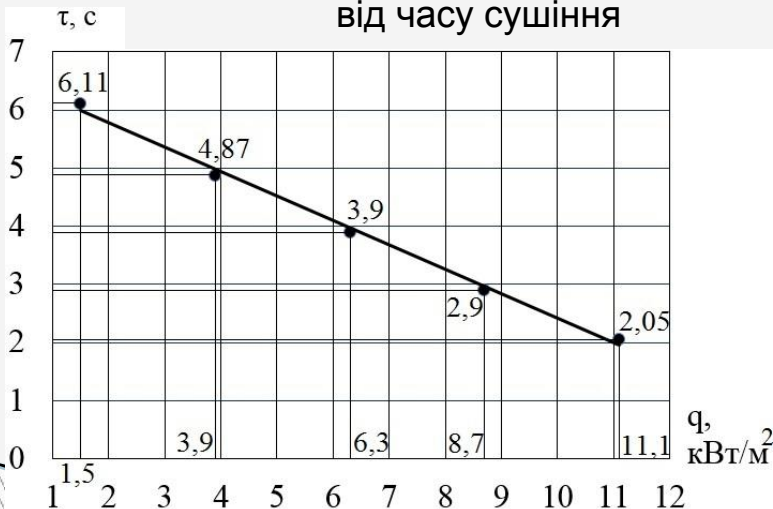


Рисунок 31 – Залежність загального часу сушіння від густини теплового потоку



Рисунок 32 – Процес сушіння пасти  $TiO_2$  у вихровому потоці теплоносія



# Адекватність математичної моделі

Визначено середньоквадратичне відхилення отриманих теоретичних та експериментальних значень часу сушіння пасти  $TiO_2$   
Ймовірність збігу значень за Фішером:  $\rho_\tau = 84\%$ .

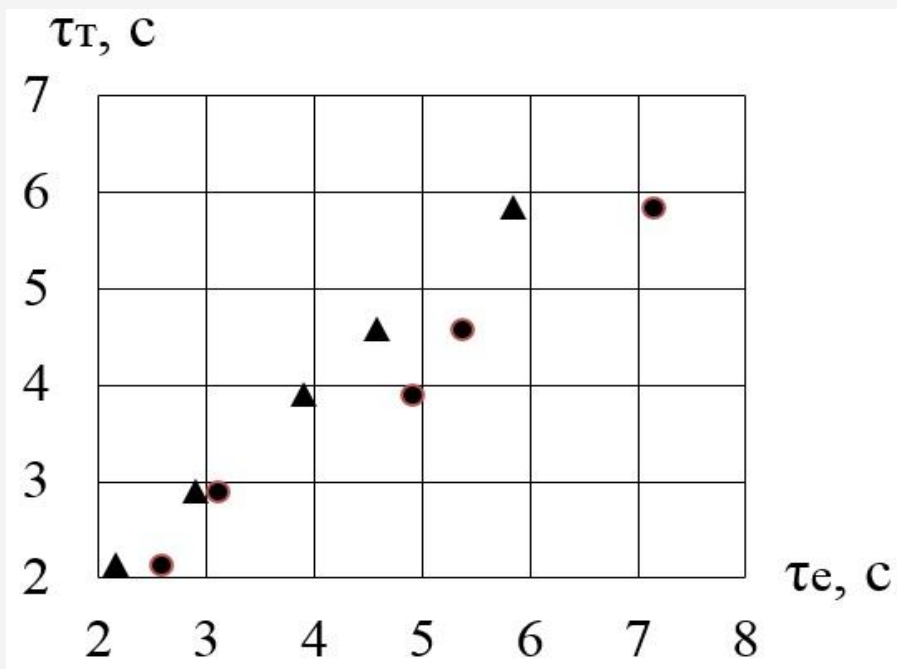


Рисунок 33 - Порівняння теоретичних і експериментальних значень загального часу сушіння пасти діоксиду титану

# Розподіл отриманих тонкодисперсних частинок за діаметром

28

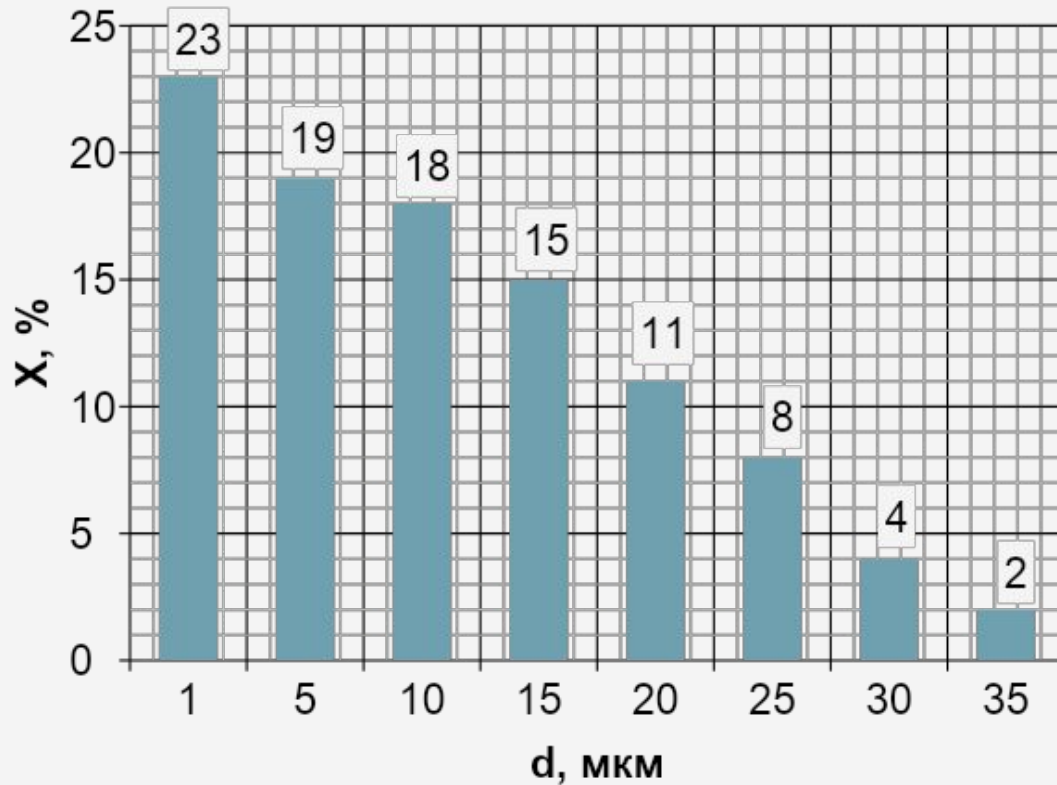
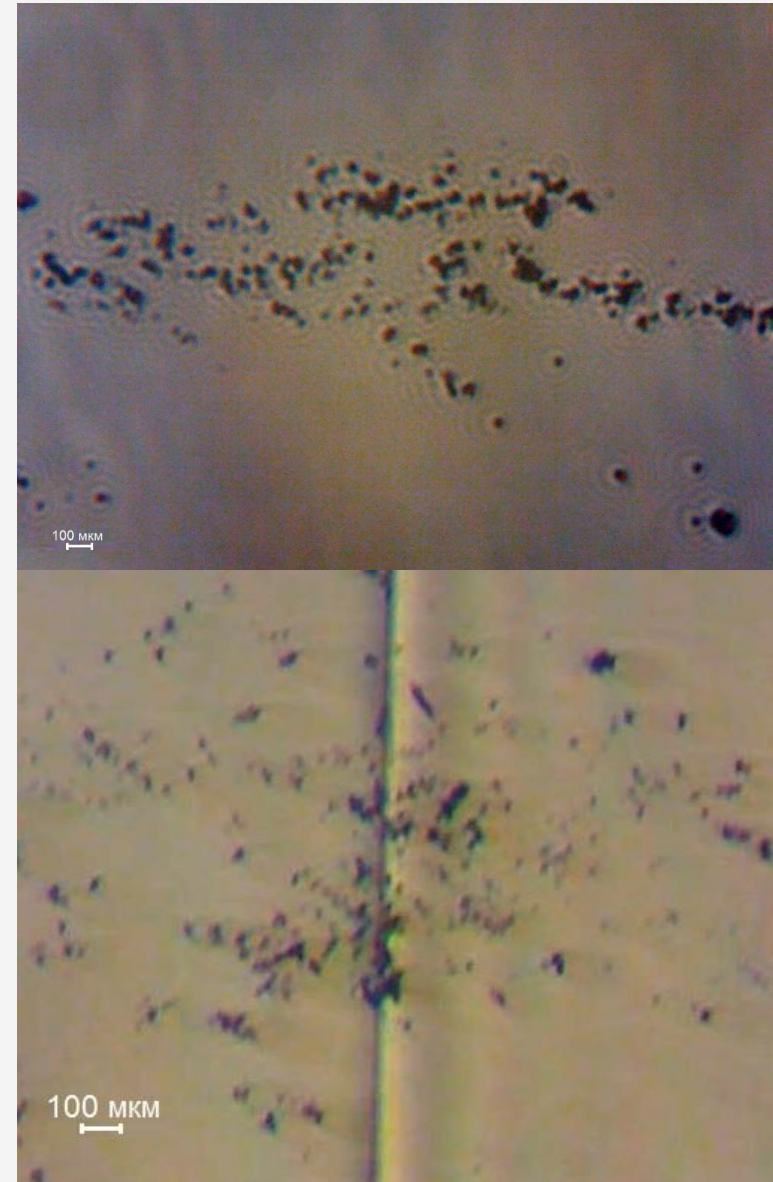
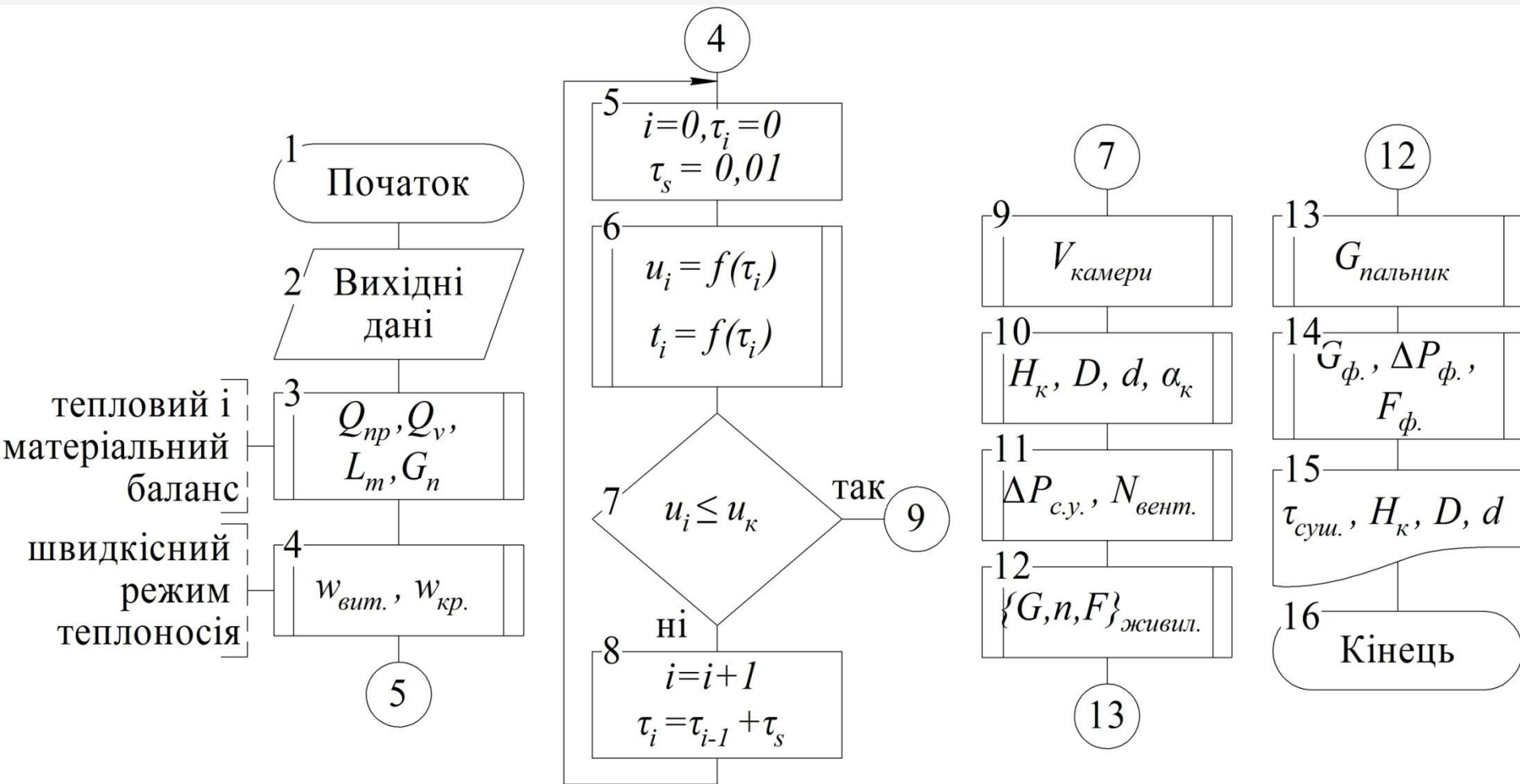


Рисунок 34 – Залежність відношення кількості частинок певного розміру до загальної кількості частинок від розміру частинки



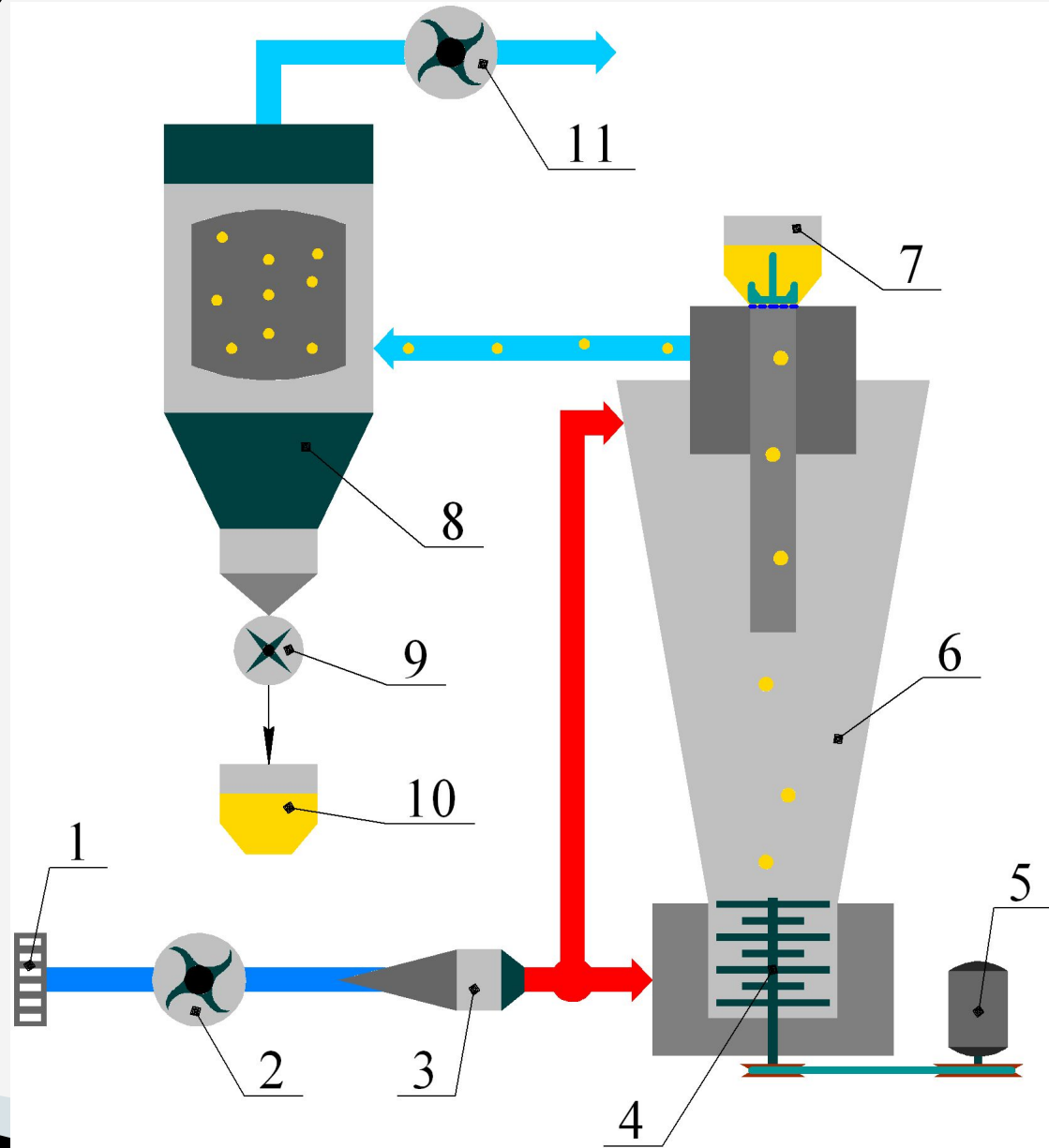
# Алгоритм розрахунку оригінальної вихрової сушильної установки

Розроблена методика та алгоритм розрахунку для сушильної установки із вихровою сушильною камерою та час процесу сушіння для тонкодисперсної пасти діоксиду титану, продуктивністю 500 кг/год по випареній волозі:



# Схема промислової сушильної установки

- 1 – повітряний фільтр;
- 2 – нагнітаючий вентилятор;
- 3 – калорифер (пальник);
- 4 – диспергатор;
- 5 – привід диспергатора;
- 6 – сушильна камера;
- 7 – живильник;
- 8 – рукавний фільтр;
- 9 – вивантажувальний вентилятор;
- 10 – збірник;
- 11 – витяжний вентилятор



# Порівняння параметрів сушарок

31

Назва параметру, од.	Розроблена сушарка	Стрічкова сушарка	Розпилююча сушарка	Вихрова сушарка типу Флеш
Продуктивність по волозі (на площу перетину камери), кг <sub>в</sub> /м <sup>2</sup> · год.	220	-	-	150-200
Продуктивність по волозі (на об'єм камери), кг <sub>в</sub> /м <sup>3</sup> · год.	260	-	30-120	100-200
Питомі витрати теплоносія на випаровування 1 т вологи, м <sup>3</sup> /т	5000-10000	50000-75000	15000-25000	7000-16000
Питомі витрати теплової енергії на випаровування 1 кг вологи, кДж/кг <sub>в</sub>	3500-4000	7500-9000	4500-7000	4000-6800
Питома металоємність установки (на 1 кг матеріалу), кг/кг	11-14	25-35	16-24	12-16
ККД, %	45-50	25-35	40-45	40-45





# Висновки:

1. Дисертаційна робота спрямована на вирішення важливого науково-технічного завдання – підвищення ефективності процесу сушіння тонкодисперсної пасти діоксиду титану у вихровому потоці теплоносія із застосуванням псевдозрідження та безперервного подрібнення матеріалу.
2. Обґрунтовано та експериментально підтверджено спосіб поєднання процесів сушіння і подрібнення пасти  $TiO_2$  та досушування тонкодисперсних частинок діоксиду титану в одному сушильному апараті вихрового типу.
3. Науково обґрунтовано фізичну і розвинено математичну моделі процесів сушіння та досушування тонкодисперсної пасти діоксиду титану у вихрових потоках теплоносія.
4. Отримано кінетичні закономірності та основні параметри процесу сушіння пасти діоксиду титану, необхідні для проектування промислових сушильних установок.
5. Теоретично визначено поля тангенційних і осьових швидкостей та тисків вихрових потоків теплоносія.
6. Експериментально визначено вплив безперервного подрібнення частинок матеріалу у псевдозрідженому шарі на швидкість сушіння пасти діоксиду титану.
7. Сформульовано фізичну модель сепарації тонкодисперсних частинок  $TiO_2$  у вихровому потоці теплоносія, що утворюється в розробленому сушильному апараті.
8. Встановлено найбільш раціональні параметри здійснення процесу сушіння пасти і досушування тонкодисперсних частинок матеріалу до залишкової вологості 0,3 %.
9. Експериментально отримано значення коефіцієнта швидкості подрібнення агломератів пасти діоксиду титану  $K_2$  та коефіцієнтів гідравлічного опору диспергатора  $\xi_1$  і тангенційного вводу теплоносія в зону досушування  $\xi_2$ , що дозволило розрахувати математичну модель процесу сушіння пасти діоксиду титану.
10. Визначено конструктивно-технологічні параметри сушильної конусоподібної камери, що забезпечують умови створення вихрових потоків теплоносія і сепарації частинок матеріалу  $TiO_2$ .
11. На основі результатів експериментальних досліджень підтверджено адекватність математичної моделі процесів сушіння та досушування пасти діоксиду титану.
12. За результатами дослідження розроблено методику та складено алгоритм і програму розрахунку промислового сушильного апарату, продуктивністю 500 кг/год по випареній волозі, для здійснення сушіння пасти  $TiO_2$  у вихровому потоці теплоносія.
13. Науково-технічні результати дисертаційної роботи впроваджено в сушильному обладнанні ТОВ «Мілклієнд» і ТОВ «Лакі-Фарма», а також у навчальний процес кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв інженерно-хімічного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського.

## Статті:

### *у фахових виданнях (5):*

1. Марчевський В.М. Аеродинаміка вихрових потоків сушильного агенту в сушильній камері / В.М. Марчевський, **Я.В. Гробовенко** // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки - 2018. № 1 (81) – с. 38-42. (Входить до наукометричних баз: **Index Copernicus, DOAJ, Google Scholar та інші**).
2. Marchevskii V. Kinetics of drying the titanium dioxide paste in the vortex dryer / V. Marchevskii, **Y. Grobovenko**, V. Telestakova // Ukrainian Food Journal – Volume 7, Issue 2, 2018. – pp. 311-323. (Входить до наукометричних баз: **Web of Science, Index Copernicus, EBSCO, Google Scholar, Ulrichs Web, Global Impact Factor, Cabi Full Text, OLUSD, DRJI, Universal Impact Factor, ROAD, ERIH PLUS, DOAJ, Info Base Index, CASSI**).
3. Marchevskii V. Product grinding influence on the drying process of dispersed titanium dioxide paste / V. Marchevskii, **Y. Grobovenko** // Ukrainian Journal of Food Science – Volume 6, Issue 1, 2018. – pp. 188-198. (Входить до наукометричних баз: **Index Copernicus, EBSCO, Google Scholar, Ulrichs Web, Global Impact Factor, Cabi Full Text, OLUSD, DRJI, Universal Impact Factor, ROAD, ERIH PLUS, DOAJ, Info Base Index, CASSI**).
4. Марчевський В.М. Задача ефективного управління процесом отримання тонкодисперсного порошку діоксиду титану в ході вихрової сушки / Марчевський В.М., Гробовенко Я.В. // Автоматизація технологічних і бізнес процесів – Том 10, № 3, 2018. – с. 59-66.

5. Marchevskii V. Probation results of the original swirling drying apparatus for paste products / V. Marchevskii, **Y. Grobovenko** // Mechanics and Advanced Technologies – Vol. 2, No. 83, 2018. – pp. 100-107. (Входить до наукометричних баз: Index Copernicus, Google Scholar, ПИНЦ, Open Academic Journals Index (OAJI), CiteFactor, DAOJ, WorldCat, BASE, EBSCO).

***у закордонному виданні (1):***

6. Marchevskii V.M. Simulation of drying fine particles  $TiO_2$  in a stream of drying agent / V.M. Marchevskii, **Y.V. Grobovenko**, D.S. Vizerskyi / Scientific-discussion – 2017. № 3 – с. 21-24. (Входить до наукометричних баз: ResearchBib, SIS, DIIF).

***статті у інших виданнях (4):***

7. Марчевський В.М. Процес сушіння діоксиду титану / В.М. Марчевський, **Я.В. Гробовенко** // International Scientific Journal, 2016. №5 – с. 22-24. (Входить до наукометричних баз: CrossRef, ПИНЦ, OAJI, ResearchBib, JIF, BASE, Journal Factor, Google Scholar, Cosmos Impact Factor, Open J-Gate, CiteFactor, I2OR, RePEc).
8. Марчевський В.М. Процес сушіння пасти діоксиду титану у вихровому сушильному апараті / В.М. Марчевський, **Я.В. Гробовенко** // Наукове товариство Smart and Young – 2016, Випуск № 11-12 – с. 55-57. (Входить до наукометричних баз: Quality Factor, Index Copernicus, Научная электронная библиотека).
9. Марчевський В.М. Моделювання процесу сушіння тонкодисперсних часток  $TiO_2$  в потоці сушильного агента / В.М. Марчевський, **Я.В. Гробовенко** // Вісник НТУУ «КПІ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО». Хімічна інженерія, екологія, та ресурсозбереження – 2016. № 1 – с. 25-27.

9. Марчевський В.М. Гідродинаміка вихрового сушильного апарату для пастоподібних продуктів / В.М. Марчевський, Я.В. Гробовенко // Наука онлайн: Міжнародний електронний науковий журнал - 2018. - №6. (Входить до наукометричних баз: CrossRef, РИНЦ, OAJI, ResearchBib, JIF, BASE, Journal Factor, Google Scholar, Cosmos Impact Factor, Open J-Gate, CiteFactor, I2OR, RePEc).

**Патенти (4):**

11. Патент № 107088 Україна МПК F26B 3/084 (2006.01) Сушильна установка із псевдозрідженим шаром інертних тіл та живильником / Марчевський В. М., **Гробовенко Я. В.**; Заявл. 19.10.2015; Опубл. 25.05.2016, Бюл. № 10.
12. Патент № 107089 Україна МПК F26B 17/10 (2006.01) Спосіб для сушіння пастоподібних матеріалів / Марчевський В. М., **Гробовенко Я. В.**; Заявл. 19.10.2015; Опубл. 25.05.2016, Бюл. № 10.
13. Патент № 108688 Україна МПК F26B 17/10 (2006.01) Апарат для сушіння пастоподібних матеріалів / Марчевський В. М., **Гробовенко Я. В.**; Заявл. 09.02.2016; Опубл. 25.07.2016, Бюл. № 14.
14. Патент № 131110 Україна МПК F26B 17/10 (2006.01) Апарат для сушіння пастоподібних продуктів / Марчевський В. М., **Гробовенко Я. В.**, Візерський Д. С.; Заявл. 07.06.2018; Опубл. 10.01.2019, Бюл. № 1.

14. Патент № 131110, Україна, МПК F26B 17/10 (2006.01) Апарат для сушіння пастоподібних продуктів / Марчевський В.М., **Гробовенко Я.В.**, Візерський Д.М; Заявл. 07.06.2018; Опубл. 10.01.2019, Бюл. № 1.

**Тези доповідей (4):**

15. Марчевський В.М. Сушильна установка з псевдозрідженим шаром інертних тіл та живильником / В.М. Марчевський, **Я.В. Гробовенко** // Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання: VIII міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених, 19-20 квітня 2015 р: збірник тез доповідей. – Київ, 2015. – С. 95–96.
16. Марчевський В.М. Апарат для сушіння пастоподібних матеріалів у вихровому шарі / В.М. Марчевський, **Я.В. Гробовенко** // Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання: IX міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених, 24-26 листопада 2015 р: збірник тез доповідей. – Київ, 2015. – С. 80–81.
17. Марчевський В.М. Залежність конфігурації потоків в корпусі сушильної установки від напряму подачі теплоносія / В.М. Марчевський, **Я.В. Гробовенко**, Д.С. Візерський // Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання: XII міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених, 26-27 квітня 2017 р: збірник тез доповідей. – Київ, 2017. – С. 64–65.
18. Марчевський В.М. Процес сушіння пасти діоксиду титану у вихровому сушильному апараті / В.М. Марчевський, **Я.В. Гробовенко** // Хімічна технологія і техніка: 81 міжнародна науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, наукових співробітників і аспірантів, 2017 р: збірник тез доповідей. – Мінськ, Білорусь, 2017. – С. 137–138.



# Акти впровадження:

"Затверджую"  
Директор ТОВ "Мілкленд"  
(поза посадою)  
Юркевич Ольга Федорівна

Україна  
МІЛКЛЕНД  
УКРАЇНА  
2018 р.

### АКТ

впровадження результатів кандидатської дисертаційної роботи Гробовенка Я.В.  
"Процес сушіння тонкодисперсної пасти діоксиду титану"

Ми, що підписалися нижче, від \_\_\_\_\_  
(посадові особи з/а підпр.ства)

від КПІ ім. Ігоря Сікорського – завідувач кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв (МАХНВ), д.т.н., проф. Корнієнко Я.М., науковий керівник к.т.н., проф. Марчевський В. М. та аспірант кафедри МАХНВ Гробовенко Я. В. склали цей акт проте, що результати дисертаційної роботи Гробовенка Я. В. впроваджені на заводах компанії.

У подальшому результати досліджень будуть використані при розробці промислових сушильних установок для отримання поронків з молочних білкових продуктів (казеїн, сир твердий та сир кисломолочний).

*Цей акт не є підставою для фінансових розрахунків*

Від Зам. директора по виробництву  
(поза посадою)  
Гайшук В'ячеслав Іванович

Від КПІ ім. Ігоря Сікорського

Завідувач кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв, д.т.н., професор  
Я.М. Корнієнко

Науковий керівник, к.т.н., професор  
В.М. Марчевський

Аспірант  
Я. В. Гробовенко



"Затверджую"  
Директор ТОВ "Лакі-Фарма"  
Ніколаєв А.В.  
04 вересня 2018 р.

### АКТ

впровадження результатів кандидатської дисертаційної роботи Гробовенка Я.В.  
"Процес сушіння тонкодисперсної пасти діоксиду титану"

Ми, що підписалися нижче, від ТОВ "Лакі-Фарма" директор Ніколаєв А.В., від КПІ ім. Ігоря Сікорського – завідувач кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв (МАХНВ), д.т.н., проф. Корнієнко Я.М., науковий керівник к.т.н., проф. Марчевський В. М. та аспірант кафедри МАХНВ Гробовенко Я. В. склали цей акт проте, що результати дисертаційної роботи Гробовенка Я. В. будуть впроваджені на виробничих потужностях ТОВ "Лакі-Фарма".

У подальшому результати досліджень будуть використані при розробці промислових сушильних установок для отримання поронків тонкодисперсної пасти діоксиду титану для виробництва наповнювачів для лікарських препаратів.

*Цей акт не є підставою для фінансових розрахунків*

Від ТОВ "Лакі-Фарма"  
Директор  
А.В. Ніколаєв



Від КПІ ім. Ігоря Сікорського

Завідувач кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв, д.т.н., професор

Я.М. Корнієнко

Науковий керівник, к.т.н., професор

В.М. Марчевський

Аспірант  
Я. В. Гробовенко

"Затверджую"  
Директор  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
Ю.І. Якименко  
2018 р.

### АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертації Гробовенка Ярослав Віталійовича  
«Процес сушіння тонкодисперсної пасти діоксиду титану»,  
що представлена на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Цим актом засвідчується, що дисертація асистента кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв «КПІ ім. Ігоря Сікорського» Гробовенка Ярослава Віталійовича «Процес сушіння тонкодисперсної пасти діоксиду титану», що представлена на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, відповідає напрямку наукових досліджень «КПІ ім. Ігоря Сікорського» та науковій роботі кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв і безпосередньо пов'язана із науково-ініціативною темою «Процес сушіння дрібнодисперсної пасти діоксиду титану» № 04/15 ІХФ від 20.10.2015 року (Номер державної реєстрації № 0115U005598).

Результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі під час проведення лекційних та практичних зав'язь для напрямку підготовки 133: Галузеве машинобудування для спеціалізації 05050315 – «Інжиніринг, комп'ютерне моделювання та проектування обладнання целюлозно-паперового виробництва» із дисципліни «Процеси, апарати і машини галузі» (з кредитних модулів: «Теплові процеси», «Масообмінні процеси»).

Також результати дисертаційної роботи використовуються при дипломному проектуванні, проведенні наукових досліджень та підготовці дисертацій магістрів на кафедрі машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв «КПІ ім. Ігоря Сікорського».

Впровадження результатів дисертації у навчальний процес забезпечується:

## Офіційний опонент, д.т.н., професор Гумницький Ярослав Михайлович

1. На стор. 86 констатується, що у першому періоді швидкість видалення вологи  $dW/dt$  є постійною. Ця швидкість залежить від поверхні, яку не можна вважати постійною, тому що у диспергаторі паста розділяється на окремі частинки, розміри яких, імовірно, не будуть однакові.
2. Сушіння проводилось у псевдозрідженому шарі дисперсного матеріалу, а сушарка має конусну форму. Очевидно, що швидкості газового потоку по висоті сушарки змінюються. Від швидкості залежить коефіцієнт масовіддачі. Крім цього, необхідно було б провести усереднення коефіцієнта масовіддачі по усьому об'ємі апарату. Наведені на стор. 103 дані щодо швидкості сушіння, на мою думку, і є усередненими величинами.
3. Наведене на стор. 90 значення  $D_0 = 2,2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$  є коефіцієнтом молекулярної дифузії водяної пари у повітрі за нормальних умов. У дисертації цей коефіцієнт названо коефіцієнтом дифузії водяної пари з вологої поверхні твердих частинок. Якщо це стосується другого періоду сушіння, то слід розглядати дифузію всередині твердих частинок, яка є лімітуючою.
4. У дисертаційній роботі мало уваги приділено теоретичному аналізу другого періоду сушіння. Відсутнє диференціальне рівняння масоперенесення вологи усередині твердої частинки, початкові та граничні умови, якого роду ці умови та їх рішення і перевірка на адекватність.

5. На стор. 132 вказано, що проведено досліди щодо зміни температур та вологовмісту пасти діоксиду титану від часу сушіння за різних температур. У табл. 3.3 наведено лише зміну температур на вході та виході та час сушіння
6. На сторінці 136 (рис. 3.19) напруження псевдозрідженого вихрового шару по висушеній волозі має розмірність  $[\text{кг}/\text{м}^2\text{с}]$ . Можливо, що напруження повинно бути віднесене до об'єму псевдозрідженого вихрового шару  $[\text{кг}/\text{м}^3\text{с}]$ . Це значення дозволяє визначити розміри сушильної установки.
7. У формулі (4.23) значення часу сушіння визначається  $t = t_0 + t_1 + t_2 = t_{\text{переб.}}$ . Очевидно, повинно бути  $\leq t_{\text{переб.}}$ . Час  $t_2$  представляє собою час досушування. Невідомо, як визначається ця величина, як її закладати під час розрахунків сушіння, якщо сам процес сушіння визначається кінцевою вологістю.
8. Характеристику пасти подано у розділі III, можливо ці дані слід було б подати у розділі II, у якому рекомендується подавати характеристику речовин, що приймають участь у дослідженні.
9. Не подано порівняння сушарок з псевдозрідженим шаром висушеного матеріалу з контактними сушарками, які часто використовуються для сушіння пастоподібних матеріалів.

1. У авторефераті не вказані похибки вимірювань основних параметрів при проведенні експериментальних досліджень процесу сушіння пасти діоксиду титану.
2. В розділі дисертаційної роботи, де здійснено математичне моделювання процесів сушіння і досушування матеріалу  $TiO_2$  не вказані межі застосування розроблених математичних моделей.
3. При описі сушильної установки не вказано за яким принципом розподілено основний потік теплоносія в зону диспергування і потік теплоносія в зону досушування.
4. Не вказано із якою точністю визначалися об'ємні витрати теплоносія (повітря).
5. Не вказано питомі витрати теплоти і повітря на 1 тону випарюваної води.
6. Важко встановити, які досягнуті і які максимально можливі напруження по випарюваній волозі об'єму сушильної камери і її поперечному перетину.
7. Важко відмітити, що лімітує швидкість перенесення теплової енергії у вихровому псевдозрідженому шарі.
8. Важко встановити із якою коловою швидкістю обертаються ножі диспергатора.
9. Як досягається відсутність просипання часток матеріалу діоксиду титану із псевдозрідженого шару через ножі диспергатора в дифузор апарату.
10. Чим пояснюється перелом апроксимуючої лінії на графічних залежностях  $\Delta P = f((w^2 \cdot \rho) / 2)$ .

# Зауваження у відгуках на автореферат дисертації:

42

## 1. Сумський державний університет, м. Суми

Відгук підписав гол. н.с. кафедри процесів та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв, д.т.н., проф. Ляпощенко О. О. Відгук позитивний, є зауваження:

1. Враховуючи обмеженість за обсягом та змістом автореферату замість табл. 1 на с. 4 достатньо було просто навести посилання на відповідний ДСТУ.
2. На с. 5 автореферату під невдалим виразом «... методів 3D-інженерії ...» певно слід розуміти «CFD (Computational Fluid Dynamics) - методи»? Моделювання руху однофазних потоків CFD-методами представляється можливим, але моделювання двохфазних потоків з дисперсними частками й досі представляє ряд труднощів. Яким чином CFD-методи застосовано для імітаційного моделювання руху вихрового газодисперсного потоку та псевдозрідженого шару?
3. На рис. 10 с. 15 автореферату позначено дві області  $Re \leq 2300$  та  $Re > 2300$ . Характерною є точка перегину кривої графіку функції, що відповідає значенню  $Re=2300$ . В інтервалі функції праворуч від цього значення доцільно було навести шкалу  $Re$  або обумовити граничні значення.

## 2. Національний університет харчових технологій, м. Київ

Відгук підписав завідувач кафедри «Технологічного обладнання та комп'ютерних технологій проектування ННІТІ ім. І. С. Гулого», д.т.н., проф. Мирончук В. Г. Відгук позитивний, є зауваження:

1. Потребує пояснення конструкція диспергатора (рис. 2, ст. 6; рис. 8, ст. 13; рис. 9, ст. 14), а саме особливості конструкцій робочих органів диспергатора.

## 3. Інститут гідробіології НАН України, м. Київ

Відгук підписав с.н.с. відділу водної радіоекології, к.б.н., с.н.с. Каглян О. Є. Відгук позитивний, є зауваження:

1. З тексту автореферату не зрозуміло чому використано саме електричний нагрівач, а не газовий.
2. В тексті автореферату відсутні детальні зображення розроблених пристроїв, що ускладнює сприйняття наведеного принципу дії.
3. Бажано було б пояснити чому експериментально не досліджено процес сушіння пасти діоксиду титану за значних густин теплового потоку, наприклад,  $100 \text{ кВт/м}^2$  і вище.



#### 4. Інститут газу НАН України, м. Київ

Відгук підписав директор Інституту газу НАН України, академік НАН України, д.т.н., проф. Бондаренко Б. І. Відгук позитивний, є зауваження:

1. В роботі, на жаль, немає порівняння питомих енерговитрат з існуючими технологіями сушіння пасти діоксиду титану.

#### 5. Національний університет «Києво-Могилянська академія», м. Київ

Відгук підписав професор кафедри суспільного врядування, д. наук держ.упр., к.т.н. (05.17.08), проф., член спеціалізованої вченої ради Д 26.810.01 Рябцев Г. Л. Відгук позитивний, є зауваження:

1. Наведені в авторефераті пункти наукової новизни (с. 2-3) є неповними. Зокрема, незрозуміло – які саме кінетичні закономірності й параметри сушіння вперше визначені автором, який саме вплив неперервного подрібнення частинок вихрового шару на швидкість сушіння ним установлений і в чому саме він полягає.
2. Сформульовані автором загальні висновки (с. 18-19) мають описовий, констатуючий характер і не розкривають одержаних ним наукових результатів.

#### 6. ТОВ «Лакі-Фарма», м. Київ

Відгук підписав директор ТОВ «Лакі-Фарма» Ніколаєв А. В. Відгук позитивний, є зауваження:

1. Не вказано яким чином визначалася температура мокрого термометра при розрахунку математичної моделі процесу сушіння пасти  $TiO_2$ .
2. Для кращого сприйняття бажано було б надати графічні залежності основних техніко-економічних показників розробленого сушильного апарату в порівнянні з сучасними аналогами.

#### 7. Milkiland N. V. LLC, м. Київ

Відгук підписав голова ради директорів Юркевич А. Відгук позитивний, є зауваження:

1. Недостатня кількість питомих показників, порівняних з аналогами.

#### 8. Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків

Відгук підписав лауреат державної премії України, Заслужений діяч науки і техніки України, д.т.н., проф. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л. Л. Відгук позитивний, є зауваження:

1. Не вказані граничні умови для розрахунку математичної моделі процесу сушіння діоксиду титану.
2. Не вказані розміри сушильної камери апарату та об'ємні витрати теплоносія.

### 9. Дніпровський державний технічний університет, м. Дніпро

Відгук підписав завідувач кафедри хімічної технології неорганічних речовин, д.т.н., проф. Волошин М. Д. Відгук позитивний, є зауваження:

1. Не наведена технологічна схема промислової установки. Якщо вона не буде відрізнятися від дослідної, то слід було про це вказати.

### 10. Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця

Відгук підписав завідувач кафедри машин та обладнання сільськогосподарського виробництва, д.т.н., проф. Веселовська Н. Р. Відгук позитивний, є зауваження:

1. В описі імітаційного дослідження гідродинаміки сушильного апарату не вказано початкові параметри системимодельовання вихрових потоків теплоносія.
2. Бажано було б в авторефераті навести робочі параметри рукавного фільтру та показати яким чином забезпечується вловлювання тонкодисперсних частинок із еквівалентним розміром до 15 мкм.

### 11. Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків

Відгук підписав декан механічного факультету, д.т.н., проф. Кириченко І. І. Відгук позитивний, є зауваження:

1. В результатах чисельного розрахунку математичної моделі процесу сушіння пасти діоксиду титану бажано було б навести узагальнену криву сушіння та термічну криву.
2. В авторефераті вказано про розробку алгоритму розрахунку сушильної установки для сушіння пасти діоксиду титану, проте не наведено сам алгоритм.

### 12. Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, м. Сєвєродонецьк

Відгук підписав завідувач кафедри хімічної інженерії та екології, д.т.н., проф. Суворін О. В. Відгук позитивний, є зауваження:

1. В тексті автореферату швидкість сушіння та вологість  $TiO_2$  позначені однією літерою  $w$ , окрім цього, швидкість сушіння позначена одночасно літерами  $w$  та  $U$ , що дещо ускладнює розуміння представленого матеріалу. Також використовуються одночасно різні назви однієї величини – густина теплового потоку, щільність теплового потоку.
2. В тексті автореферату не обґрунтовано вибір саме таких значень щільностей теплового потоку – 6,3 та 8,7 кВт/м<sup>2</sup>.

### 13. Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів

Відгук підписав завідувач кафедри хімічної інженерії, д.т.н., проф. Атаманюк В. М. Відгук позитивний, є зауваження:

1. Із автореферату не зрозуміло яким чином обрані значення густин теплових потоків  $6,3$  та  $8,7$  кВт/м<sup>2</sup>, що лягли в основу досліджень.
2. У розрахункову залежність (5) входить загальна поверхня тонкодисперсних частинок в зоні досушування. Яким чином цю поверхню можна розрахувати і виникає питання чи ця поверхня в процесі досушування не змінюється внаслідок подрібнення частинок.
3. Не зрозуміло, як визначали коефіцієнт тепловіддачі, коли розміри частинок в процесі їх руху у конічній частині апарату постійно змінюються. Як визначали швидкість газового потоку теплового агента відносно твердих частинок, розмір яких є змінною величиною і поперечний переріз апарату також.
4. Відомо, що коефіцієнт гідравлічного опору є функцією числа Рейнольдса, тому виникає питання як визначали число Рейнольдса у апараті, де є суміш теплового агента і полідисперсних частинок  $TiO_2$ , поперечний переріз якого є змінною величиною і чому значення коефіцієнта гідравлічного опору є сталими величинами  $12,54$  і  $8,66$ .

### 14. Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ

Відгук підписав провідний науковий співробітник відділу тепломасопереносу в теплотехнологіях, д.т.н., с.н.с. Сорокова Н. М. Відгук позитивний, є зауваження:

1. В процесі сушіння, особливо в першому періоді, в апаратах безперервної дії параметри теплоносія (вологівміст, температура та ін.) істотно змінюються в часі, що відображається на швидкості сушіння матеріалу. В авторефераті не пояснюється, як визначалася функція парціального тиску пари в теплоносії, що у виразі (3) представляється рушійною силою вологоперенесення з поверхонь частинок диспергованої пасту діоксиду титану.

**Дякую за увагу**

