

**Марчевський Віктор Миколайович**

*кандидат технічних наук, професор*

*Національний технічний університет України*

*«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

**Гробовенко Ярослав Віталійович**

*асистент*

*Національний технічний університет України*

*«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

## **ГІДРОДИНАМІКА ВИХРОВОГО СУШИЛЬНОГО АПАРАТУ ДЛЯ ПАСТОПОДІБНИХ ПРОДУКТІВ**

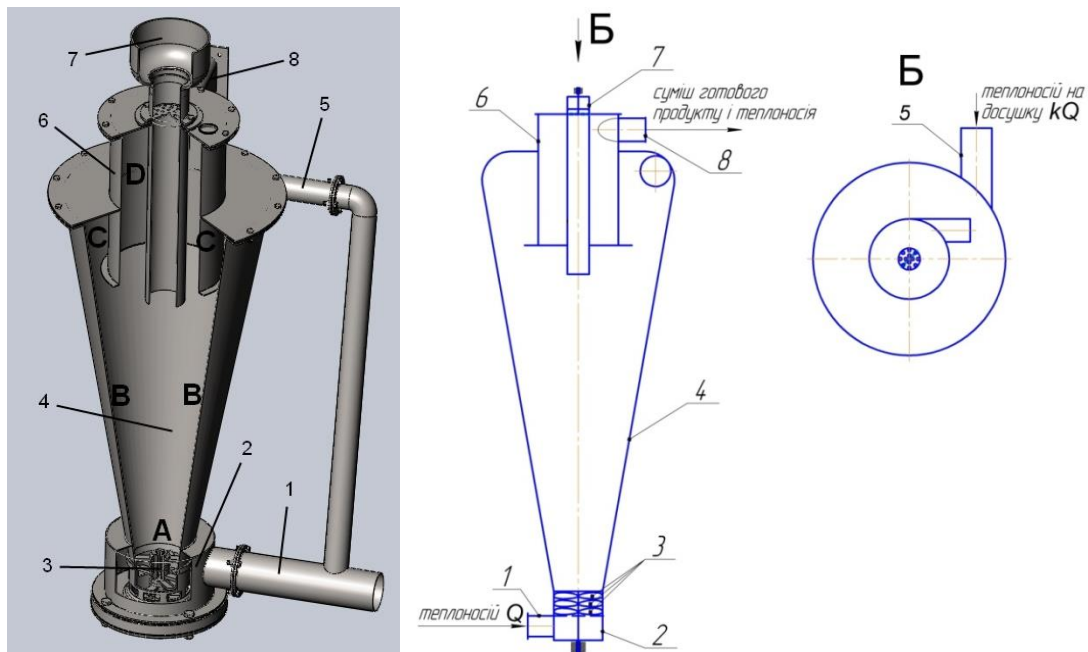
**Анотація.** В статті експериментальним шляхом визначено необхідні коефіцієнти гідравлічного опору оригінальної конструкції сушильної камери із вихровими потоками теплоносія, яка має зону диспергування тонкодисперсного матеріалу та зону досушування частинок до високої кінцевої сухості. Також показано поля розподілу швидкостей і тисків теплоносія, що важливо для моделювання тепломасообмінних процесів між двома фазами системи, а також транспортування підсушеного дисперсного продукту із зони диспергування і направлення його у зону досушування.

**Ключові слова:** гідравлічний опір, процес сушіння, сушильна камера, вихровий потік, теплоносії, поле швидкостей, поле тисків.

**Постановка проблеми.** Для розробки сучасних методів і алгоритмів розрахунку процесів тепло- і масообміну та створення відповідного устаткування із двохфазними середовищами, необхідно знати взаємодію потоку теплоносія між безперервною газовою і дискретною фазами шару. Ці завдання становлять основу в описі поведінки двохфазних середовищ, а саме вихрових потоків і тому викликають інтерес до цих проблем [1,2]. Однак,

задовільні кількісні закономірності, які адекватно відображають аеродинамічні та гідродинамічні характеристики вихрових потоків, до сих пір в літературі зустрічаються рідко [3]. Важливою науковою проблемою також є зменшення затрат теплової енергії в процесах теплообміну при сушінні тонкодисперсних матеріалів у вихрових потоках теплоносія, на виконання яких затрачається до 25% від світового виробництва енергії [4].

**Виклад основного матеріалу дослідження.** В даній роботі розглядається оригінальна конструкція сушильного апарату (рисунок 1) для висушування тонкодисперсних паст.



1 – основний патрубок подачі сушильного агенту; 2 – дифузор;  
3 – диспергатор; 4 – конусоподібна сушильна камера; 5 – патрубок подачі сушильного агенту для досушування; 6 – циліндр сепарації; 7 – система подачі вологих дисперсій; 8 – вихідний патрубок; А – зона диспергування; В – зона розділення фракцій; С – зона інтенсивного досушування

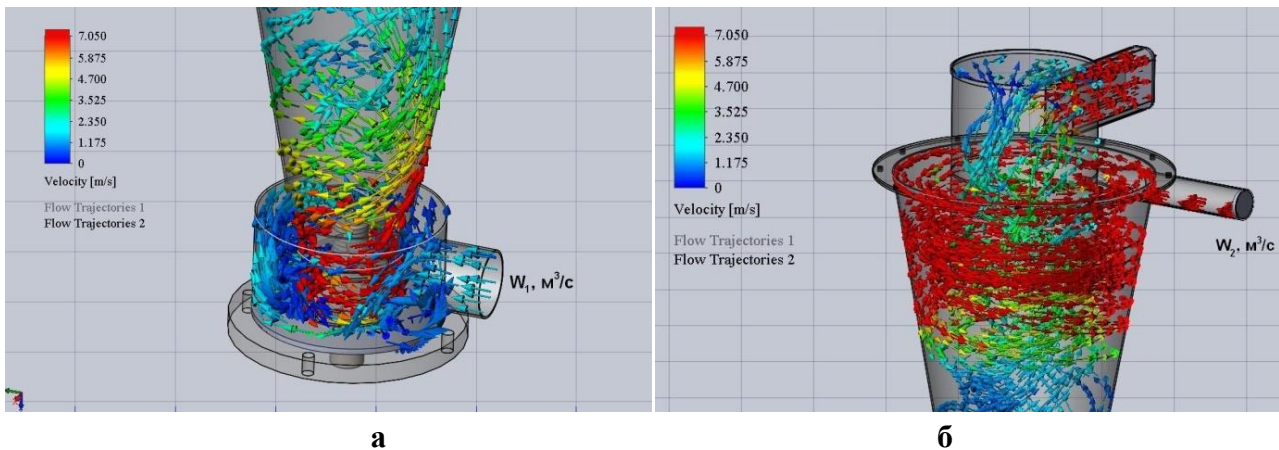
**Рис. 1. Схема оригінального сушильного апарату для сушіння тонкодисперсних матеріалів**

Сушильна камера 4 передбачає подачу теплоносія через два штуцери. В результаті в сушильній камері виникають вихрові потоки, в яких і відбувається процес висушування вологого продукту. В якості теплоносія використовується нагріте сухе повітря при температурі 90 – 120 °С. Ці потоки на кожній стадії відіграють важливу роль крім тепломасообмінних процесів,

ще й у переміщенні твердої дисперсії по відповідних зонах сушильної камери А, В, С, D (рис. 1).

За допомогою програми автоматизованого проектування Solid Works та симуляції Flow Simulation було розглянуто спроектовану 3D-модель сушильної вихрової камери та досліджено поля швидкостей і тисків вихрових потоків теплоносія.

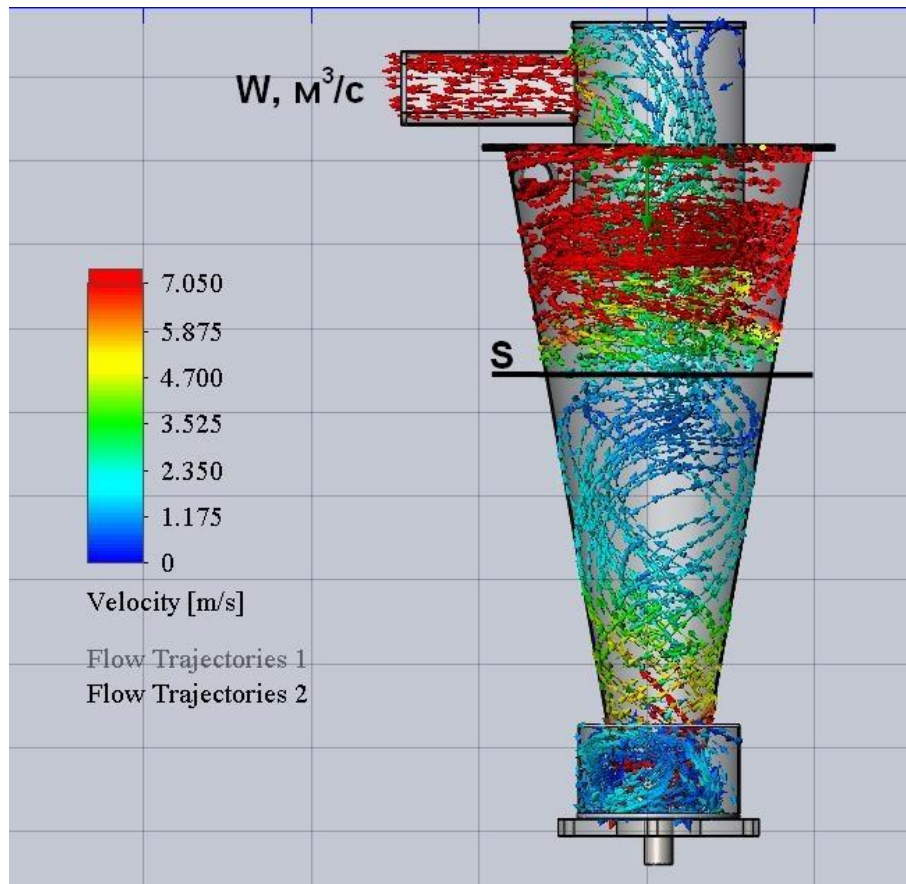
Основний потік сушильного агенту надходить у нижню частину сушильної камери 4 (рисунок 2.2а), в кількості  $W_1, \text{ м}^3/\text{с}$ , через патрубок 1 в дифузор 2, який розподіляє потік теплоносія на окремі потоки і направляє їх в диспергатор 3, де потоки закручуються у вихровий потік за напрямком обертання ножів. Одночасно у верхню частину сушильної камери (рисунок 2.2б) тангенційно вводиться, через патрубок 8, сушильний агент кількістю  $W_2, \text{ м}^3/\text{с}$ , на досушування тонкодисперсних частинок підсушеного матеріалу.



**а – основна подача теплоносія; б – подача теплоносія для досушування матеріалу**

**Рис. 2. Схеми потоків сушильного агенту**

В результаті два потоки зустрічаються в сушильній камері і утворюється загальний закручений вихровий потік сушильного агенту і частинок вологого матеріалу (рисунок 3), із якого видно, що в результаті закручення двох потоків в одну сторону, вони не руйнують один одного, а зустрічаючись в середній зоні камери у площині S, об'єднуються і виводяться із сушильної камери.



S – зона сепарації

Рис. 3. Утворення загального вихрового потоку

Положення зони S залежить від величини витрат сушильного агенту  $W_1$  і  $W_2$ ,  $\text{m}^3/\text{c}$ . Ця зона буде наближатися в сторону подачі меншої кількості сушильного агенту. В нижній частині камери відносно площини S відбувається сушіння продукту в першому періоді, власне в зоні площини S відбувається сепарації тонкодисперсних підсушених частинок матеріалу від вологих конгломератів, а у верхній частині вихрової камери відносно площини S відбувається досушування частинок до високої залишкової сухості.

Загальні витрати сушильного агенту можна записати, із врахуванням розмірності  $\text{m}^3/\text{c}$ , у вигляді:

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

де  $k$  – коефіцієнт подачі кількості сушильного агенту на досушування тонкодисперсних частинок матеріалу. Коефіцієнт  $k$  для визначення

необхідної кількості сушильного агента на досушування визначають із матеріального та теплового балансу процесу сушіння тонкодисперсного вологого матеріалу.

Як видно із епюри розподілу потоків теплоносія (рисунок 4), швидкості сушильного агента розділяються на дві складові: осьова і тангенційна. Осьова швидкість зосереджена по центру сушильної камери, і транспортує тонкодисперсні частинки матеріалу із зони розмелювання в зону досушування та виносить із камери. Тангенційна швидкість газової фази зосереджена по периферії сушильної камери, і сепарує частинки матеріалу та збільшує ефективність теплообміну між частинками і теплоносієм внаслідок турбулізації загального двохфазного потоку.

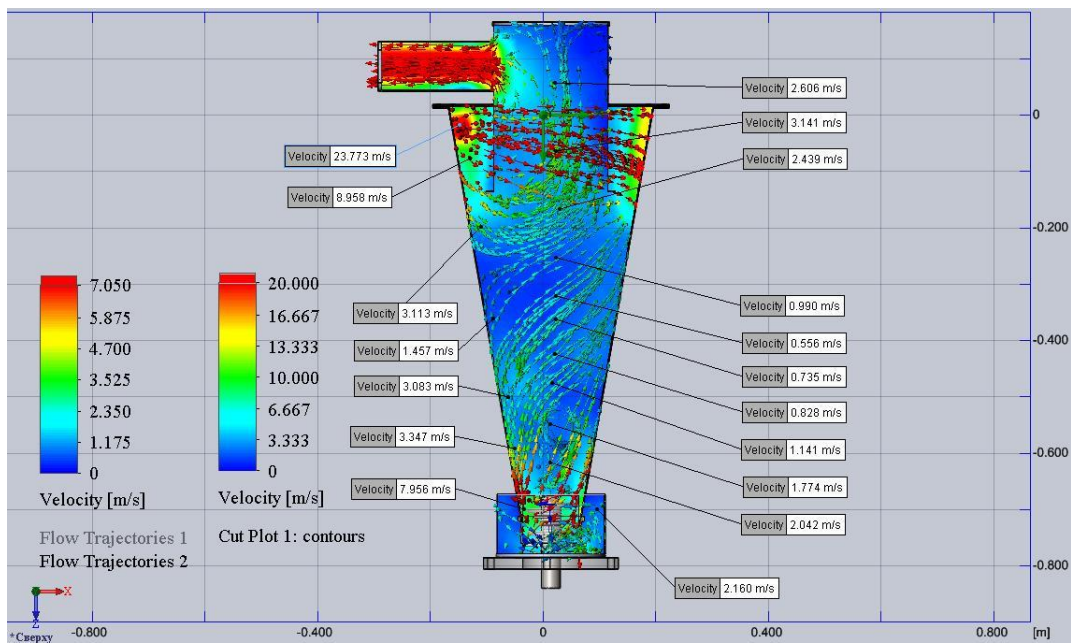
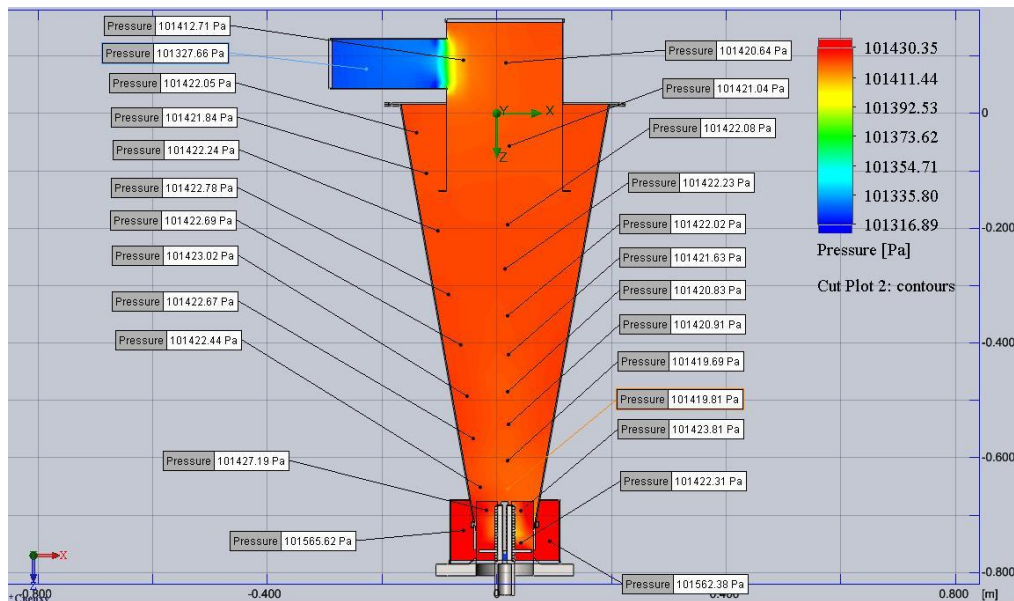


Рис. 4. Епюра розподілу швидкостей вихрових потоків теплоносія

Тангенціальна швидкість вихрового потоку зменшується внаслідок зменшення радіусу сушильної камери. Коефіцієнт закручування вихрових потоків є відношення тангенційної швидкості до осьової та складає 5,5 у нижній частині камери та 7,0 у верхній для даної конфігурації вихрової камери.

Як видно із епюри розподілу полів абсолютних тисків теплоносія по сушильній камері (рисунок 5), перепад тиску між входом теплоносія в камеру і виходом складає 150 – 160 Па. Внаслідок закручування вихрових потоків

теплоносія абсолютний тиск змінює свої значення від максимального  $P_{max}$  у верхній частині конусу камери до мінімального  $P_{min}$  у нижній. Ця важлива характеристика забезпечує пристінний рух частинок вологого матеріалу вниз в зону диспергування А. За технологією в зону досушування мають захоплюватись вихровими потоками теплоносія лише тонкодисперсні частинки матеріалу, які мають значні відношення зовнішньої поверхні до об'єму частинки  $k = \frac{6}{d}$ , де  $d$  – діаметр частинки, мм. Завдяки цьому відсутня відносна складова швидкості частинок матеріалу відносно теплоносія. Такі частинки виносяться радіальним потоком теплоносія в зону досушування і на вихід із вихрової камери.



**Рис. 5. Епюра розподілу полів абсолютних тисків теплоносія в оригінальній сушильній камері**

Проведено дослідження гідравлічного опору теплоносія для зони диспергування А і для всієї вихрової сушильної камери. Схема розташування штуцерів дифманометрів зображена на рисунку 6.

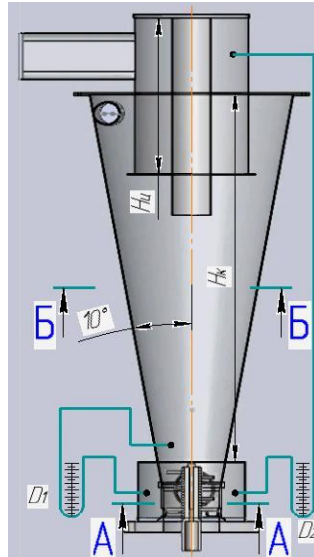


Рис. 6. Схема розміщення штуцерів дифманометрів  $D_1$  і  $D_2$

Експериментальним способом, за допомогою дифманометра  $D_1$  отримано графічну залежність (2) (рисунок 7) для зони диспергування в перерізі А-А:

$$\Delta P = f\left(\frac{w_d^2 \cdot \rho}{2}\right), \quad (2)$$

де  $\Delta P$  - перепад тиску теплоносія на зоні диспергування, Па;  $w_d$  - швидкість руху потоків теплоносія в зоні диспергування матеріалу, м/с;  $\rho$  - густина теплоносія, кг/м<sup>3</sup>·с.

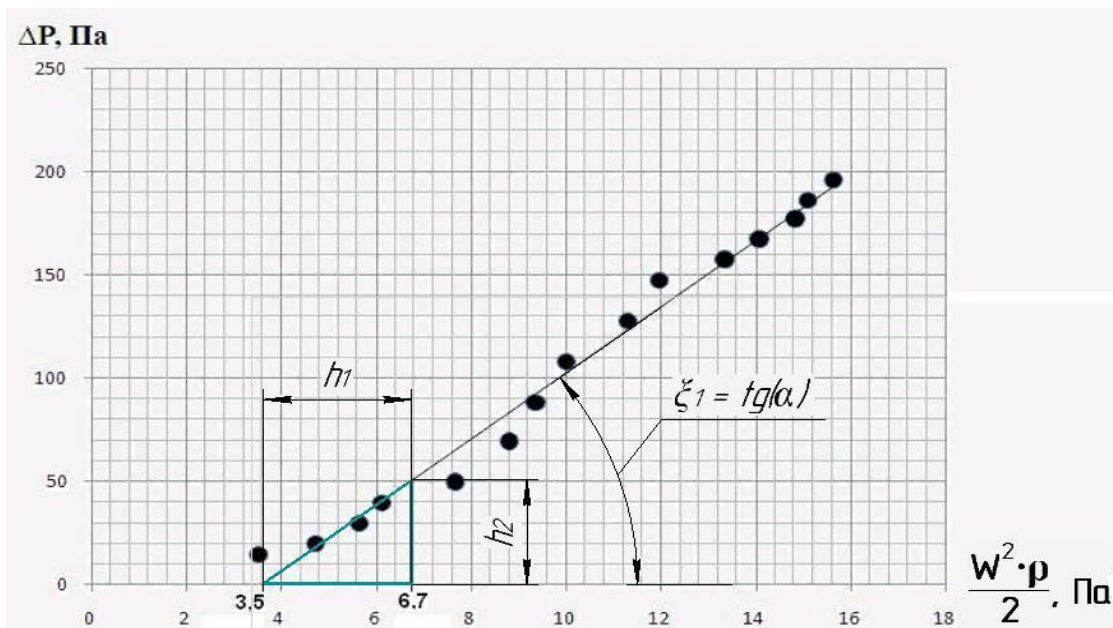


Рис. 7. Визначення коефіцієнта гідравлічного опору  $\xi_1$  для зони диспергування сушильної камери

Коефіцієнт гідравлічного опору складає  $\xi_1$  (3):

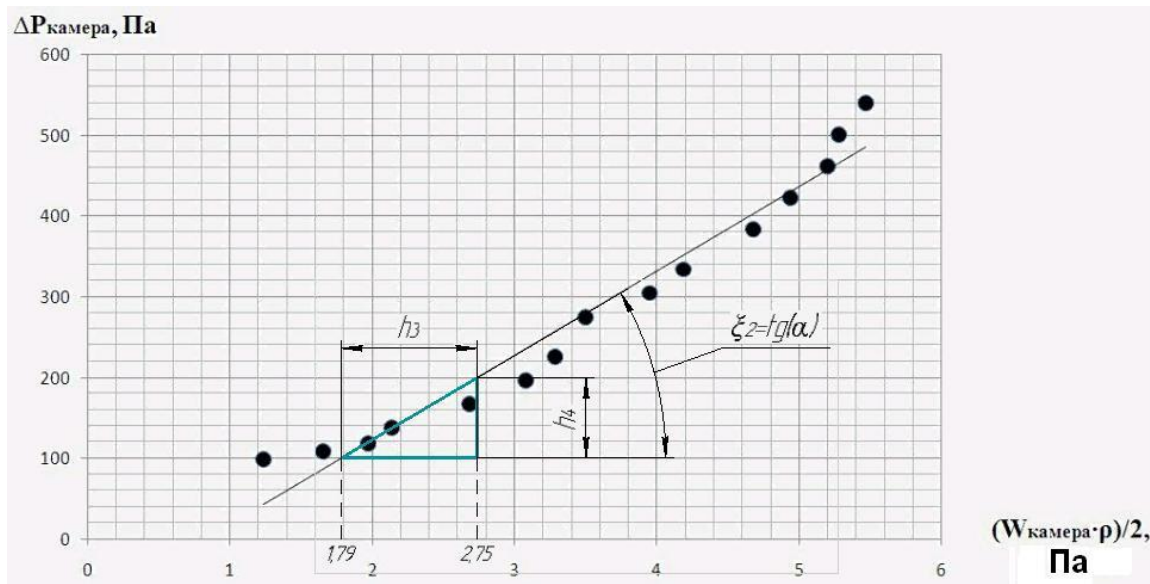
$$\xi_1 = \frac{h_2}{h_1} = \frac{50}{6,7-3,5} = 15,63 \quad (3)$$

Експериментальним способом також отримано графічну залежність (4) (рисунок 8) гідравлічного опору сушильної вихрової камери від величини динамічного напору в перерізі Б-Б:

$$\Delta P_{\text{камера}} = f\left(\frac{w_{\text{камера}}^2 \cdot \rho}{2}\right), \quad (4)$$

де  $\Delta P_{\text{камера}}$  - перепад тиску теплоносія для всієї сушильної камери, Па;

$w_{\text{камера}}$  – середня швидкість руху потоків теплоносія в сушильній камері, м/с.



**Рис. 8. Визначення коефіцієнта гідравлічного опору  $\xi_2$  для всієї сушильної камери графічним способом**

Коефіцієнт гідравлічного опору складає  $\xi_1$  (5):

$$\xi_2 = \frac{h_3}{h_4} = \frac{200-100}{2,75-1,79} = 104,17 \quad (5)$$

Знайдені коефіцієнти гідравлічного опору теплоносія є необхідні при проектуванні промислової вихрової камери.

### Висновки:

- розроблена оригінальна конструкція вихрової камери сушильної установки;



- виконано аналіз потоків газоподібного теплоносія у вихровій камері;
- визначено вірогідні зони першого періоду сушіння, сепарації і досушування;
- експериментально визначено залежності гідравлічного опору в зоні диспергування та в зоні досушування від величини динамічного напору, які є необхідними при проектуванні промислової вихрової камери.

### **Література**

1. Марчевський В. М. Процес сушіння діоксиду титану / В. М. Марчевський, Я. В. Гробовенко // Міжнародний науковий журнал. – 2016. – №5. – С. 22-25.
2. Иванов И. Г. Сушка мелкодисперсных материалов в кипящем слое / И. Г. Иванов // М.: Энергия, 2012. – 126 с.
3. Дмитриев В.М. Конвективная сушка полидисперсных материалов в аппаратах закрученного взвешенного слоя / В.М. Дмитриев, Е.А. Сергеева // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2013. – №3. – С. 602-606.
4. Амиров Я. С. Эффективность внедрения вихревых аппаратов (применительно к нефтехимическим производствам) / Я. С. Амиров.— Уфа: Изд-во "Реактив", 2001. - 347 с.