

УДК 664.661

**МАРЧЕВСЬКИЙ В. М.** к.т.н., проф.; **ВОЙТЮК В. О.**, магістрант  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## **ГАЗОРОЗПОДІЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ АПАРАТУ З ПСЕВДОЗРІДЖЕНИМ ШАРОМ**

*Робота присвячена вирішенню важливої науково-технічних проблеми – збільшенню гідродинамічної стійкості киплячого шару дисперсних продуктів шляхом вдосконалення конструкції газорозподільного пристрою. Запропоновано оригінальну конструкцію газорозподільного пристрою. Експериментально визначено коефіцієнт гідравлічного опору газорозподільного пристрою. Установлено залежність коефіцієнта гідравлічного опору газорозподільного пристрою від його геометричних параметрів та режиму течії теплоносія.*

**Ключові слова:** коефіцієнт гідравлічного опору, газорозподільний пристрій, псевдозріджений шар, решітка, шпальтова сітка.

**DOI: 10.20535/2617-9741.3.2021.241020**

© Марчевський В. М., Войтюк В. О., 2021

**Постановка проблеми.** Одним із основних недоліків високо-ефективних апаратів з киплячим шаром є недостатня гідродинамічна стійкість киплячого шару. В результаті чого відбувається залягання продукту на поверхню газорозподільного пристрою в окремих його місцях. Із зростанням площі, зайнятої відкладеннями, збільшується винос продукту з апарату. В результаті, апарат зупиняють для очищення, що потребує застосування непрямної ручної праці, збільшує втрати продукту і, взагалі, такі зупинки не допустимі в безперервному виробництві.

Результати аналізу експлуатації апаратів з киплячим шаром в промисловості показують, що гідродинамічна стійкість киплячого шару, в певній мірі, залежить від конструкції газорозподільного пристрою та коректності його розрахунків [1].

Нажаль, в літературних джерелах методи розрахунків газорозподільних пристроїв висвітлені недостатньо для їх проектування. Тому дослідження основних параметрів газорозподільних пристроїв, необхідних для їх проектування, актуальні.

**Аналіз попередніх досліджень.** Загальною науковою проблемою є те, що в монографіях провідних вчених наведено дуже скромні рекомендації з розрахунку і проектування газорозподільних пристроїв в апаратах киплячого шару.

Так в монографії П. Г. Романкова і Н.Б. Рашковської [2] гідравлічний опір розподільного пристрою радять приймати рівним половині гідравлічного опору киплячого шару. Ця рекомендація не враховує такі фактори як: питома маса псевдозрідженого продукту, швидкості псевдозрідження і виносу дрібних частинок продукту, геометричні параметри газорозподільного пристрою.

В монографії Б. С. Сажина рекомендується перепад тиску на газорозподільному пристрої не менше 1000 Па. За яких параметрів повинен бути такий перепад тиску не вказується [3].

В роботі [4] автори експериментальним методом отримали залежність, що зв'язує гідродинамічну стійкість псевдозрідженого шару з площею «живого» перетину отворів газорозподільного пристрою та з параметрами швидкісного режиму псевдозрідженого шару. За величину гідродинамічної стійкості приймалась різниця висот шару за якої припиняється псевдозрідження більш високого шару.

Отримана залежність дозволяє розрахувати площу отворів для проходу теплоносія, але не дає можливості розраховувати конструкцію газорозподільного пристрою, зокрема, конфігурацію і кількість отворів, їх розміщення, крок та гідравлічний опір. Для їх розрахунків необхідні експериментальні дослідження.

Невирішеною частиною наукової проблеми є те, що не можливо знайти точне теоретичне визначення коефіцієнтів гідравлічного опору, їх значення можуть бути знайдені тільки дослідним шляхом.

Метою роботи є встановлення основних параметрів газорозподільного пристрою, необхідних для їх проектування.

**Виклад основного матеріалу.** Механізм витрати енергії на подолання місцевих опорів, зв'язаних з дією сил інерції, і лише невелика частка енергії витрачається на подолання в'язкого тертя в області малих чисел Re. Газорозподільні пристрої можна розглядати як місцеві гідродинамічні опори, на подолання яких витрачається енергія газового потоку. Коефіцієнт місцевого опору залежить від конструкції газорозподільного пристрою і в меншій мірі від в'язкого тертя. Тому значення коефіцієнту місцевого опору теоретично розрахувати неможливо. Його величину визначають експериментально, користуючись рівнянням швидкісного напору (1).

$$\Delta P = \xi \frac{\rho \cdot V^2}{2}, \quad (1)$$

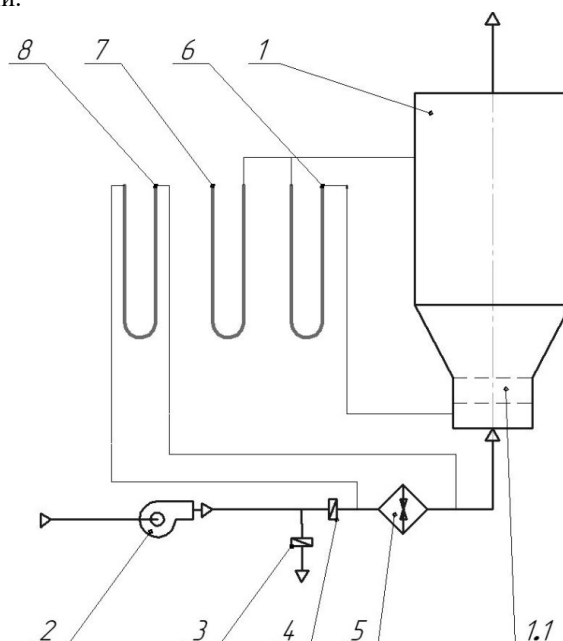
звідки коефіцієнт місцевого гідродинамічного опору

$$\xi = \frac{2 \cdot \Delta P}{\rho \cdot V^2}, \quad (2)$$

де  $\Delta P$  – перепад тиску на газорозподільному пристрої, Па;  $\rho$  – густина газу (повітря), кг/м<sup>3</sup>;

$V$  – швидкість газового потоку, м/с.

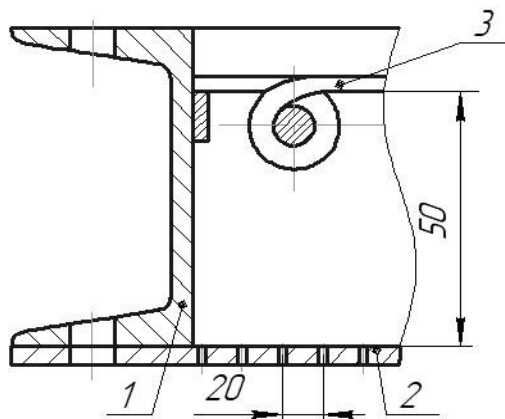
Величини, що входять в формулу (2) визначались експериментально на лабораторній установці рисунок 1 по перепаду статичного тиску на газорозподільному пристрої лабораторного апарату (1). Перепад тиску вимірювався водяним дифманометром, середньоквадратична похибка якого не перевищувала 0,5 Па. Витрати повітря, що забезпечував приточний вентилятор високого тиску (поз. 2 на рисунку 1) вимірювалися каліброваною діафрагмою в комплекті з водяним дифманометром. Конструкція лабораторного апарату (поз. 1 на рисунку 1) дозволяє легко встановлювати для дослідження газорозподільні пристрої з різними конструктивними елементами.



1 – апарат для досліджень; 1.1 – газорозподільний пристрій, що досліджується; 2 – вентилятор подачі повітря; 3,4 – шибери; 5 – діафрагма для вимірювання об'ємних витрат повітря; 6,7 – дифманометри; 8 – дифманометр водяний, що вимірює перепад тиску на діафрагм.

**Рис. 1 – Схема установки для дослідження гідравлічного опору газорозподільних пристроїв**

Конструкцію газорозподільного пристрою (1.1) наведено на рисунку 2.



1 – рама; 2 – газорозподільна решітка; 3 – шпальтова сітка

Рис. 2 – Конструкція газорозподільного пристрою

Рама 1 дозволяє якісно закріпити в один блок газорозподільну решітку і шпальтову сітку, забезпечивши паралельність їх поверхні. Шпальтова сітка 3 виконує функцію підтримки псевдозрідженого шару продукту. Її отвори не повинні допускати просипання продукту. Основним елементом газорозподільного пристрою є газорозподільна решітка, її площа перетину отворів віднесена до площі поверхні решітки збільшується зі збільшенням діаметру отворів.

Для проведення дослідів відібрані газорозподільні решітки з отворами діаметром: 3 мм, 4 мм, 5 мм і відповідною відносною площею перетину отворів  $F$  газорозподільної решітки до її поверхні  $F_1$ .

$$\frac{F}{F_1} = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot n}{4 \cdot B \cdot C}; \quad (3)$$

де  $d$  – діаметр отворів газорозподільної решітки, м;  $n$  – число отворів решітки;  
 $B, C$  – ширина і довжина робочої частини решітки, м;

$$\frac{F_3}{F_1} = 0.017; \quad \frac{F_4}{F_1} = 0.038; \quad \frac{F_5}{F_1} = 0.046.$$

де індекси 3, 4, 5 позначають діаметри отворів решіток.

Для визначення коефіцієнтів гідравлічного опору газорозподільних пристроїв (далі газорозподільного пристрою) проведено експериментальні дослідження трьох газорозподільних пристроїв з різними конструкціями решіток. Оброблені результати досліджень наведено на рисунку 3.

З графіку на рисунку 3 видно, що всі експериментальні точки задовільно описуються лінійними залежностями. Середнє квадратичне відхилення експериментальних точок від теоретичних прямих не перевищує  $\sigma \leq 37$  Па. Положення і нахил апроксимуючих прямих збільшується зі збільшенням діаметрів отворів газорозподільних решіток. Із літературних джерел [5,6,7,8] відомо, що на величину коефіцієнтів опору впливають такі основні параметри, як: відносна площа перетину отворів газорозподільної решітки до її загальної площі -  $\frac{F}{F_i}$  «живий» перетин; відношення товщини газорозподільної решітки до діаметру її отворів -  $\frac{l}{d_i}$ ; число  $Re$ . Враховуючи, що товщина розподільної решітки практично однакова (3 мм); для основної кількості апаратів, параметр  $\frac{l}{d}$  можна не враховувати.

Проведені досліди і літературні дані [7,8] показують що коефіцієнт гідравлічного опору практично не залежить від  $Re \geq 1000$ .

Аналіз наведених параметрів показує що основним фактором впливу на величину коефіцієнта гідравлічного опору є відношення  $\frac{F}{F_i}$ .

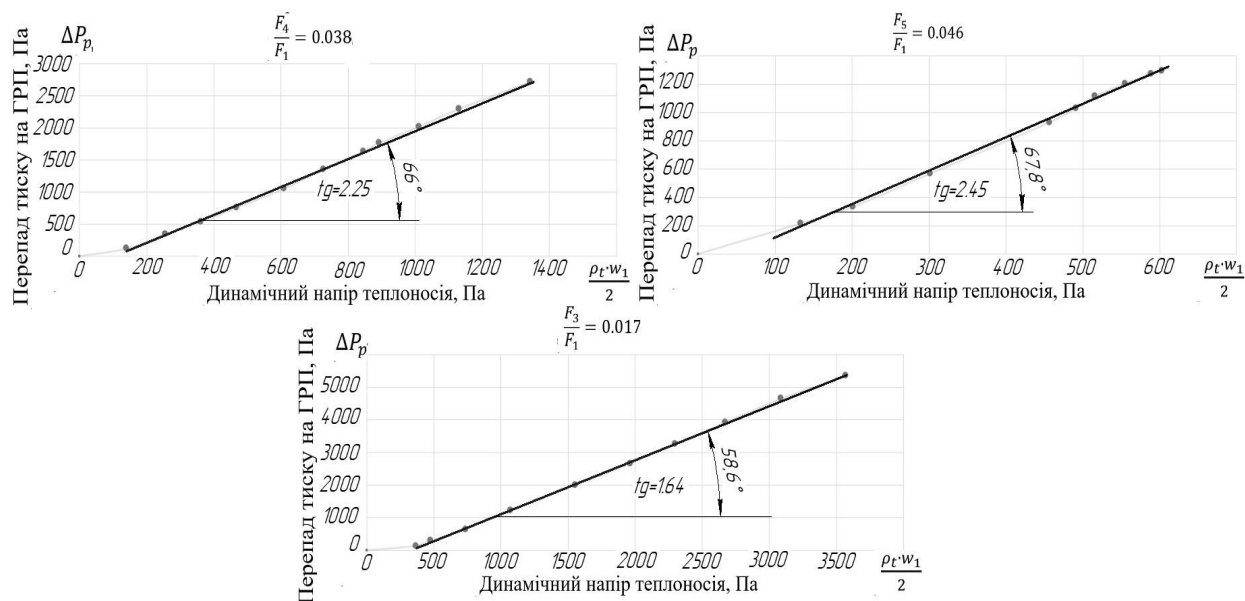


Рис. 3 – залежність перепаду тиску на газорозподільному пристрою від динамічного напору теплоносія

Результати дослідження впливу  $\frac{F}{F_i}$  на значення коефіцієнту опору наведено на рисунку 4.

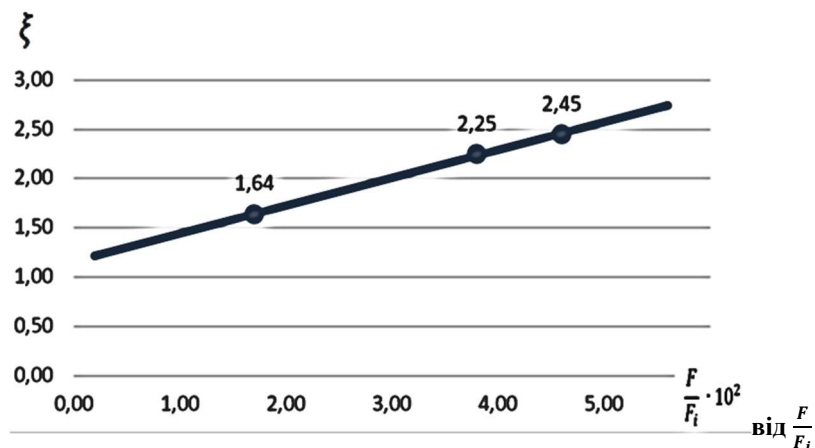


Рис. 4 – залежність коефіцієнта гідравлічного опору

Із рисунка 4 видно, що величина коефіцієнта гідравлічного опору збільшується із збільшенням  $\frac{F}{F_i}$  за лінійним законом. Відрізок 0 – 1, що відсікає апроксимуюча пряма на осі ординат відображає, очевидно, коефіцієнт гідравлічного опору шпальткової сітки.

$$\xi = 1 + K \cdot \frac{F}{F_i} \quad K = 0.33 \quad (4)$$

Отримане рівняння (4) з достатньою точністю описує залежність коефіцієнта гідравлічного опору від параметру  $\frac{F}{F_i}$  в межах  $1 \leq \frac{F}{F_i} \leq 5$ , середньоквадратичне відхилення  $\sigma = 0,075$ .

Найбільший вплив на величину коефіцієнту гідравлічного опору газорозподільного пристрою створює параметр  $\frac{F}{F_i}$ .

**Висновок.** Розроблена конструкція газорозподільного пристрою для апарату охолодження перліту та для великої групи інших апаратів з псевдо зрідженим шаром.

Виготовлено лабораторний модуль газорозподільного пристрою і лабораторну установку для дослідження впливу геометричних параметрів на значення коефіцієнту гідравлічного опору газорозподільного пристрою.

Встановлено, що основним фактором, який впливає на величину коефіцієнта гідравлічного опору є відносна площа «живого» перетину отворів газорозподільного пристрою

Встановлена експериментальна залежність  $\xi = 1 + K \cdot \frac{F}{F_i}$ ;  $K = 0.33$  для розрахунку коефіцієнту гідравлічного опору газорозподільного пристрою в межах  $1 \leq \frac{F}{F_i} \leq 5$ , що перекриває увесь робочий діапазон для апаратів псевдозрідженого шару.

**Перспективи подальших досліджень.** Перевірити всі типові конструкції апаратів з псевдозрідженим шаром на відповідність отриманого рівняння (4). Розробити методи збільшення гідродинамічної стійкості псевдозрідженого шару введенням фонтануючої складової. Розробити методіку розрахунку газорозподільного пристрою

### Список використаної літератури

1. Марчевский В.Н для сушки Агрегаты термолабильных материалов. Методические рекомендации / В.Н Марчевский – Киев: «знание», 1988. 20с.
2. Ромаков П.Г., Рашковская Н.Б. Сушка во взвешеном состоянии, изд. 3-е. перераб и доп. Л.: Химия, 1979. 212 с., ил. (серия «процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии»).
3. Сажин Б.С Основы техники сушки. М.: Химия, 1984. 320с., ил.
4. Марчевский В. Н. Устойчивость псевдооживления и расчет газораспределительных устройств / В. Н Марчевский, Р.Н. Жеребкина // вестник Киевского политехнического института. Хим. Машиностроение и технология, 1986. Вып 23. 45с.
5. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление; Справочное пособие. М. Энергоатомиздат, 1990, 369с.: Ил.
6. Дербунович Г. И., Земская А.С., Репик Е.У., Соседко Ю.П. Гидравлическое сопротивление перфорированных решеток. – Ученые записки ЦАГИ, 1984, т. 15, №2 с 114-118.
7. Tan-Atichat J., Nagib H.M., Loehrke R.I. interaction of free – stream turbulence with screens and grids: a balance between turbulence scales Journal of Fluid Mechanics, Volume 114, January 1982. pp. 501 – 528.
8. Идельчик Н.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1975. 415с.

Надійшла до редакції 01.04.2021

---

*Marchevsky V. M., Voitiuk V. O.*

### GAS DISTRIBUTION DEVICE OF THE FLUIDIZED BED APPARATUS

*A common scientific problem is that the monographs of leading scientists provide very modest recommendations for the calculation and design of gas distribution devices in fluidized bed apparatus.*

*So, in the monograph of P.G. Romankov and N.B. Rashkovsky, hydraulic resistance of the switchgear is advised to be taken equal to half the hydraulic resistance of the fluidized bed. This recommendation does not take into account such factors as: the specific gravity of the fluidized product, the rate of fluidization and removal of small particles of the product, and the geometric parameters of the gas distribution device.*

*In the monograph of B.S. Sazhin, it is recommended that a pressure drop on the gas distribution device is taken not less than 1000 Pa. What parameters should induce such a pressure drop is not specified.*

*In the work of V.M. Marchevsky and R.N. Zherebkina, the dependence connecting the hydrodynamic stability of the fluidized bed with the area of the "living" section of the openings in the gas distribution device and with the parameters*

of the velocity regime of the fluidized bed was obtained experimentally. The value of the hydrodynamic stability was taken as the difference in the bed heights at which the fluidization of the higher layer ceased.

The obtained dependence allows calculating the cross-sectional areas of the openings for the passage of the coolant, but does not allow calculating the design of the gas distribution device: in particular, the configuration and number of openings, their location, pitch and hydraulic resistance. Experimental studies are needed for their calculation.

The unsolved part of the scientific problem is that it is not possible to find an exact theoretical definition of the hydraulic resistance coefficients; their values can be found only experimentally.

Experiments and literature data show that the hydraulic resistance coefficient does not depend on numbers  $Re \geq 1000$ .

The main factor influencing the value of the hydraulic resistance coefficient is the ratio  $F / F_1$ , where  $F$  is the cross-sectional area of the lattice holes and  $F_1$  is the cross-sectional area of the apparatus.

Analysis of the parameters presented in this paper confirms that the value of the hydraulic resistance coefficient increases with increasing  $\frac{F}{F_1}$  according to the linear law  $\xi = 1 + K \cdot \frac{F}{F_1}$ ,  $K = 0.33$ . Segment 0 - 1, which cuts off the approximating line on the y-axis, reflects the hydraulic resistance coefficient of the columnar grid.

The obtained equation describes with sufficient accuracy the dependence of the hydraulic resistance coefficient on the parameter  $\frac{F}{F_1}$  in the range of  $0.01 \leq \frac{F}{F_1} \leq 0.05$ . The standard deviation of the experimental values of the hydraulic resistance coefficient from the calculated one is  $\sigma = 0.075$ .

It is established that the main factor influencing the value of the hydraulic resistance coefficient is the relative area of the "living" cross-section of the openings in the gas distribution device.

**Keywords:** hydraulic resistance coefficient, gas distribution device, fluidized bed, lattice, columnar grid.

### References

1. Marchevskij V.N. (1988) *Agregaty dlja sushki termolabil'nyh materialov*. Metodicheskie rekomendacii / V.N. Marchevskij – Kiev: «znanie», 20 p..
2. Romaknov P.G., Rashkovskaja N.B. (1979). *Sushka vo vzveshenom sostojanii*. izd. 3-e. pererab i dop. L.: Himija, 212 pp., il. – (serija «processy i aparati himicheskoj i neftehimicheskoj tehnologii).
3. Sazhin B.S. (1984). *Osnovi tehniki sushki*. M.: Himija, 320 pp., il.
4. Marchevskij V. N. (1986). *Ustojchivost' psevdoozhizenija i raschet gazoraspredivitel'nyh ustrojstv/* V. N. Marchevskij, R.N. Zhrebkina II vestnik Kievskogo politehnicheskogo instituta. Him. Mashinostroenie i tehnologija. Vip 23, 45 P.
5. Kutateladze S.S. (1990). *Teploperedacha i gidrodinamicheskoe soprotivlenie; Spravochnoe posobie-*. M. Jenergoatomizdat, 369s.: Il.
6. Derbunovich G. I., Zemskaia A.S., Repik E.U., Sosedko Ju.P. (1984). *Gidravlichesкое soprotivlenie perforirovanyh reshetok*. Uchenye zapiski CAGI, t. 15, №2 P. 114-118.
7. Tan-Atichat J., Nagib H.M., Loehrke R.I. (1982). *Interaction of free – stream turbulence with screens and grids: a balance between turbulence scales* *Journal of Fluid Mechanics*, Volume 114, January 1982, pp. 501 – 528.
8. Idel'chik N.E. *Spravochnik po gidravlicheskih soprotivlenijam*. M.: Mashinostroenie, 415 pp.