

## ВИЗНАЧЕННЯ КРИТЕРІАЛЬНОГО РІВНЯННЯ КОЕФІЦІЄНТА МІСЦЕВОГО ОПОРУ ПРЯМОТЕЧІЙНИХ ВІДЦЕНТРОВИХ СЕПАРАЦІЙНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЯК З АКсіАЛЬНО-ЛОПАТКОВИМ, ТАК І З ТАНГЕНЦІАЛЬНИМ ЗАВИХРЮВАЧЕМ

В.В. Тюрін

УкрНДІгаз – філія ДК “Укргазвидобування” НАК “Нафтогаз України”,  
61010, м. Харків, вул. Красношкільна наб., 20, тел. (057) 730-03-72, (0572) 63-75-74,  
e-mail: tiurins@mail.ru

*На основі експериментальних досліджень запропоновано критеріальне рівняння для розрахунку коефіцієнта місцевого опору прямотечієвих відцентрових сепараційних елементів, що дає змогу оцінити їх гідравлічний опір із різними аксіально-лопатковими завихрювачами з інтегральним параметром закрутки  $\Phi_* = 0,75 \div 1,48$ , тангенціальними завихрювачами з  $\Phi_* = 0,45 \div 3,03$  і відносною довжиною циліндричного патрубку  $l/d \leq 8$  як у сухому режимі, так і за наявності в потоці рідкої фази обсягом  $L_f \leq 106 \text{ м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{год})$ . Розбіжність експериментальних даних за гідравлічним опором з розрахунковими даними, отриманими на підставі запропонованого критеріального рівняння як в сухому, так і в зрошеному режимі, не перевищує 6%, що цілком прийнятно для інженерних розрахунків.*

*На основе экспериментальных исследований предложено критерияльное уравнение для расчёта коэффициента местного сопротивления прямооточных центробежных сепарационных элементов, позволяющее оценить их гидравлическое сопротивление с различными аксиально-лопаточными завихрителями с интегральным параметром закрутки  $\Phi_* = 0,75 \div 1,48$ , тангенциальными завихрителями с  $\Phi_* = 0,45 \div 3,03$  и относительной длиной цилиндрического патрубка  $l/d \leq 8$  как в сухом режиме, так и при наличии в потоке жидкой фазы в объёме  $L_f \leq 106 \text{ м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{час})$ . Расхождение экспериментальных данных по гидравлическому сопротивлению с расчётными данными, полученными на основании предложенного критерияльного уравнения как в сухому, так и в орошаемом режиме не превышает 6%, что целиком приемлемо для инженерных расчётов.*

*On experimental research basis the criterial equation for calculating a local resistance coefficient of straight-throw centrifugal separating elements is offered. It allows to estimate pressure drop of the separating elements with any axial-vaned twirlers with integral curl parameter  $F_* = 0,75 \div 1,48$ , tangential twirlers with  $F_* = 0,45 \div 3,03$  and relative length of their cylindrical pipe branch  $l/d \leq 8$  as on dry conditions as on specific density irrigation in value of  $L_f \leq 106 \text{ м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{h})$ . Divergence of experimental data and data calculated on the basis of the offered criterial equation does not exceed 6 %, which is quite acceptable for engineering calculations.*

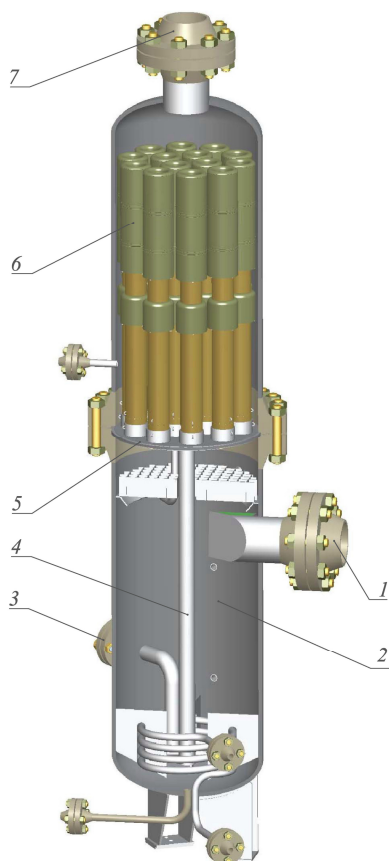
Однією з найважливіших проблем хімічної технології є якісне очищення великих об'ємів газу від крапельної рідини. Найбільш ефективне очищення великих об'ємів газу може бути здійснена в сепараторах відцентрового типу. Використання прямотечієвих відцентрових сепараційних елементів (ПВСЕ) дає змогу створити компактні апарати великої продуктивності та різко зменшити затрати на їх виготовлення, транспортування та монтаж.

Промислові сепаратори відцентрового типу (рис. 1) являють собою двосекційні апарати з осаджувальною секцією та секцією тонкого очищення газу, яку облаштовано тарілкою з ПВСЕ. В осаджувальній секції сепарація крапель з газового потоку відбувається під впливом сил тяжіння, у відцентрових сепараційних елементах – під впливом відцентрових сил. В сепараторах даного типу роль осаджувальної секції як пристрою, що сепарує, невелика й основна сепарація рідини з газового потоку відбувається у прямотечієвих відцентрових сепараційних елементах [1].

Створення високоефективних відцентрових сепараційних пристроїв можливо у разі достатнього вивчення аеродинаміки за наявності

достовірних математичних моделей сепарації крапель в ПВСЕ. Крім того, для інженера бажано володіти такими набором рівнянь, який би дав змогу враховувати всі впливові геометричні параметри та критерії подібності пристроїв та процесів, що ним проектуються, та оцінювати варіанти конструкторських проробок ще на стадії проектування.

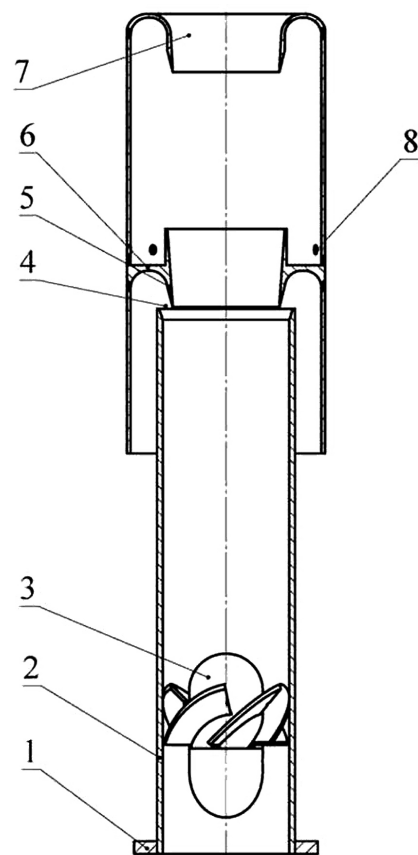
Відомі на даний час критеріальні рівняння коефіцієнта опору закрученому потоку в циліндричному каналі [2, 3] уможливають їх використання з відстані  $L/d = 14$  від завихрювача, де  $L$  – поздовжній розмір, а  $d$  – діаметр циліндричного каналу, м, в якому рухається закручений потік. Водночас переважна більшість конструкцій ПВСЕ мають циліндричний патрубок з  $L/d \leq 8$ . Саме тому практичний інтерес і актуальність має визначення коефіцієнта місцевого опору прямотечієвого відцентрового сепараційного елемента (рис. 2) з відносною висотою патрубку  $L/d \leq 8$  у вигляді критеріального рівняння, яке узагальнювало б будь-які конструкції аксіально-лопаткових (АЛ) або тангенціальних (ТЦ) завихрювачів і містило би безрозмірні параметри  $L/d$  та  $\Phi$ , де  $\Phi$  – інтегральний параметр закрутки.



1 – штуцер входу газорідинної суміші;  
2 – осаджувальна секція; 3 – штуцер виходу відсепарованої рідини; 4 – зливна труба; 5 – тарілка; 6 – ПВСЕ секції тонкого очищення газу; 7 – штуцер виходу газу

**Рисунок 1 – Принципова схема сепаратора з прямотечійними відцентровими сепараційними елементами**

Вирішення поставленого завдання потребує проведення експериментальних досліджень. Для їх проведення було використано лабораторну експериментальну установку відділу процесів і апаратів науково-дослідного інституту «УкрНДІгаз», спрощену схему якої представлено на рис. 3. Установка працює так: в колону 5 газ (повітря) подається вентилятором 1. Витрати повітря регулюються заслінкою 4 і заміряються за перепадом тиску на нормальній гострокутній діафрагмі 2 за допомогою дифманометра 3. Рідина (вода) подається в колону 5 відцентровим насосом 13 з бака для води 14 і розпилюється форсункою 7 в потік газу (повітря) перед ПВСЕ 8, який встановлюється на тарілку 6. Витрати води регулюються вентиляем 12 і заміряються ротаметром 11. Вентиль 15 використовується для відведення з колони 5 відсепарованої рідини. Вода, яка не потрапила у відцентровий сепараційний елемент 8, стікає вниз колони 5 і відводиться в мірний циліндр 16. Перепад тиску на тарілці 6 з встановленим ПВСЕ 8, а також конструктивних елементів самого ПВСЕ 8, вимірюється дифманометром 9, як під час роботи відцентрового сепараційного елемента в «сухому» режимі, так і за наявності в потоці рідкої фази.



1 – опорне кільце; 2 – патрубок; 3 – завихрювач; 4 – сепараційний зазор; 5 – коаксіальний патрубок; 6 – перегородка; 7 – сепараційна діафрагма; 8 – перфорація

**Рисунок 2 – Поздовжній перетин відцентрового сепараційного елемента**

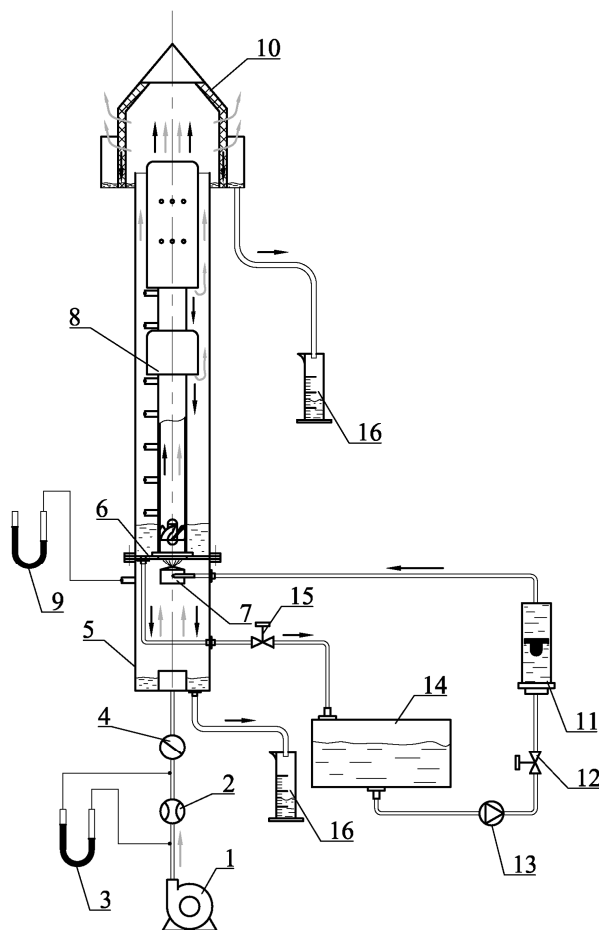
Для проведення досліджень було виготовлено АЛ-завихрювачі з прямими лопатками, що забезпечували інтегральний параметр закрутки  $\Phi^* = 0,88; 1,28; 1,48; 1,95$  та ТЦ-завихрювач, який давав змогу варіювати  $\Phi^*$  від 0,45 до 3,03. Досліджувався також шнековий завихрювач з  $\Phi^* = 0,75$ . Конструкція патрубку ПВСЕ давала змогу вимірювати гідравлічний опір закрученому потоку на відносній відстані від завихрювача  $L/d$ , рівній: 1, 2, 3, 4, 6 та 7. Ступінь діафрагмування патрубку ПВСЕ становила 0,85. Дослідження виконувались на системі «повітря – вода» в діапазоні зміни фактора швидкості газу в патрубку ПВСЕ  $F = 10 \div 45 \text{ м/с} \cdot (\text{кг/м}^3)^{0,5}$ , питомої щільності зрошення на елемент  $L_f = 65 \div 106 \text{ м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{годину})$ , що відповідало відношенню масової витрати рідини до газу  $L_m / G = 0,4 \div 2,2 \text{ (кг/кг)}$ .

Гідравлічний опір прямотечійних відцентрових сепараційних елементів визначається за відомою формулою

$$\Delta P = \zeta_{\text{ПВСЕ}} \cdot \rho_{\text{Г}} \cdot W^2 / 2, \text{ Па}, \quad (1)$$

де:  $\zeta_{\text{ПВСЕ}}$  – коефіцієнт місцевого опору прямотечійного відцентрового сепараційного елемента;

$\rho_{\text{Г}}$  – густина газу,  $\text{кг/м}^3$ ;  
 $W$  – середньовитратна швидкість газу в патрубку ПВСЕ,  $\text{м/с}$ .



1 – вентилятор; 2 – діафрагма; 3, 9 – дифманометр; 4 – заслінка; 5 – колона; 6 – тарілка; 7 – форсунка; 8 – прямотечійний відцентровий сепараційний елемент; 10 – уловлювач винесеної рідини; 11 – ротаметр; 12, 15 – вентиль; 13 – насос; 14 – бак; 16 – мірний циліндр

Рисунок 3 – Схема експериментальної установки

Для визначення вигляду рівняння коефіцієнта місцевого опору ПВСЕ за зразок обрано визначення автором [4] коефіцієнта місцевого опору як добутку коефіцієнта місцевого опору ПВСЕ в «сухому» режимі на коефіцієнт, що враховує наявність в потоці рідкої фази:

$$\zeta_{ПВСЕ} = \zeta_{ПВСЕ\_СУХ} \cdot \varepsilon, \quad (2)$$

де:  $\zeta_{ПВСЕ\_СУХ}$  – коефіцієнт місцевого опору сухого ПВСЕ;

$\varepsilon$  – коефіцієнт, що враховує наявність в потоці рідкої фази.

За відсутності в потоці рідкої фази коефіцієнт  $\varepsilon$  дорівнює 1.

Коефіцієнт місцевого опору сухого ПВСЕ доцільно представити у вигляді суми коефіцієнтів місцевого опору завихрювача  $\zeta_{ЗАВИХР}(\Phi^*)$ , патрубку  $\zeta_{ПАТР}(\Phi^*, L/d)$ , діафрагми  $\zeta_{ДИАФР}(\Phi_{вих})$  і коефіцієнта місцевого опору виходу закрученого потоку з труби (або діафрагми)  $\zeta_{ВИХ}(\Phi_{вих})$  як функцій від початкового інтегрального параметра закрутки завихрювача  $\Phi^*$ , інтегрального параметра закрутки на виході із патрубка ПВСЕ  $\Phi_{вих}$  і відносної висоти патрубка  $L/d$ :

$$\zeta_{ПВСЕ\_СУХ}(\Phi^*, \Phi_{вих}, L/d) = \zeta_{ЗАВИХР}(\Phi^*) + \zeta_{ПАТР}(\Phi^*, L/d) + \zeta_{ДИАФР}(\Phi_{вих}) + \zeta_{ВИХ}(\Phi_{вих}). \quad (3)$$

Вибір відповідних функцій та обробка результатів експериментальних досліджень за методом найменших квадратів дало підстави отримати такі рівняння для доданків рівняння (3):

– для АЛ-завихрювача при  $0,45 \leq \Phi^* \leq 1,5$

$$\zeta_{ЗАВИХР} = 1,61 \cdot \exp(1,251 \cdot \Phi^*), \quad (4)$$

коефіцієнт кореляції рівняння (4) дорівнює 0,93;

– для ТЦ-завихрювача при  $0,45 \leq \Phi^* \leq 2,6$

$$\zeta_{ЗАВИХР} = 2,1 \cdot \exp(0,82 \cdot \Phi^*), \quad (5)$$

коефіцієнт кореляції рівняння (5) дорівнює 0,99;

– для ТЦ-завихрювача при  $2,6 < \Phi^* \leq 3,03$

$$\zeta_{ЗАВИХР} = 32,44 \cdot \Phi^4 - 259,54 \cdot \Phi^3 + 769,84 \cdot \Phi^2 - 994,47 \cdot \Phi + 477,5, \quad (6)$$

коефіцієнт кореляції рівняння (6) дорівнює 0,999.

Критеріальне рівняння коефіцієнта місцевого опору сухого патрубка має вигляд

$$\zeta_{ПАТР} = [-0,329 \cdot \Phi^{1,68} \cdot \ln(L/d) + 0,785 \cdot \Phi^{1,72}] \cdot L/d, \quad (7)$$

коефіцієнт кореляції рівняння (7) дорівнює 0,967.

Критеріальне рівняння коефіцієнта місцевого опору сухої діафрагми має вигляд

$$\zeta_{ДИАФР}(\Phi_{вих}) = 0,363 \cdot \Phi_{вих} - 0,02, \quad (8)$$

коефіцієнт кореляції рівняння (8) дорівнює 0,999.

Критеріальне рівняння коефіцієнта місцевого опору виходу закрученого потоку з труби (або діафрагми) за відсутності рідкої фази в потоці має вигляд

$$\zeta_{ВИХ}(\Phi_{вих}) = 1,148 \cdot \Phi_{вих} - 0,373, \quad (9)$$

коефіцієнт кореляції рівняння (9) дорівнює 0,999.

Рівняння коефіцієнта  $\varepsilon$ , що враховує наявність в потоці рідкої фази, має вигляд

$$\varepsilon = 1 + 0,645 \cdot L_f^{1,12} / G^{0,823}, \quad (10)$$

коефіцієнт кореляції рівняння (10) дорівнює 0,959.

Якщо коефіцієнт  $\varepsilon$  необхідно виразити через питому масову щільність зрошення на елемент  $L_{sm}$ , тоді рівняння (10) має вигляд

$$\varepsilon = 1 + 9 \cdot 10^{-4} \cdot L_{sm} / G^{0,861}, \quad (11)$$

де  $L_{sm}$  – питома масова щільність зрошення на елемент, кг/(м<sup>2</sup>·год.).

Коефіцієнт кореляції рівняння (11) дорівнює 0,951.

Підставляючи рівняння (4) – (11) в (3) і (2), одержимо критеріальне рівняння коефіцієнта опору для прямотечійних відцентрових сепараційних елементів з відносною висотою патрубка  $L/d \leq 8$ , яке узагальнює будь-які конструкції АЛ-, та ТЦ-завихрювачів та містить безрозмірні параметри  $L/d$ ,  $\Phi^*$  та  $\Phi_{вих}$ . На його основі за до-

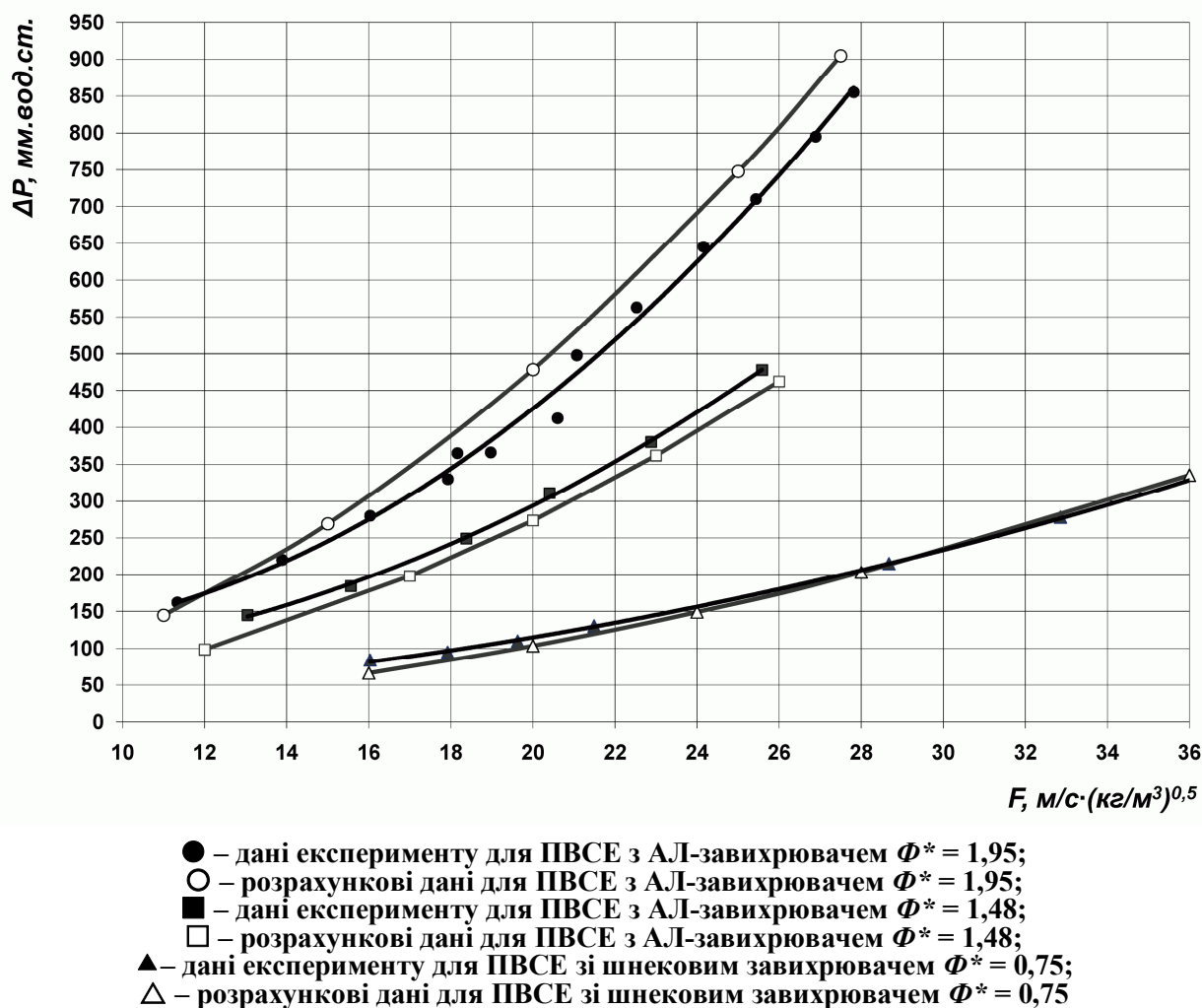


Рисунок 4 – Порівняння експериментальних даних за гідравлічним опором «сухого» ПВСЕ з розрахунковими

помогою рівняння (1) розраховується гідравлічний опір тарілки з ПВСЕ.

На рис. 4 зображено результати порівняння експериментальних даних по гідравлічному опорі «сухого» ПВСЕ з результатами, одержаними за рівняннями (1) – (9). Як видно, розрахункові дані добре зіставляються з експериментальними. Їх розбіжність не перевищує 6%, що уможливило їх використання в інженерній практиці.

На рис. 5 також представлено результати порівняння експериментальних даних за гідравлічним опором ПВСЕ в режимі зрошення з результатами, одержаними за рівняннями (1) – (11). Як видно розрахункові дані також добре співпадають з експериментальними. Розбіжність не перевищує 6%.

Отримавши експериментальні дані за гідравлічним опором як окремих складових конструкцій, так і всього ПВСЕ, можна проаналізувати їх внесок в загальний гідравлічний опір (рис. 6). Так гідравлічний опір дослідних завихрювачів складав в середньому 79% від опору всього ПВСЕ, на патрубок припадало близько 11%, діафрагму – 4%, опір виходу закрученого потоку з ПВСЕ – 6%.

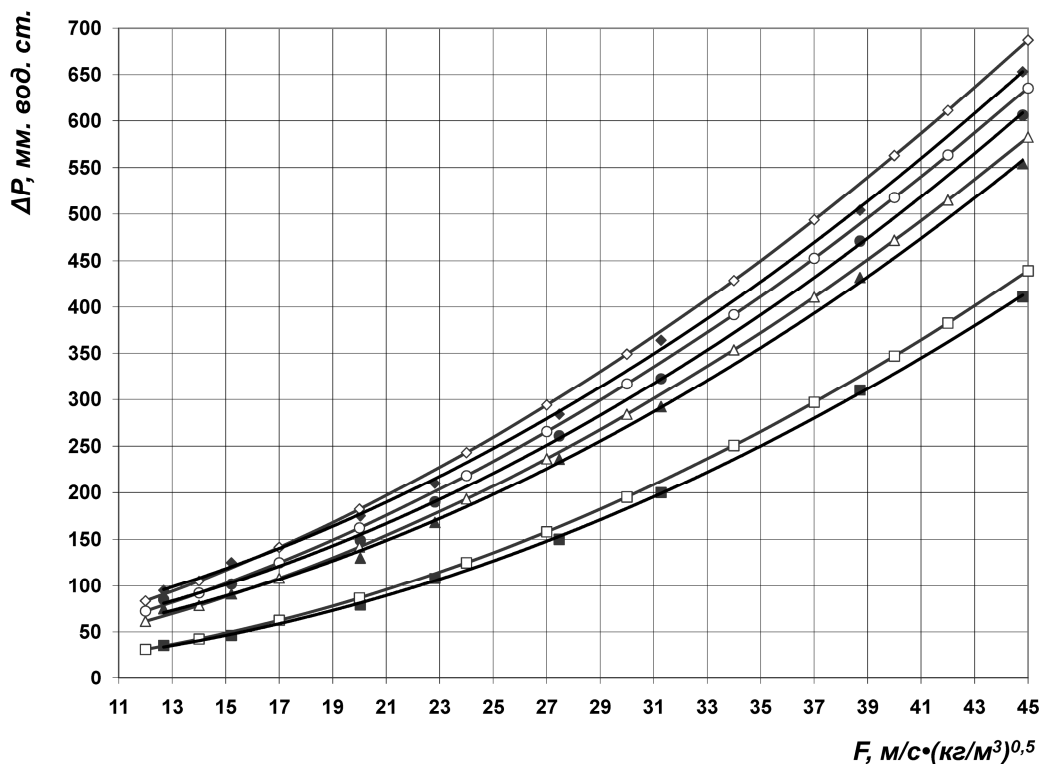
Одержані результати роботи дають підставу зробити такі висновки:

– за результатами експериментальних досліджень одержано критеріальне рівняння коефіцієнта опору ПВСЕ як з аксіально-лопатковим, так і з тангенціальним завихрювачами, яке включає інтегральні критерії подібності закручених плинів та геометричні параметри ПВСЕ, що дає змогу оцінювати різні інженерні напруження щодо сепараційних елементів вже на стадії їх проектування;

– дане критеріальне рівняння може використовуватись для ПВСЕ з відносною довжиною циліндричного патрубка  $L/d \leq 8$ , аксіально-лопатковими завихрювачами з  $\Phi^* = 0,75 \div 1,48$ , та тангенціальними завихрювачами з  $\Phi^* = 0,45 \div 3,03$ ;

– отримане рівняння дає змогу визначити гідравлічний опір ПВСЕ під час роботи як в «сухому» режимі, так і за наявності в потоці рідкої фази в об'ємі  $L_f \leq 106 \text{ м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{год.})$ ;

– розбіжність експериментальних даних за гідравлічним опором ПВСЕ з розрахунковими як в «сухому», так і в «зрошеному» режимах не перевищує 6%;



- ◆ – дані експерименту у процесі зрошення  $L_f = 106 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{годину})$ ;
- ◇ – дані розрахунку у процесі зрошення  $L_f = 106 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{годину})$ ;
- – дані експерименту у процесі зрошення  $L_f = 86 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{годину})$ ;
- – дані розрахунку у процесі зрошення  $L_f = 86 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{годину})$ ;
- ▲ – дані експерименту у процесі зрошення  $L_f = 65 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{годину})$ ;
- △ – дані розрахунку у процесі зрошення  $L_f = 65 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{годину})$ ;
- – дані експерименту у процесі зрошення  $L_f = 0 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{годину})$ ;
- – дані розрахунку у процесі зрошення  $L_f = 0 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{годину})$

Рисунок 5 – Порівняння експериментальних даних за гідравлічним опором з розрахунковими для ПВСЕ з ТЦ-завихрювачем ( $\Phi^* = 0,65$ )

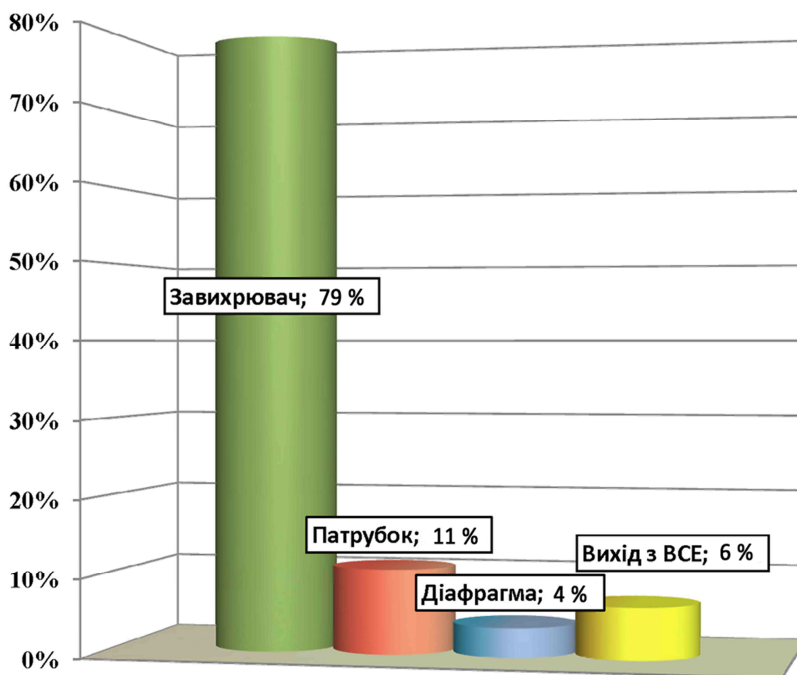


Рисунок 6 – Частка гідравлічних опорів окремих конструктивних складових сепараційного елемента в загальному опорі ПВСЕ

– отримане рівняння дасть змогу підвищити якість інженерних розрахунків сепараційного обладнання на базі ПВСЕ.

### *Література*

1 Ланчаков Г.А. Технологические процессы подготовки природного газа и методы расчёта оборудования / Г.А. Ланчаков, А.Н. Кульков, Г.К. Зиберт. – М.: ООО "Недра-Бизнес-центр", 2000. – 279 с.

2 Шукин В.К. Теплообмен, массообмен и гидродинамика закрученных потоков в осесимметричных каналах / В.К. Шукин, А.А. Халатов. – М.: Машиностроение, 1982. – 200 с.

3 Халатов А.А. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил / А.А. Халатов, А.А. Авращенко, И.В. Шевчук: в 6 т. – Киев: АН Украины. Институт технической теплофизики, 2000. – Т. 3. – 467 с.

4 Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справочное пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.

*Рекомендовано до друку Оргкомітетом науково-технічної конференції молодих вчених „Техніка і прогресивні технології у нафтогазовій інженерії”, яка відбулася в ІФНТУНГ 16-20.09.2008 р.*