

УДК 504:628.3:532.5

В.О. Михайлюк, канд. техн. наук, доц.
В.І. Тюрін, канд. техн. наук

ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК БАГАТОСТУПЕНЕВИХ РІЗНОШВИДКІСНИХ ГІДРОЦИКЛОНІВ

Розглянуто характеристики плинку технологічних нафтовмісних вод у багатоступеневих різношвидкісних гідроциклонів з робочими камерами зі змінним поперечним перетином. Наведено теоретичне обґрунтування умов, котрі сприяють їх запровадженню для розподілу нафтовмісних вод у системах їх підготовки до повторного використання чи повернення у навколишнє середовище.

In the given work characteristics of technological petrocontaining water current in multistage hydrocyclones at various speeds containing working chambers with changing cross-section sections are examined. The theoretical substantiation of the conditions promoting their application for division of petrocontaining water in systems of their preparation for reuse or returning in environment is brought.

Постановка проблеми

Запобігання забрудненню навколишнього середовища нафтою та продуктами її перероблення залишаються однією з актуальних проблем сучасності. Дійовими напрямками зменшення кількості забрудненої води нафтопродуктами (НП) є розроблення та запровадження маловідходних технологій, створених на підґрунті систем зворотного водопостачання промислових об'єктів. З урахуванням того, що забруднені НП технологічні (стічні) води утворюються на багатьох підприємствах, транспорті, на всіх теплоелектростанціях незалежно від виду використовуваного палива [1], проблема постає як завдання державного рівня.

Із загальної кількості пристроїв, здатних забезпечити потрібну для використання у технологічних процесах якість значних обсягів нафтовмісних вод, як найбільш прості, економічні та зручні у використанні, можуть бути рекомендовані силові роздільники – гідроциклони (ГЦ) [2]. Проте без ефективних інженерних рішень, які б урахували особливості якісного складу технологічних нафтовмісних вод (ТНВ), стримує поширення ГЦ у системах водопідготовки. Численні спроби застосувати відомі три продуктивні ГЦ, котрі відокремлюють одночасно легку (НП) і важку (механічні домішки) фази, позитивного результату не дають. Причина полягає у складності забезпечення накладання водночас відцентрових сил різної величини для видалення відповідних компонентів ТНВ. Оптимальні умови, за яких осаджуються механічні домішки, призводять до руйнування крапель нафти. Гідроциклон при цьому не тільки не відокремлює їх від суцільного середовища, а навпаки роздрібнює, працюючи як змішувач.

Зниження силового впливу на нафтові частинки (НЧ) до значень, властивих слабкому вторинному емульгуванню НП, припиняє перерозподіл механічних домішок у потоці ТНВ і утруднює їх видалення. Тому дослідження процесів, що відбуваються під час роботи таких пристроїв, характеризується значним спектром питань, що потребують відповідного теоретичного обґрунтування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Для опису гідродинаміки ГЦ науковці використовували різні залежності, наприклад рівняння гвинтового руху [3], основні рівняння гідродинаміки тощо. Так, у праці [4] як вихідні було запроваджено рівняння Нав'є – Стокса, записані у розгорнутій формі в циліндричній системі координат. При цьому, застосовані допущення відображають справжню сутність процесів, що відбуваються у ГЦ, тільки у віддаленому наближенні і їх використання не може бути коректним. Відома також праця [5], у якій описано гідродинаміку малошвидкісних ГЦ за допомогою спрощених рівнянь Нав'є – Стокса, але їх можна використовувати тільки для визначення гідродинамічних характеристик циліндричних ГЦ з постійним поперечним перетином робочої камери (РК).

Мета цієї роботи – визначення характеристик багатоступеневих різношвидкісних гідроциклонів (БРГ) шляхом аналізу гідродинамічних особливостей поведінки потоку ТНВ під час оброблення в них. Установлення умов, що сприяють реалізації процесів, які відбуваються у БРГ, можливе через числове моделювання обраного режиму витрати ТНВ у його РК на відповідному ступені очищення. Тому доцільно розробити методичку, за допомогою якої можливі уточнення та доведення до оптимальних значень параметрів конкретних РК ступенів БРГ.

Аналіз гідродинамічних особливостей

Для аналізу гідродинамічних особливостей обрано розроблену авторами оригінальну конструкцію двоступеневого БРГ [2; 3; 6] з РК зі змінним прохідним перетином. Його схему показано на рис. 1.

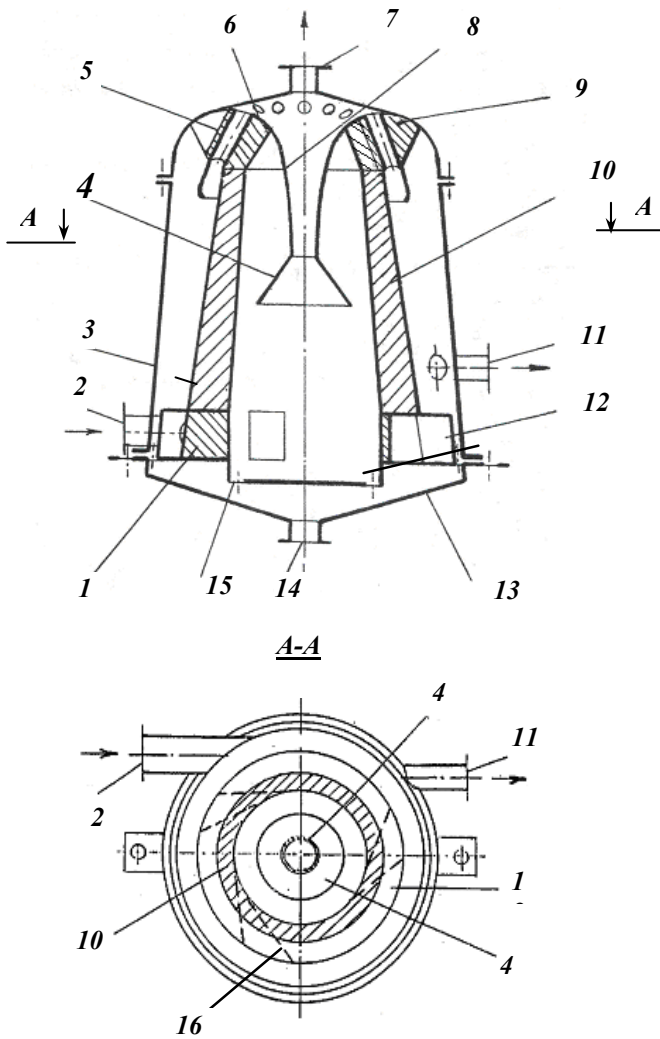


Рис. 1. Багатоступеневий різношвидкісний гідроциклон:

- 1 – розподільник;
- 2 – патрубок підведення ТНВ;
- 3 – РК II ступеня;
- 4 – нафтозахоплювальний пристрій;
- 5 – канали напрямного апарата II ступеня;
- 6 – отвори розподільного екрана;
- 7, 8 – патрубки відведення НП;
- 9 – напрямний апарат другого ступеня;
- 10 – корпус;
- 11 – патрубок для відведення очищеної води;
- 12 – РК I ступеня;
- 13 – шламозбірник;
- 14 – патрубок відведення шламу;
- 15 – отвори;
- 16 –напрямний апарат I ступеня

Умови, що створюються у поданому БРГ, сприяють для максимального відділення різних за розміром НЧ з ТНВ. Ступеневе збільшення кутової швидкості потоку ТНВ, що очищається на ступенях БРГ, дозволяє не допустити вторинного емульгування і забезпечити виділення більшої кількості дрібних НЧ. Для цього в першому ступені забезпечено кутову швидкість обертowego потоку ТНВ у межах 1...2 м/с. За таких умов великі НЧ (до 100 мкм у діаметрі) не дроблячись згущуються у поздовжній осі РК 12, після чого видаляються за допомогою нафтозахоплювального пристрою 4. На наступному ступені очищення у РК 3 кутова швидкість обертowego потоку ТНВ підвищена до 5...7 м/с. За таких швидкостей дрібні НЧ (15...30 мкм у діаметрі) також зазнають впливу від зусиль відцентрових сил, що веде до їх концентрування і наступного видалення у збирач. Багатоступеневий різношвидкісний гідроциклон працює у такий спосіб.

Потік рідини через патрубок 2 підведення ТНВ, розподільник 1, вхідний напрямний апарат 16 надходить у РК першого ступеня 12 БРГ, у якій відбувається початковий перерозподіл його складових: переміщення відносно великих НЧ до поздовжньої осі, а механічних домішок – до стінок корпусу 10. Нафтові частинки, що сконцентрувалися у середині РК за допомогою нафтозахоплювального пристрою 4 через патрубок 7 видаляються у збірник. Механічні домішки через отвори 15 надходять у шламозбірник 13, а заздалегідь очищена ТНВ через напрямний апарат 9 подається на подальше оброблення у РК 3 другого ступеня. Оскільки для перерозподілу НЧ меншого розміру в потоці потрібна більша величина відцентрових сил, то у напрямному апараті другого ступеня 9 підвищується швидкість заздалегідь очищеної ТНВ. Нафтові частинки переміщуються до зовнішньої стінки корпусу 10 і, скоалесцювавши на ній, підіймаються вгору, де через отвори розподільного екрана 6 і патрубків 7 виводяться з БРГ. Очищена вода видаляється через патрубок 7.

На ефективність роботи БРГ значно впливають геометричні параметри його РК, які визначають режим плинності ТНВ. Оскільки рух рідини в них досить складний, точне обчислення характеристик плинності – важка математична задача. У роботі пропонується спрощений підхід до розрахунку характеристик плинності ТНВ у БРГ зі змінним поперечним перетином робочих камер, на підґрунті припущення постійності величини примежового шару.

Уявимо потік рідини у вигляді гвинтової плинності з кутовою швидкістю Ω , що залежить від відстані до нижньої основи РК 12.

Складова швидкості вздовж осі z БРГ W також змінюється зі зміною цієї відстані через зміну площі поперечного перетину його РК. Будемо вважати, що розглянута робоча камера БРГ являє собою вісесиметричне тіло з радіусом поперечного перетину, який залежить від її висоти (рис. 2).

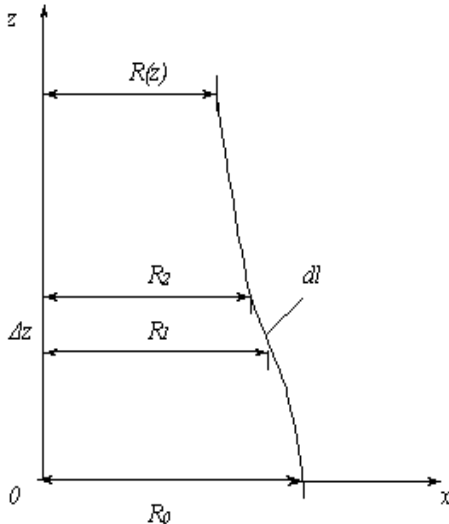


Рис. 2. Розрахункова схема параметрів робочої камери БРГ

Покладемо, що W постійна за поперечним перетином, крім примежового шару біля стінки і товщина цього шару мала порівняно з радіусом. Також будемо вважати, що в поперечному перетині ТНВ обертається навколо осі з кутовою швидкістю Ω , крім примежового шару біля стінки. Товщину цього шару будемо вважати теж малою порівняно з радіусом РК і постійною уздовж усієї поверхні стінки і рівною δ .

Для розрахунків використаємо величину δ , типу для плинності зі швидкістю, що відповідає розглядуваній. Уведемо циліндричну систему координат x, z, φ . Вісь oz спрямуємо уздовж осі БРГ, а вісь ox – уздовж його радіуса. Відстань від осі до бічної стінки робочої камери БРГ інтерпретуємо як деяку залежність $R(z)$. Нехай об'ємна витрата рідини дорівнює Q . Тоді, визнаючи, що товщина примежового шару мала, Q і $W(z)$ будуть пов'язані такою залежністю:

$$W(z)\pi R^2(z) = Q.$$

Звідси визначимо залежність компоненти швидкості W . Якщо знайдемо Ω від z , то отримаємо опис плинності рідини у робочій камері БРГ, потрібний для розрахунку рухів крапель НП і визначення його розділових характеристик.

Припустимо, що у входному перетині робочої камери БРГ кутова швидкість дорівнює Ω_0 . Для встановлення залежності кутової швидкості від місця розміщення перетину по осі z , відокремимо на висоті z горизонтальний шар товщиною Δz . Розглянемо сталий режим плинну. У цьому випадку момент імпульсу досліджуваного шару залишається незмінним. Отже, кількість моменту імпульсу, що надходить за час Δt через нижній перетин за винятком того, що виноситься через верхній перетин, компенсує момент сил тертя на бічній стінці, помножений на інтервал часу Δt , тобто

$$\int_0^{R_1} W(z)\rho 2\pi x \Omega(z) x \Delta t dx - \int_0^{R_2} W(z + \Delta z)\rho 2\pi x \Omega(z + \Delta z) x \Delta t dx = F_{\text{тер}} R \Delta t, \quad (1)$$

де $R \approx R_1$, якщо вважати величину Δz малою порівняно з R_1 .

Силу тертя визначимо, виходячи з відомої товщини примежового шару δ , за умови, що градієнт дотичної швидкості поблизу межі дорівнює $\Omega R / \delta$, отже,

$$F_{\text{тер}} = \mu \frac{\Omega R}{\delta} 2\pi R \Delta l,$$

де μ – коефіцієнт динамічної в'язкості рідини, Па·с;

Δl – довжина ділянки уздовж стінки для шару висотою Δz , м;

ρ – щільність рідини, кг/м³.

Для Δl можна записати:

$$\Delta l = \sqrt{\Delta z^2 + \Delta R^2} = \sqrt{1 + \left(\frac{dR}{dz}\right)^2} \Delta z.$$

Підставимо ці вирази в рівняння (1) і другий інтеграл у ньому перетворимо на два з областями визначення від 0 до R_1 і від R_1 до R_2 . Тоді можна записати:

$$\int_0^{R_1} (W(z)\Omega(z) - W(z + \Delta z)\Omega(z + \Delta z))\rho 2\pi x^3 \Delta t dx - \int_{R_1}^{R_2} W(z + \Delta z)\Omega(z + \Delta z)\rho 2\pi x^3 \Delta t dx = \mu \frac{\Omega(z)R_1}{\delta} 2\pi R_1^2 \Delta t \sqrt{1 + \left(\frac{dR}{dz}\right)^2} \Delta z$$

або

$$\begin{aligned}
 & - (W(z + \Delta z)\Omega(z + \Delta z) - W(z)\Omega(z))2\pi\rho\Delta t \frac{R_1^4}{4} - \\
 & - W(z + \Delta z)\Omega(z + \Delta z)2\pi\rho\Delta t \frac{R_2^4 - R_1^4}{4} = \\
 & = \mu \frac{\Omega(z)}{\delta} 2\pi R_1^3 \Delta t \sqrt{1 + \left(\frac{dR}{dz}\right)^2} \Delta z.
 \end{aligned}$$

Якщо поділити на Δt і Δz , замінити R_1 на R і спрямувати $\Delta z \rightarrow 0$ (при цьому $R_2 \rightarrow R_1$), то отримаємо:

$$\begin{aligned}
 & - \frac{d(W\Omega)}{dz} \pi\rho \frac{R^4}{2} - W\Omega\pi\rho \frac{1}{2} \frac{(R_2 - R_1)(R_2 + R_1)(R_2^2 + R_1^2)}{\Delta z} = \\
 & = \mu \frac{R}{8} 2\pi R^3 \sqrt{1 + \left(\frac{dR}{dz}\right)^2}; \\
 & - \frac{d(W\Omega)}{dz} \pi\rho \frac{R^4}{2} - (W\Omega)\pi\rho R^3 \frac{dR}{dz} = \\
 & = \mu \frac{\Omega}{8} 2\pi R^3 \sqrt{1 + \left(\frac{dR}{dz}\right)^2},
 \end{aligned}$$

оскільки $W\pi R^2 = Q = \text{const}$, то

$$- \frac{\rho R^2 Q}{2} \frac{d\Omega}{dz} - 2\Omega R Q \frac{dR}{dz} \Omega = \mu \frac{\Omega}{8} 2\pi R^3 \sqrt{1 + \left(\frac{dR}{dz}\right)^2}$$

або

$$\frac{d\Omega}{dz} = - \frac{4}{R} \frac{dR}{dz} - \frac{4\pi\nu}{\delta Q} R \sqrt{1 + \left(\frac{dR}{dz}\right)^2},$$

де $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ – коефіцієнт кінематичної в'язкості рідини, $\text{м}^2/\text{с}$.

Оскільки концентрація частини НП у ТНВ досить мала, бо досліджувана рідина належить до сильно розбавлених водонафтових емульсій, то в'язкість і густину ТНВ для розрахунків можна (для попереднього наближення) вважати рівними в'язкості та густини води.

Для простоти аналізу розглянемо випадок, коли R залежить від z лінійно,

тобто $R = R_0 + \alpha z$,

де α – деякий коефіцієнт, тоді:

$$\frac{d\Omega}{dz} = - \frac{4\alpha}{(R + \alpha z)} - \frac{4\pi\nu}{\delta Q} (R_0 + \alpha z) \sqrt{1 + \alpha^2};$$

$$\ln \Omega = -4 \ln(R_0 + \alpha z) - \frac{4\pi\nu}{\delta Q} \sqrt{1 + \alpha^2} \left(R_0 z + \frac{\alpha z^2}{2}\right) + C;$$

$$\Omega = \frac{\Omega_0 R_0^4}{(R_0 + \alpha z)^4} e^{-\frac{4\pi\nu\sqrt{1+\alpha^2}(R_0 z + \frac{\alpha z^2}{2})}{\delta Q}}.$$

Зокрема, якщо радіус не змінюється, тобто $\alpha = 0$, то Ω зменшується з висотою за законом:

$$\Omega = \Omega_0 e^{-\frac{4\pi\nu R_0 z}{\delta Q}}. \tag{2}$$

Залежність (2) можна використовувати для експериментального визначення товщини примежового шару. Для цього досить виміряти кутову швидкість у циліндричному ГЦ на двох різних висотах, наприклад, спостерігаючи за рухом пухирця повітря у його робочій камері.

Перейдемо у залежності Ω (2) від z до безрозмірних параметрів, використовуючи як характерну відстань R_0 , характерної кутової швидкості Ω_0 :

$$\Omega' = \frac{1}{(1 + \alpha z')^4} e^{-4\pi\nu\sqrt{1+\alpha^2}\left(z' + \frac{\alpha z'^2}{2}\right)},$$

$$\Omega' = \Omega / \Omega_0;$$

$$z' = z / R_0,$$

де ψ – безрозмірний параметр, який характеризує плинність рідини у РК БРГ:

$$\psi = \frac{\nu R_0^2}{\delta Q}.$$

У наведених залежностях для безрозмірної кутової швидкості та відстані використано такі самі позначення, що й для розмірних величин.

Оскільки радіус не може бути меншим від деякого значення, то $(1 + \alpha z')$ змінюється від одиниці до деякого значення, більшого за нуль. Якщо дослідити похідну Ω за z , то на площині $\alpha \psi$ можна виділити три ділянки (рис. 3):

1) ділянка I, якщо $\alpha \geq 0$, $\psi > 0$, де Ω спадає;

2) ділянка II, якщо $\alpha < 0$, $\psi > \frac{-\alpha}{\pi\sqrt{1+\alpha^2}} - \Omega$ за малих z спадає, потім зростає;

3) ділянка III, якщо $\alpha < 0$, $\psi \leq \frac{-\alpha}{\pi\sqrt{1+\alpha^2}} - \Omega$ зростає.

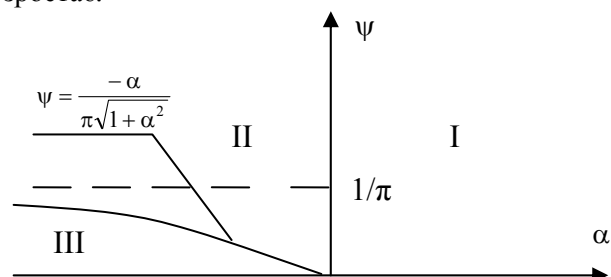


Рис. 3. Характер зміни кутової швидкості в будь-якому перетині робочої камери ГЦ

Використовуючи рис. 3, можна відразу визначити характер зміни кутової швидкості в будь-якому перетині РК ГЦ.

Визначимо умову зміни R від z у деякому перетині РК БРГ (рис. 2) для того, щоб не було зменшено Ω .

Для цього похідна $\frac{d\Omega}{dz}$ має бути близько нуля,

оскільки для малої зміни z залежність R від z можна вважати лінійною, отже умову можна записати у вигляді:

$$-\frac{4\alpha}{R} - \frac{4\pi v}{\delta Q} R \sqrt{1+\alpha^2} \geq 0;$$

$$\frac{\alpha}{R^2} + \frac{\pi v}{\delta Q} \sqrt{1+\alpha^2} \leq 0;$$

$$\frac{\alpha}{\sqrt{1+\alpha^2}} \leq -\frac{\pi v R^2}{\delta Q}.$$

Оскільки α має бути негативним, то \Rightarrow для $|\alpha|$ можна записати:

$$\frac{I\alpha I^2}{1+I\alpha I^2} \geq \left(\frac{\pi v R^2}{\delta Q} \right)^2,$$

якщо $\alpha \leq 0$, то

$$\alpha^2 \left(1 - \frac{\pi^2 v^2 R^4}{\delta^2 R^2} \right) \geq \frac{\pi^2 \delta^2 R^4}{\delta^2 Q^2} \text{ і}$$

$$\alpha \leq -\frac{\pi v R^2}{\delta^2 Q^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\pi^2 v^2 R^4}{\delta^2 Q^2}}}.$$

Звідси бачимо, що умова зростання Ω забезпечується, якщо $\frac{\pi v R^2}{\delta Q} < 1$, або $R < \sqrt{\frac{\delta Q}{\pi v}}$.

Таким чином,

$$R_{кр} = \sqrt{\frac{\delta Q}{\pi v}}.$$

Якщо радіус $R \geq R_{кр}$, то величина Ω зменшується зі зростанням z .

Якщо $R < R_{кр}$, то α можна підібрати таким, що забезпечить зростання кутової швидкості з набиранням висоти.

Використовуючи отримані результати, можна визначити характер зміни R від z , що забезпечить необхідну зміну Ω від z .

Висновки

1. Отримані залежності для $W(z)$ і $\Omega(z)$ дозволяють визначити характер плинності в РК БРГ через зміну її циліндричної (конічної) конфігурації за оптимальних геометричних розмірів так, щоб забезпечити досягнення потрібних характеристик поділу суміші вода – нафтопродукти із заданою концентрацією та розмірами крапель НП.
2. Запропонованою методикою можна виконувати числове моделювання для обраного режиму витрати ТНВ, визначати параметри конкретної робочої камери ступеня БРГ для їх уточнення і доведення до оптимальних значень.

Література

1. Уряднікова І.В. Соціально-екологічні й економічні ризики, пов'язані з електрокоагуляційною очисткою води в теплоенергетиці. – Одеса: ТЕС, 2006. – 200 с.
2. *Высокоэффективные и технологичные гидроциклонные аппараты* / А.И. Пронин, Н.А. Кудрявцев, А.А. Иванов и др. // Водоснабжение и санитарная техника. – 1996. – № 10. – С. 27–30.
3. *Найденко В.В.* Применение математических методов и ЭВМ для оптимизации и управления процессами разделения в гидроциклонах. – Горький: Волго-Вятское кн. изд-во, 1976. – 290 с.
4. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974. – 711 с.
5. *Поздеев В.В.* Описание гидродинамики гидроциклонов // Гидродинамика корабля: сб. науч. тр. НКИ. – 1990. – С. 96–100.
6. *Лебедь Н.Г., Михайлюк В.А., Поздеев В.В.* Очистка нефтесодержащих вод компактными сепарационными модулями на базе низкоскоростного гидроциклона // Судостроительная промышленность: Сер. Промышленная энергетика, охрана окружающей среды и энергосбережение судов. – Л.: ЦНИИ «Румб», 1990. – Вып. 11. – С.28–34.

Стаття надійшла до редакції 10.04.08.