

ВПЛИВ КОНСТРУКЦІЇ БУНКЕРА У ПОВНОПОТОКОВОМУ ГІДРОДИНАМІЧНОМУ ФІЛЬТРІ НА РУХ ЧАСТИНОК ДОМІШОК

INFLUENCE OF BIN CONSTRUCTION IN THE FULL-FLOW HYDRODYNAMIC FILTER ON THE IMPURITY PARTICLES MOTION

В представленій роботі основну увагу приділено питанню відведення відфільтрованих частинок в область бункера. Ця проблема досить актуальна для ротаційних фільтрів. На основі числового моделювання розглядається гідродинаміка несучої фази і траєкторії руху завислих частинок у повнопотоковому гідродинамічному фільтрі з різними конструкціями буфера (конічна збіжна, конічна розбіжна, циліндрична, циліндрична ступінчаста). Обґрунтовується найбільш ефективна конструкція з точки зору сепарації частинок у робочій області, утримання їх в області бункера та осідання. Для кількісної характеристики ступеня відведення частинок вводяться загальний і локальний коефіцієнти ефективності бункера. Представлено картини ліній течії відносного руху рідини, траєкторій руху частинок та графічне відображення значень коефіцієнтів ефективності. Показано важливість впливу конструкції бункера на гідродинаміку всього пристрою і можливість у такий спосіб забезпечити відведення частинок із зони фільтрування ротаційного фільтру.

Ключові слова: ротаційний фільтр, бункер, осідання завислих частинок, числове моделювання.

Вступ

Гідравлічні приводи набули широкого розповсюдження в різних областях техніки, у тому числі і для забезпечення функціонування авіаційних систем. Перевагами гідравлічних приводів є забезпечення безступінчастої роботи, зниження інерційності системи, спрощення їх конструкції, досить надійний захист від перевантажень і т.п.

Водночас складність та відповідальність конструкції гідравлічних приводів обумовлює підвищені вимоги до робочих рідин гідравлічних систем авіаційної техніки. Важливим показником якості робочих рідин є їх чистота, однак цей показник може істотно знижуватись упродовж функціонування гідравлічної системи протягом експлуатації техніки.

Для вирішення проблеми очищення робочої рідини у гідравлічних системах пропонується використовувати повнопотокові (без постійного відведення осаду) гідродинамічні фільтри з обертовим фільтруючим циліндром. Такі фільтри ще називають ротаційними фільтрами (РФ). Вони мають цілу низку переваг, які роблять їх одним з найперспективніших засобів зниження собівартості видалення домішок із різних рідин. Їх конструкція і принцип дії представлені в роботі [1]. Проте у даний час існує декілька перешкод для повноцінної практичної реалізації цих пристроїв.

Сучасний стан питання та завдання дослідження

Сучасні теоретичні та експериментальні дослідження в області ротаційних фільтрів дозволили вирішити ряд найважливіших завдань, які забезпечують підвищення ефективності роботи пристрою [1]. Також на основі даних досліджень отримано широке уявлення про процеси, що відбуваються безпосередньо у ротаційному фільтрі. Однак, аналізуючи сучасні роботи [2,3,4], можна помітити, що існує значна прогалина, пов'язана з дослідженням осідання відфільтрованих домішок у бункері повнопотокового гідродинамічного фільтра. Ця проблема є актуальною. Її вирішення дозволить підвищити ефективність роботи пристрою і розширить уявлення про явища і процеси, що відбуваються у ньому.

Для подолання зазначеної вище перешкоди та вдосконалення конструкції фільтра слід приділити увагу конструкції бункера, що збирає осад.

Враховуючи це, розглядається чотири найпростіших конструкції бункера. Моделюється гідродинаміка руху несучої фази ротаційного фільтра. У центрі уваги знаходиться дослідження впливу різноманітних конструкцій на траєкторії руху частинок.

Постановка задачі

Числове моделювання руху несучої рідини ґрунтувалося на повних рівняннях Рейнольдса осередненої турбулентної течії нестисливої рідини (1) у обертовій циліндричній системі координат (r, ψ, z) з додаванням

осередненого рівняння нерозривності (2):

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{V}) = -\nabla p + \nabla T_e - \rho(\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{V}), \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0, \quad (2)$$

де \mathbf{U}, \mathbf{V} — вектори відносної і абсолютної осереднених швидкостей рідини відповідно, ρ, p — густина і осереднений тиск, $\boldsymbol{\Omega}$ — вектор кутової швидкості рухомої системи координат (обертвого циліндра), T_e — ефективний тензор зсувних напруг [1]. Система координат обертається разом з фільтроелементом.

Щодо визначення моделі турбулентності для нашої задачі, то досить адекватні результати розрахунку осереднених гідродинамічних характеристик в усьому діапазоні можливих режимів течії забезпечує SST $k-\omega$ модель (модель переносу зсувних напруг Ментера) [1].

Граничні умови (3) для задачі сформульовано відповідно до розрахункової схеми, яку зображено на рисунку 1. Вони будуть справедливі для кожної з чотирьох конструкцій:

$$\Gamma_1: V_r = V_\varphi = 0, \quad V_z = \frac{Q}{\pi(R_2 - R_1)}, \quad (3)$$

$$k = \frac{3}{2} \left(\frac{0.01 \cdot Q}{\pi(R_2^2 - R_1^2)} \right)^2, \quad \omega = \frac{\sqrt{k}}{R_2 - R_1}$$

$$\Gamma_2: V_r = \frac{Q}{2\pi R_1 l_1}, \quad V_z = 0, \quad V_\varphi = \Omega \cdot r,$$

$$\Gamma_3: V_r = V_\varphi = V_z = 0,$$

$$\Gamma_4: V_r = V_z = 0, \quad V_\varphi = \Omega \cdot r$$

$$\Gamma_5: \frac{\partial k}{\partial r} = \frac{\partial \omega}{\partial r} = 0, \quad V_r = 0,$$

$$\frac{\partial V_z}{\partial r} = \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial r} = 0.$$

Граничні умови для кінетичної енергії турбулентності k та питомої швидкості її дисипації ω на твердих стінках ($\Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4$) є складовою частиною моделі турбулентності, що використовується.

Докладне викладення числового методу та його реалізація наведено у монографії [1].

Для узагальнення результатів дослідження слід використати критерії подібності: радіальне число Re_r , яке характеризує режим фільтрування, та обертове число Рейнольдса Re_φ , що характеризує вимушений рух фільтроелемента в окружному напрямку. Ці параметри визначаються як

$$Re_r = \frac{Q}{2\pi R_1 l_0 \nu}, \quad (4)$$

$$Re_\varphi = \frac{\Omega \cdot R_1}{\nu}, \quad (5)$$

де Q — секундна об'ємна витрата фільтрованої рідини, Ω — кутова швидкість обертання фільтроелемента.

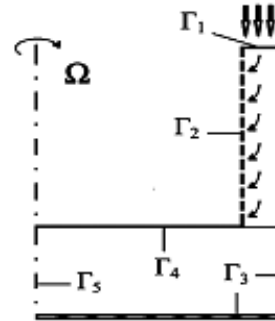


Рисунок 1 — Розрахункова схема позначенням границь

Що стосується отримання інформації про рух завислих частинок домішок, то у випадку тонкого очищення (мала концентрація домішок) можна розглядати задачу про одиночну частинку в полі швидкостей і тиску, які отримані на основі моделювання течії несучої рідини [5–7]. При цьому рівняння руху частинки має вигляд

$$\rho_p \frac{\pi d_p^3}{6} \frac{d\mathbf{V}_p}{dt} = \rho_p \frac{\pi d_p^3}{6} \mathbf{g} + \mathbf{F}_\Sigma, \quad (6)$$

де \mathbf{V}_p — швидкість частинки, d_p — її діаметр, ρ_p — густина частинки, \mathbf{g} — прискорення сили тяжіння, \mathbf{F}_Σ — сумарна сила, з якою несучий потік діє на частинку і яка складається з сили гідродинамічного або лобового опору, сили, що обумовлена ефектом приєднаної маси та сили, яка пов'язана з градієнтом тиску у рідині. Рештою сил звичай нехтують. Обґрунтування способу представлення сили \mathbf{F}_Σ у характерних умовах, що розглядаються, можна знайти у монографії [1]. Ця сила визначається за результатами числового розрахунку задачі про рух несучої фази.

Взаємодія частинки зі стінкою враховується згідно моделі пружного удару. Також береться до уваги вплив турбулентних пульсацій на рух частинок домішок [1]. Для врахування такого впливу замість середньої швидкості потоку \mathbf{V} при обчисленні сили між фазної взаємодії розглядалась її актуальна величина $\mathbf{V} + \mathbf{V}'$. Для визначення пульсаційної складової \mathbf{V}' використовувався статистичний підхід з використанням значення кінетичної енергії турбулентності.

У рамках використання моделі «пасивної домішки» не враховувалися співдари між частинками та вплив частинок на рух несучої фази [5,6].

Основні результати

Рух рідини та траєкторії частинок домішок визначались для чотирьох схем області течії, які показано на рисунку 2. Окрім циліндричної (I) конструкції бункера, розглядалися також конічна збіжна (II), конічна розбіжна (III) та циліндрична ступінчаста (IV) конструкції.

У числових розрахунках прийнято наступні значення основних розмірів фільтроелемента, які є незмінними для усіх конструкцій і які позначено на рисунку 1: $l = 0,15$ м — довжина фільтра, $R_1 = 0,1$ м, — радіус внутрішнього циліндра (фільтроелемента), $l_0 = 0,1$ м — його довжина, $h = 0,01$ м — відстань між корпусом та фільтроелементом. Інші розміри, які наведено у таблиці 1, змінюються у залежності від конструкції бункера: R_2 — діаметр днища бункера, l_1 — довжина робочої області фільтра, l_2 — довжина області бункера.

Таблиця 1 — Характерні розміри для різних варіантів конструкції бункера

Конструкція	$R_2, м$	$l_1, м$	$l_2, м$
I	0,11	0,1	0,05
II	0,08	0,1	0,05
III	0,15	0,06	0,05
IV	0,12	0,08	0,07

Перед тим, як наводити результати числового моделювання, слід зауважити, що в даній постановці дослідження не розглядається питання проходження частинок домішок крізь поверхню перфорованого циліндра. Не розглядається діаметр отворів у фільтроелементі, який значною мірою визначає тонкість очищення. Основна увага прикута до питання відводу відфільтрованих частинок до області бункера. Відфільтрованими вважаються частинки, які відбилися від поверхні фільтроелемента або пройшли над ним без дотику. Всі частинки, що торкаються фільтруючого циліндра, вважаються такими, що відбиваються від нього.

Сприятливими умовами вважаються такі, коли відфільтровані частинки залишають робочу область фільтра (проміжок між корпусом і фільтроелементом), надходять до області бункера і не повертаються звідти. На основі такого припущення далі визначатимуться коефіцієнти ефективності фільтра у цілому k_1 і ефективності бункера k_2 .

Несприятливими умовами є такі, коли частинки не залишають робочу область фільтра або частинки повертаються з області бункера до проміжку між корпусом і внутрішнім проникним циліндром (робочу область).

При реалізації несприятливого сценарію процесу фільтрації, який призводить до повторного контакту частинок з поверхнею проникного циліндра, зростає ймовірність закупорювання отворів фільтроелемента та проходження домішок у фільтрат.

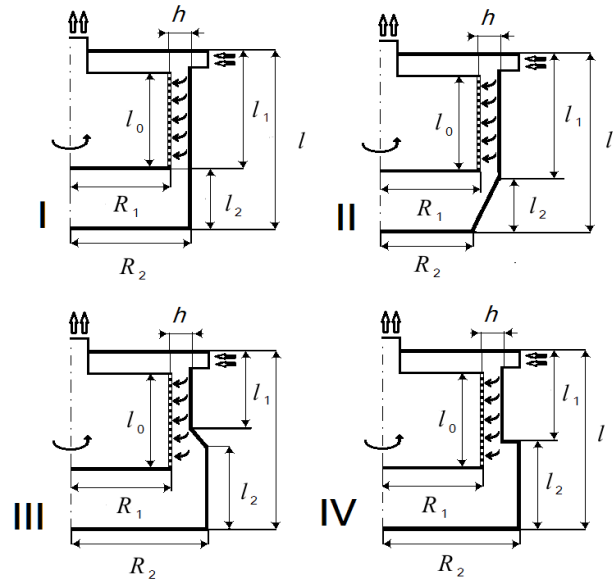


Рисунок 2 — Конструктивні схеми ротаційного фільтра: I — циліндрична, II — конічна збіжна, III — конічна розбіжна, IV — циліндрична ступінчаста

Моделювання виконувалось для чисел Рейнольдса $Re_{\psi} = 1 \cdot 10^5$, $Re_{\psi} = 2 \cdot 10^5$, $Re_{\psi} = 5 \cdot 10^5$ та $Re_{\tau} = 1044$ (однакове для усіх Re_{ψ}), але тут наведено результати тільки для двох перших значень, які є найбільш інформативними. На рисунках 3–6 показано лінії течії несучої рідини у відносному русі та траєкторії завислих частинок двох розмірів (10 та 50 мкм).

Що стосується значення $Re_{\psi} = 5 \cdot 10^5$, то при цьому режимі течії частинки взагалі не надходять до області бункера. Вихори заважають потраплянню частинок у бункер та сприяють їх рециркуляційному руху у робочій області, що також може призвести до закупорювання отворів фільтроелемента.

Показники ефективності утримання частинок у бункері

Наступним кроком у дослідженні відокремлення частинок стало визначення параметрів ефективності їх утримання у бункері. Для цього на основі даних числового моделювання визначені загальний k_1 та локальний k_2 коефіцієнти ефективності бункера, які виражаються наступним чином:

$$k_1 = \frac{n}{n_1}, \quad k_2 = \frac{n}{n_2}, \quad (7)$$

де n — кількість частинок, що залишилися у бункері, n_1 — загальна кількість частинок, що потрапили через вхідний перетин фільтра, n_2 — кількість частинок, що увійшли до бункера. Графічне представлення значень коефіцієнтів ефективності за декілька сполучень параметрів Re_{ψ} , Re_{τ} показано на рисунку 7.

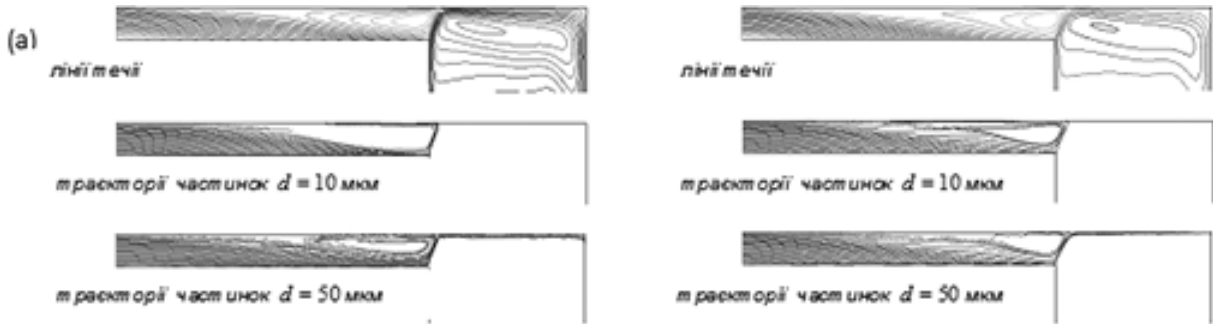


Рисунок 3 — Лінії течії відносного руху рідини і траєкторії завислих частинок у ротаційних фільтрах з циліндричним бункером при: $Re_t = 1044$, $Re_\psi = 1 \cdot 10^5$ (а) та $Re_\psi = 2 \cdot 10^5$ (б)

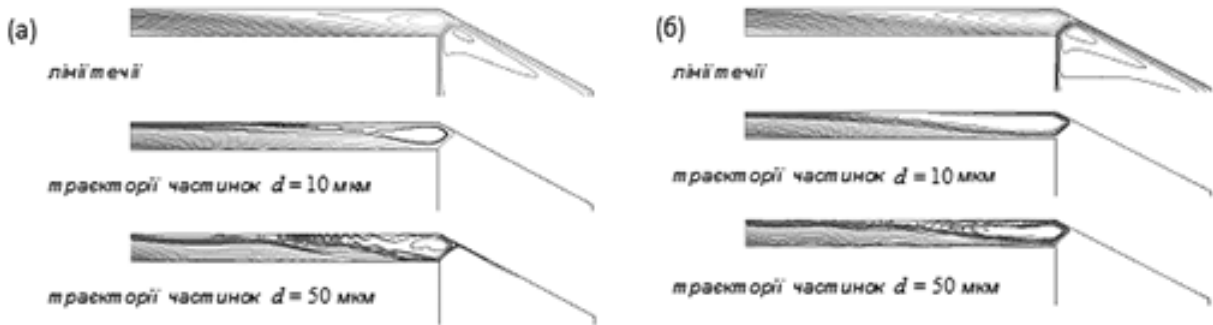


Рисунок 4 — Лінії течії відносного руху рідини і траєкторії завислих частинок у ротаційних фільтрах з конічним збіжним бункером при: $Re_t = 1044$, $Re_\psi = 1 \cdot 10^5$ (а) та $Re_\psi = 2 \cdot 10^5$ (б)

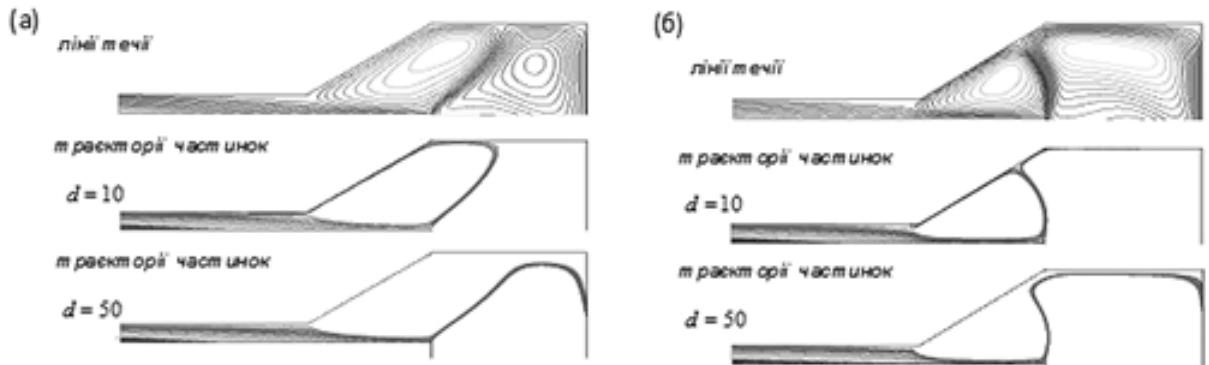


Рисунок 5 — Лінії течії відносного руху рідини і траєкторії завислих частинок у ротаційних фільтрах з конічним розбіжним бункером при: $Re_t = 1044$, $Re_\psi = 1 \cdot 10^5$ (а) та $Re_\psi = 2 \cdot 10^5$ (б)

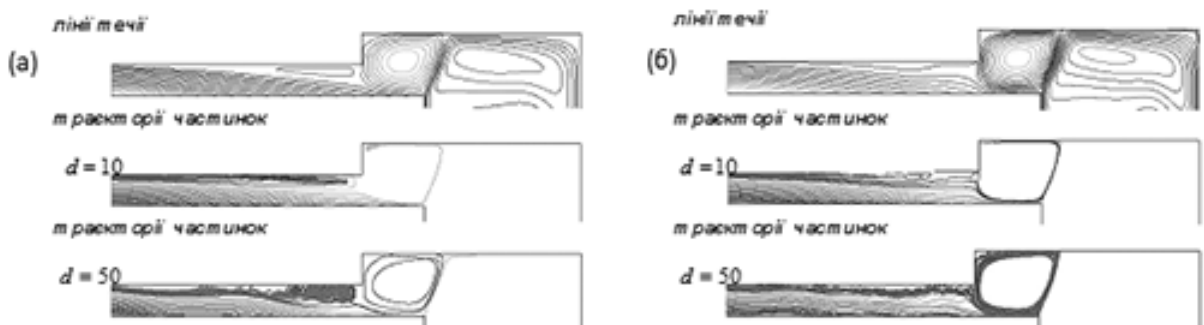


Рисунок 6 — Лінії течії відносного руху рідини і траєкторії завислих частинок у ротаційних фільтрах з циліндричним ступінчастим бункером при: $Re_t = 1044$, $Re_\psi = 1 \cdot 10^5$ (а) та $Re_\psi = 2 \cdot 10^5$ (б)

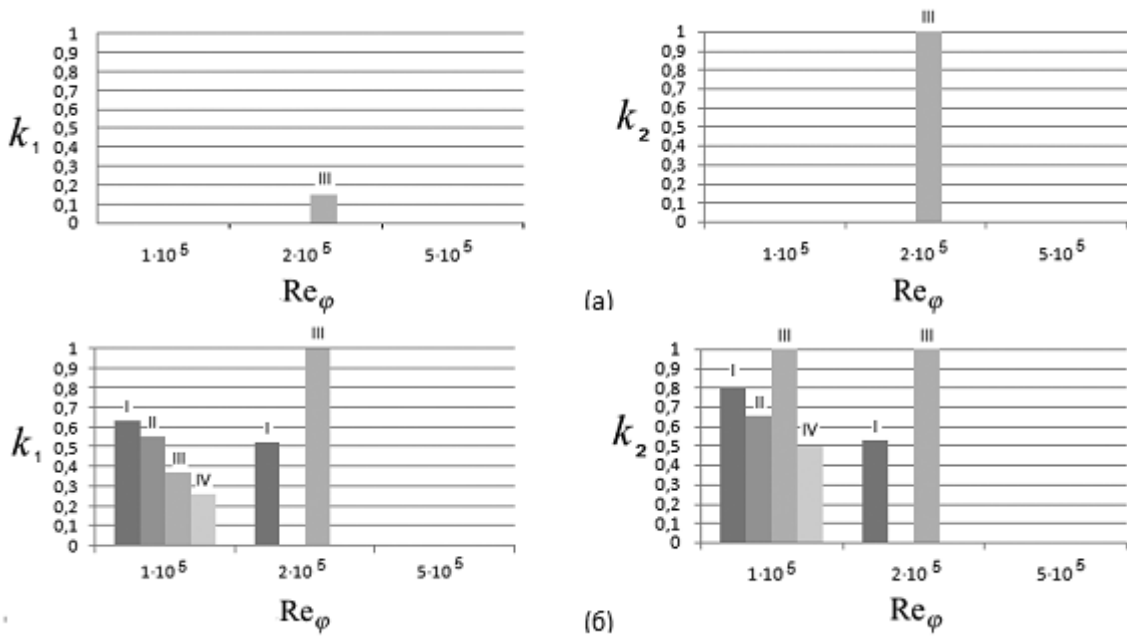


Рисунок 7 — Загальний k_1 та локальний k_2 коефіцієнти ефективності бункера для частинок розмірами 10 мкм (а) і 50 мкм (б): I — циліндрична конструкція, II — конічна збіжна, III — конічна розбіжна, IV — циліндрична ступінчаста

Відтак можна відзначити, що найбільш ефективна конструкція бункера у режимі $Re_\psi = 2 \cdot 10^5$, $Re_r = 1044$ — конічна розбіжна, яка показала кращі результати як з 10-ти, так і 50-ти мікронними частинками. Слід зауважити, що це єдина з конфігурацій, яка показала результат з 10-ти мікронними частинками. У режимі $Re_\psi = 1 \cdot 10^5$, $Re_r = 1044$ з 50-ти мікронними домішками більш ефективна циліндрична конструкція, але за рахунок того, що незначна кількість частинок все ж таки повертається до робочої області коефіцієнт k_2 нижчий, ніж у конічної розбіжної конструкції. Це свідчить про те, що утримання частинок бункером вище у конічної розбіжної конструкції. Але у підсумку циліндрична конструкція при даному режимі має перевагу. Це пов'язано з тим, що з робочої області до області бункера потрапляє більша кількість частинок, ніж у будь-якій іншій конструкції.

Висновки

На основі отриманих результатів можна зробити висновок, що відведення і утримання частинок у бункері ротаційного фільтра є складним завданням, без вирішення якого неможлива реалізація повноцінного робочого циклу фільтрування.

Наведені результати дозволили глибше розглянути питання підвищення ефективності фільтрування рідин повнопоточними ротаційними фільтрами. Виконаними дослідженнями показано важливість впливу конструкції бункера на гідродинаміку всього пристрою, можливість у такий спосіб забезпечити відведення частинок із зони фільтрування. Не менш важливим чинником є визначення оптимальних режимів роботи (зокрема, діапазонів

сполучення параметрів Re_ψ , Re_r) для тієї чи іншої конструкції бункера. Як свідчить дослідження, саме при правильному підборі конструкції та режиму відбувається досить ефективне відведення домішок визначеного розміру до накопичувального бункера.

Основним напрямком подальших досліджень з вдосконалення ротаційних фільтрів є вивчення процесів і закономірностей, які визначають вплив конструкції фільтра на тонкість очищення рідини.

Литература

1. Мочалин, Е.В. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил [Текст] / Е.В. Мочалин, А.А. Халатов. — К.: Ин-т техн. теплофизики НАН Украины, 2010. — Т.8: Гидродинамика закрученного потока в ротационных фильтрах. — 428 с.
2. Исследование эффективности тонкой очистки жидкостей ротационными фильтрами / Е.В. Мочалин, А.В. Петренко, П.Н. Кривошея, Е.О. Иванова // Сб. науч. трудов ДонГТУ. — Алчевск: ДонГТУ, 2006. — Вып. 20. — С. 292—304.
3. Мочалин, Е.В. Влияние конструкции фильтроэлемента ротационного фильтра на гидродинамический эффект очистки жидкости / Е.В. Мочалин // Восточно-европейский журнал передовых технологий. — 2007. — № 5/3 (29) — С. 46.
4. Мочалин, Е.В. Устойчивость течения жидкости снаружи вращающегося сегчатого фильтроэлемента / Е.В. Мочалин // Вісник Сумського державного університета. — 2006. — №12(96). — С. 23—32.

5. Соу, С. Гидродинамика многофазных систем / С. Соу. — М.: Мир, 1971. — 536 с.

6. Новомлинский, В.В. Математическое моделирование неізотермических одно- и двухфазных закрученных потоков / В.В. Новомлинский // Инженерно-физический журнал. — Т.60. — № 2. — С. 191—197.

7. Хаппель, Дж. Гидродинамика при малых числах Рейнольдса / Дж. Хаппель, Г. Бреннер. — М.: Мир, 1976. — 630 с.

References

1. Mochalin, Ye.V. Teploobmen i gydrodinamika v poliakh tsentrobezhnykh massovykh sil / Ye. V. Mochalin, A.A. Khalatov. — К.: In-t tekhn. teplofiziki NAN Ukrainy, 2010. — Т.8: Gydrodinamika zakruchennogo potoka v rotatsionnykh filtrakh. — 428 s.

2. Issledovanie effektivnosti tonkoy ochistki zhidkosti rotatsionnymi filtrami / Ye.V. Mochalin, P.N. Krivosheya, E.O. Ivanova // Sb. nauch. Trudov DonGTU. — Alchevsk: DonGTU, 2006. — Выр.20. — С. 292 — 304.

3. Mochalin, Ye.V. Vliyaniye konstruktsyi filtroelementa rotatsionnogo filtra na gidrodinamicheskiy effect ochistki zhidkosti / Ye.V. Mochalin // Vostochno-evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy. — 2007. — № 5/3 (29). — С. 46.

4. Mochalin, Ye.V. Ustoychivost techeniya zhidkosti snaruzhi vrashchayushchegosia setchatogo filtroelementa / Ye.V. Mochalin // Visnik Sumskogo derzhavnogo universiteta. — 2006. — №12(96). — С. 23.

5. Sou, S. Gidrodinamika mnogofaznykh sistem / S. Sou. — М.: Мир, 1971. — 536 с.

6. Novomlinskiy, V.V. Matematicheskoye modelirovaniye neізotermicheskikh одно- i dvukhfaznykh potokov / V.V. Novomlinskiy // Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal. — Т.60. — № 2. — С. 191 — 197.

7. Khappel, Dzh. Gidrodinamika pri malykh chislakh Reynoldsa / Dzh. Khappel, G. Brenner. — М.: Мир, 1976. — 630 с.

Надійшла Надійшла 15.10.2015

УДК 536.252:532.527.2

Влияние конструкции бункера в полнопоточном гидродинамическом фильтре на движение частиц примесей

Е.В. Мочалин, В.Н. Браженко

В представленной работе основное внимание уделено вопросу отвода отфильтрованных частиц в область бункера. Эта проблема достаточно актуальна для ротационных фильтров. На основе численного

моделирования рассматривается гидродинамика несущей фазы и траектории движения взвешенных частиц в полнопоточном гидродинамическом фильтре с различными конструкциями буфера (коническая сходящаяся, коническая расходящаяся, цилиндрическая, цилиндрическая ступенчатая). Обосновывается наиболее эффективная конструкция с точки зрения движения частиц в рабочей области, удержания их в области бункера и оседания. Для количественной характеристики степени отвода частиц вводятся общий и локальный коэффициенты эффективности бункера. В работе представлены картины линий тока относительного движения жидкости, траекторий движения частиц и графическое представление значений коэффициентов эффективности. Выполненными исследованиями показана важность влияния конструкции бункера на гидродинамику всего устройства и возможность обеспечить отвод частиц из зоны фильтрации ротационного фильтра.

Ключевые слова: конструкция бункера, оседание взвешенных частиц, ротационный фильтр, численное моделирование.

UDC 536.252:532.527.2

Influence of bin construction in the full-flow hydrodynamic filter on the impurity particles motion

Ye.V. Mochalin, V.M. Brazhenko

In the presented work the main attention is focused on the question of removing the filtered particles into the bin area. This problem is relevant for rotary filters. Numerical simulation is applied to consideration of liquid phase hydrodynamics and suspended particles trajectories in full-flow dynamic filters with various configurations of the sedimentation bin (conical convergent, conical divergent, cylindrical, stepped cylindrical). The most effective design structure is substantiated meaning holding particles within the bin and sedimentation. The local and global efficiency factors are introduced for the quantitative estimation of holding ability of the bin. Streamlines of the relative fluid motion and suspended particles trajectories are presented as well as the graphical representation of the efficiency factors values. The significance was been shown of the influence of bin design structure onto the hydrodynamics of the entire rotary filter together with the ability of removing the particles from the operation zone.

Keywords: bin configuration, particles sedimentation, rotary filter, numerical simulation.