

УДК 536.252:532.527.2

Є.В. Мочалін, д-р техн. наук,  
В.М. Браженко

Національний авіаційний університет, Київ, Україна

О.Є. Мочалін, канд. техн. наук

Київська державна академія водного транспорту, Київ, Україна

## АНАЛІЗ РУХУ ТВЕРДИХ ЗАВИСЛИХ ЧАСТОК У РОТАЦІЙНОМУ ФІЛЬТРІ ОЧИЩЕННЯ РІДИН З НАКОПИЧУВАЛЬНИМ БУНКЕРОМ

### EXAMINATION OF SUSPENDED PARTICLES MOTION INSIDE OF LIQUIDS PURIFICATION ROTARY FILTER WITH SEDIMENT BIN

*За результатами числового моделювання виявлено закономірності руху завислих часток в ротаційному фільтрі тонкого очищення рідин із бункером для збирання осаду. Показано вплив вторинних вихрових течій, які виникають внаслідок відцентрової нестійкості течії у кільцевій області фільтрування, на рух твердих домішок. Виявлено тенденцію накопичення часток домішок у зоні фільтрування без відведення їх у бункер, яка підсилюється із збільшенням швидкості обертання фільтроелемента та зменшенням розмірів часток.*

*Ключові слова:* бункер, завислі частки, вторинні течії, ротаційний фільтр, числове моделювання.

#### Вступ

Процес тонкого очищення робочої рідини (видалення твердих завислих часток діаметром 1040 мкм) є важливою складовою обслуговування та експлуатації авіаційного устаткування. Очищення сприяє зменшенню зносу, збільшенню довговічності та надійності роботи пристроїв. Гідроагрегати та гідророзподільники авіаційних гідро-систем достатньо чутливі до наявності у робочій рідині механічних домішок, тому до чистоти рідин висуваються дуже високі вимоги, пов'язані з надійністю функціонування систем та безпекою польотів.

Для вирішення поставленої проблеми існує безліч методів, і використовуються різні види обладнання. До такого устаткування, зокрема, належить ротаційний фільтр, який ще не знайшов застосування у авіаційних рідинних системах. Це повнопотоковий гідродинамічний фільтр, на базі якого можливим є суттєвий прогрес у питанні тонкого механічного очищення робочої рідини. Технічні переваги цього приладу, які також властиві більшості гідродинамічних фільтрів, докладно описано у монографії [1]. Але варто відзначити деякі індивідуальні особливості. Перш за все, це відсутність постійного зливу значної частини рідини повз лінію фільтрату для реалізації принципу самоочищення, що є притаманним гідродинамічним фільтрам з нерухомим фільтроелементом. Дана перевага дуже важлива саме для авіаційних рідинних систем. Можливість отримання більш високих відношень окружної швидкості поверхні фільтроелемента до швидкості фільтрування покращує умови для самоочищення фільтра, а також, за певних

умов, збільшує тонкість очищення без зменшення розмірів отворів у фільтрувальній перегородці.

#### Сучасний стан питання та завдання дослідження

Огляд теоретичних і експериментальних робіт в області дослідження ротаційних фільтрів дає широкий спектр уявлень про процеси та явища, що відбуваються безпосередньо в цих пристроях. Аналізуючи сучасні роботи можна відзначити вагомий внесок у дослідження гідродинамічного ефекту очищення рідини [2], а також вплив конструкції ротаційного фільтра на цей процес [3]. Варто згадати роботи, пов'язані з розглядом стійкості течії у робочій області ротаційного фільтра зовні обертового проникного фільтроелемента [4,5]. Підсумовуючи огляд, потрібно підкреслити незазначену у жодному джерелі проблему накопичення відфільтрованих та змитих з поверхні фільтроелемента часток для подальшого їх видалення. Адже без вирішення цієї проблеми не можна забезпечити ефективну роботу фільтра у повнопотоковому режимі. З урахуванням цього в даній роботі моделюється гідродинаміка ротаційного фільтра, конструкція якого містить ємність для збирання осаду. В центрі уваги траєкторії руху часток у ротаційному фільтрі за наявності бункера.

#### Основні припущення

Розглядаючи рух багатофазного середовища, слід звернути увагу на концентрацію завислих часток. У випадку тонкого очищення рідин значення концентрації,

завичай, є малим. Посилаючись на джерела [6,7], можна вважати, що присутність зважених часток не впливає на рух несучої фази, оскільки значення концентрації твердої фази  $k_c$ . Також можна відкинути вплив співударів між частками [8], який проявляється лише коли  $k_c < 0,04$ .

Розглядаючи в'язкість рідини, яка впливає і на режим течії, і на розподіл швидкостей, слід зауважити, що присутність у несучій фазі твердих часток у зазначених вище концентраціях не змінює суттєво цю характеристику [9].

Узагальнюючи міркування, сформулюємо наступні припущення, які покладаються в основу моделювання гідродинамічних процесів у ротаційному фільтрі:

- 1) траєкторії завислих твердих часток визначаються на основі рівнянь руху одиночних сферичних часток;
- 2) взаємодія між частками не враховується;
- 3) вплив часток на рух несучої фази не враховується;
- 4) силовий вплив потоку на частку визначається полями швидкостей і тиску несучої фази, які визначаються без урахування присутності завислих домішок.

Питання взаємодії часток зі стінками розглядатиметься окремо.

Наведені припущення покладено в основу подальшого розрахункового моделювання гідродинамічних процесів у ротаційних фільтрах, що вивчаються.

### Розрахункова схема та рівняння руху несучої рідини

Розглянемо ротаційний фільтр в осесиметричній постановці. На рисунку 1 зображено внутрішній обертовий циліндр радіусом  $R_1$  з перфорованою поверхнею та зовнішній нерухомий циліндр з радіусом  $R_2$ . Позначено також бункер для збирання осаду з найпростішою геометричною формою (циліндричною). Зазначимо, що дія сили тяжіння передбачається позовж осі обертання.

Однією з основних особливостей задачі про рух рідини навколо обертового фільтруючого циліндра є зміна режимів течії — від стійкого ламінарного (без вторинних течій) до ламінарних і турбулентних макровихрових рухів.

До основи моделювання руху несучої рідини покладено повні рівняння Рейнольдса усередненої турбулентної течії нестисливої рідини у циліндричній системі координат, яка обертається разом з фільтроелементом:

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

де  $\mathbf{U}, \mathbf{V}$  — вектори відносної і абсолютної усереднених швидкостей рідини відповідно;  $\rho, p$  — густина і усереднений тиск;  $\Omega$  — вектор кутової швидкості рухомої системи координат (обертового циліндра). Ефективний тензор зсувних напруг визначається таким чином:

$$T_e = \mu_e (\nabla \mathbf{V} + (\nabla \mathbf{V})^T) - \frac{2}{3} \rho k l, \quad (2)$$

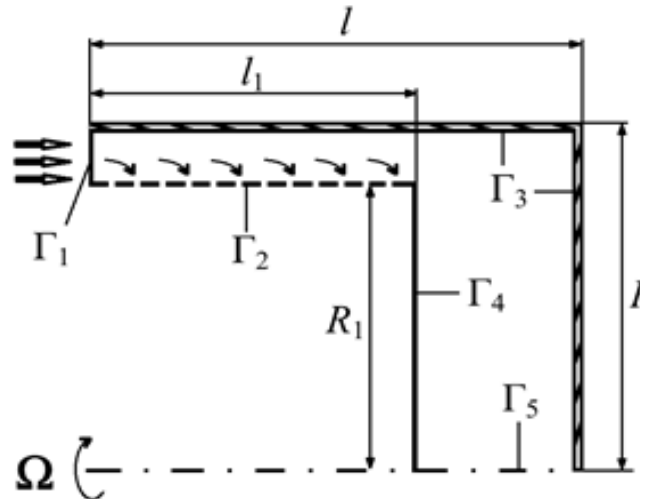


Рисунок 1 — Розрахункова схема ротаційного фільтра

де  $k$  — питома кінетична енергія пульсаційного руху (кінетична енергія турбулентності),  $l$  — тензорна одиниця,  $\mu_e = \mu + \mu_t$  — ефективний коефіцієнт динамічної в'язкості, який дорівнює сумі відповідних коефіцієнтів молекулярної і турбулентної в'язкості.

Рівняння (1) доповнимо осередненими рівняннями нерозривності, яке для нестисливої рідини має вигляд

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0. \quad (3)$$

### Вибір моделі турбулентності, граничні умови та характеристика числового розв'язання задачі

Для отримання розрахунку замкненої системи необхідні також додаткові співвідношення, які визначаються відповідною моделлю турбулентності.

Проблема незамкненості рівнянь руху, в яких з'являються додаткові турбулентні напруження, вирішується на основі підходу Буссінеска [10], згідно якому компоненти тензора напружень Рейнольдса представляються у вигляді, аналогічному в'язким напруженням, через коефіцієнт турбулентної в'язкості, що вводиться, та компоненти тензора швидкостей деформації осередненого руху (формула (2)).

Після цього проблема замикавання рівнянь турбулентного руху рідини переходить у площину визначення залежностей для коефіцієнта турбулентної в'язкості. Різні підходи до отримання таких залежностей відповідають тій чи іншій моделі турбулентності. У рамках гіпотези про турбулентну в'язкість найбільш загальними є диференціальні моделі турбулентності, які потребують сумісного розв'язання диференціальних рівнянь переносу характеристик турбулентності. У якості таких характеристик найчастіше використовуються кінетична енергія пульсаційного руху (турбулентна кінетична енергія)  $k$ , швидкість її дисипації  $\omega$ , та її питома величина  $\omega = \varepsilon/k$ , а також кінематичний коефіцієнт турбулентної в'язкості  $\nu_t = \mu/\rho$ .

Для течії розглянутого типу задовільні результати забезпечує [1] застосування моделі переносу зсувних

напруг (SST  $k\omega$  модель) Ментера, яка забезпечує адекватний розрахунок усереднених гідродинамічних характеристик в усьому діапазоні можливих режимів течії. Чисельні рішення з застосуванням цієї моделі здатні, серед іншого, відтворювати ламінарну течію за відповідних умов. Диференціальні рівняння переносу кінетичної енергії турбулентності  $k$  і питомої швидкості її дисипації  $\omega$ , а також всі алгебраїчні співвідношення моделі Ментера у цій статті наводимо не будемо в силу їх громіздкості і специфічності цього питання. Досить докладний їх виклад можна знайти в монографії [1].

Наступним кроком у постановці задачі є визначення граничних умов, які мають наступний вигляд для схеми ротаційного фільтра, показаного на рисунку 1)

$$\Gamma_1: V_r = V_\varphi = 0, \quad V_z = \frac{Q}{\pi(R_2 - R_1)}, \quad (4)$$

$$\Gamma_2: V_r = V_\varphi = 0, \quad V_z = \frac{Q}{\pi(R_2 - R_1)}$$

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

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

$$\Gamma_5: V_r = 0, \quad \frac{\partial V_z}{\partial r} = \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial r} = 0.$$

Формулювання граничних умов для характеристик турбулентності на твердих стінках є складовою застосування обраної моделі турбулентності і входить до її опису, тож ми не будемо розглядати тут це питання. На ділянці осі обертання (границя  $\Gamma_5$ ) маємо

$$\frac{\partial k}{\partial r} = \frac{\partial \omega}{\partial r} = 0$$

Залишається розглянути питання завдання характеристик турбулентності на вхідній границі  $\Gamma_1$ . Вводячи поняття інтенсивності турбулентності

$$Tu = \sqrt{\frac{1}{3}(\sum_i V_i'^2)} / V, \quad (5)$$

отримаємо для кінетичної енергії турбулентних пульсацій вираз

$$k = \frac{3}{2}(VTu)^2 \quad (6)$$

Для питомої швидкості дисипації турбулентної енергії відомо співвідношення Колгоморова [11]

$$\omega \approx \frac{k}{L}, \quad (7)$$

де  $L$  — лінійний масштаб вихорів, що переносять енергію.

В представлених розрахунках у вхідному перерізі прийнято:  $Tu=0,01$ ,  $L=h=R_2 - R_1$ . Таким чином, розглядаючи рівняння (6) та (7) маємо граничні умови на границі  $\Gamma_1$ :

$$0,01$$

$$k = \frac{3}{2} \left( \frac{0,01 \cdot Q}{\pi(R_2^2 - R_1^2)} \right)^2, \quad \omega = \frac{\sqrt{k}}{R_2 - R_1} \quad (8)$$

де  $Q$  — це витрата рідини.

Докладне викладення числового методу та його реалізації описано у монографії [1]. Тому ми дамо тут лише його стислу загальну характеристику. На основі методу скінчених об'ємів застосовано апроксимаційні схеми високого порядку точності з контролем монотонності для запобігання нефізичних осциляцій. Зокрема, конвективні доданки у рівняннях перенесення представлено за допомогою модифікованої протипотокової схеми QUICK (Леонарда). Апроксимацію дифузійних доданків здійснено на основі центрально-різницевої схеми 2-го порядку. Дискретизацію за часом виконано із застосуванням неявної схеми 2-го порядку з явним трактуванням джерельних членів. Для узгодженої корекції полів швидкості і тиску застосовано удосконалену процедуру SIMPLEC. Розв'язання систем лінійних рівнянь виконувалось ітераційним методом Гауса-Зейделя. Для контролю збіжності застосовано техніку нижньої релаксації.

### Рух завислих часток та врахування турбулентності несучої фази

Основні припущення, що визначають постановку задачі, розглянуто вище.

У випадках, коли допустимим є незалежне визначення гідродинамічних характеристик течії несучої рідини на основі рівнянь для однофазного середовища, інформацію про поведінку завислих часток можна отримати через вирішення задачі про рух одиночної пробної частки при відомому полі швидкостей і тиску. Рівняння руху частки має вигляд:

$$\rho_p \frac{\pi d_p^3}{6} \frac{d\mathbf{V}_p}{dt} = \rho_p \frac{\pi d_p^3}{6} \mathbf{g} + \mathbf{F}_\Sigma, \quad (9)$$

де  $\mathbf{F}_\Sigma$  — сумарна сила, з якою несучий потік діє на частку, а індексом «р» відмічені величини, що відносяться до частки (густина, еквівалентний діаметр, швидкість тощо).

Однією з основних сил, що визначають рух завислої у рідині частки, є сила гідродинамічного або лобового опору, яка обумовлена обтіканням частки рідиною у відносному русі. Для сферичної частки цю силу можна надати у наступному вигляді [2]:

$$\mathbf{F}_c = K_c \rho \frac{|\mathbf{V}_p - \mathbf{V}|}{2} (\mathbf{V} - \mathbf{V}_p) \frac{\pi d_p^2}{4}, \quad (10)$$

де  $K_c$  — коефіцієнт лобового опору частки.

$K_c$  визначають за емпіричними формулами, вигляд яких залежить від діапазону значень числа Рейнольдса  $Re_p$ , яке визначається за швидкістю відносного руху частки

$$Re_p = |\mathbf{V}_p - \mathbf{V}| d_p / \nu.$$

При  $d_p \sim 10^{-5}$  м зазвичай виконується умова  $Re_p < 10$ , за якої з точністю до 8% справедливою є [12] рівність  $K_c = 0,33 / Re_p$ .

Нестационарний характер обтікання частки враховується через силу  $F_m$ , яка обумовлена ефектом приєднаної маси і набуває вигляду

$$\mathbf{F}_m = \frac{1}{2} \frac{\pi d_p^3}{6} \rho \left( \frac{d\mathbf{V}}{dt} - \frac{d\mathbf{V}_p}{dt} \right). \quad (11)$$

Сила, яка пов'язана з градієнтом тиску у рідині, визначається залежністю

$$\mathbf{F}_a = \frac{\pi d_p^3}{6} \rho \left( \frac{d\mathbf{V}}{dt} - \mathbf{g} \right). \quad (12)$$

Решта відомих факторів, включаючи броунівський рух, силу Бассе та інші, не мають суттєвого значення у задачі, що розглядається. Тому сумарну силу у рівнянні (9) ми можемо записати у вигляді

$$\mathbf{F}_\Sigma = \mathbf{F}_c + \mathbf{F}_m + \mathbf{F}_a. \quad (13)$$

На основі виразів (9)—(13) сформульовано диференціальні рівняння руху частки в системі координат, що використовується, які не приводимо.

Для опису взаємодії частки зі стінкою використовується модель пружного співудару (рисунок 2). Нормальна та тангенціальна складові швидкості частки до зіткнення і після нього пов'язані між собою через коефіцієнти пружності при ударі  $k_{cn}, k_{ct}$ :

$$u_{p2n} = -k_{cn} u_{p1n}, \quad u_{p2t} = k_{ct} u_{p1t} \quad (14)$$

У розрахунках у першому наближенні розглядається випадок абсолютно пружного удару  $k_{cn}, k_{ct}$  та  $\theta_1 = \theta_2$ .

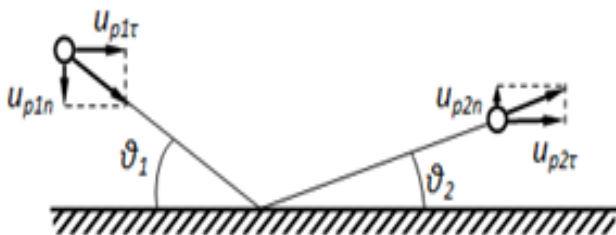


Рисунок 2 — Схема взаємодії частки зі стінкою

Найпростішим підходом є визначення усіх сил міжфазної взаємодії на основі осередненого поля швидкостей несучої фази. Але вплив турбулентних пульсацій на рух часток пилу може виявитися досить помітним при визначенні ефективності відокремлення домішок. Для

врахування такого впливу сили  $F_c, F_m, F_a$  розраховували з використанням у формулах (10)—(12) замість середньої швидкості потоку  $V$  її актуальних значень  $V=V'$ . Для визначення пульсаційної складової використовувались значення кінетичної енергії турбулентності, які дають нам оцінку пульсаційної швидкості. На її основі, після завдання прийнятних параметрів нормального розподілу випадкових величин — проєкцій швидкості  $V$ , при кожній реалізації отримувались актуальні швидкості, які містять стохастичну компоненту.

### Результати моделювання

У розрахунках прийнято наступні значення основних розмірів ротаційного фільтру:  $l = 0,15$  м,  $l_1 = 0,1$  м,  $R_1 = 0,1$  м,  $R_1 = 0,11$  м.

Для узагальненої характеристики інтенсивності вимушеного окружного (обертального) руху і радіального (фільтраційного) руху обґрунтовано використання відповідних чисел Рейнольдса, які визначаються наступним

чином:  $Re_\phi = \Omega R_1^2 / \nu$ ,  $Re_r = V_{r1} R_1 / \nu$  [1]. Характерна радіальна швидкість визначається як  $V_1 = Q / (2\pi R_1 l_1)$ .

Результати розрахункового моделювання за декількох значень параметрів представлено у вигляді ліній відносної течії несучої фази (рисунок 3) і траєкторій відносного руху часток з розмірами 10 мкм (рисунок 4) та 50 мкм (рисунок 5). Розглядалися частки, які перетинають вхідний переріз Г1 зі швидкістю, яка дорівнює швидкості несучої фази.

Зазначимо, що у межах постановки задачі даного дослідження не розглядається питання проходження часток крізь поверхню фільтруючого циліндра. Зокрема, не досліджується питання тонкості очищення і її залежності від розміру та геометрії отворів у фільтруючій перегородці. До уваги прийнято ефективність відведення часток, що не пройшли крізь поверхню фільтроелемента (не наблизились до неї, або відбилися), до бункеру. Сприятливими умовами слід вважати такі, коли частки, які не контактували з обертовою поверхнею або ж відбилися від неї, відводяться до бункеру і більше не повертаються до зони фільтрування (кільцеву область між обертовим і нерухомим циліндрами). Повторні контакти часток з фільтруючою поверхнею збільшують ймовірність їх потрапляння у фільтрат або ж закупорки отворів у перегородці (залежно від багатьох факторів, які тут не розглядаються). Отже, у прийнятному підході всі частки, що контактують з твердими поверхнями (включно з поверхнею фільтрувального циліндра), відбиваються від них.

Основними тенденціями впливу режимних параметрів на гідродинаміку несучої фази є наступні. Зі збільшенням



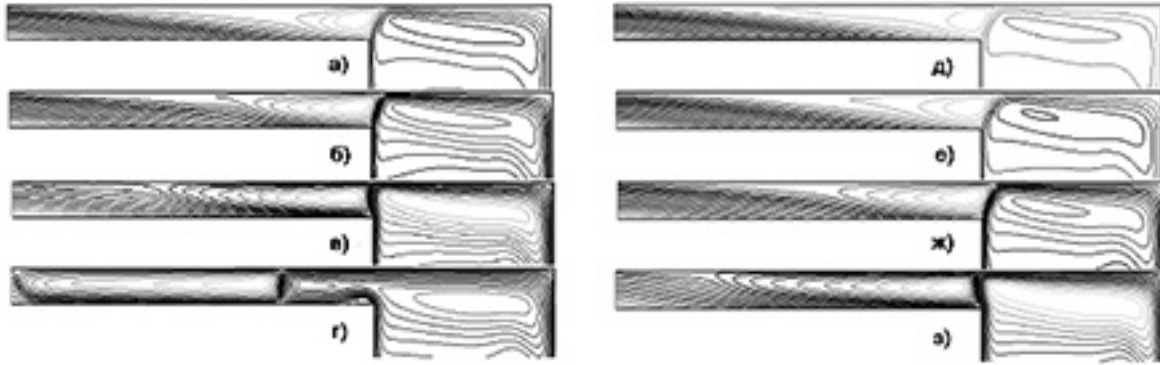


Рисунок 3 – Лінії течії відносного руху рідини для значень визначальних параметрів:  
 $Re_{\phi} = 5 \cdot 10^4$  (а, д),  $Re_{\phi} = 1 \cdot 10^5$  (б, е),  $Re_{\phi} = 2 \cdot 10^5$  (в, ж),  $Re_{\phi} = 5 \cdot 10^5$  (з, з),  $Re_r = 522$  (а — з),  $Re_r = 1044$  (д — з)

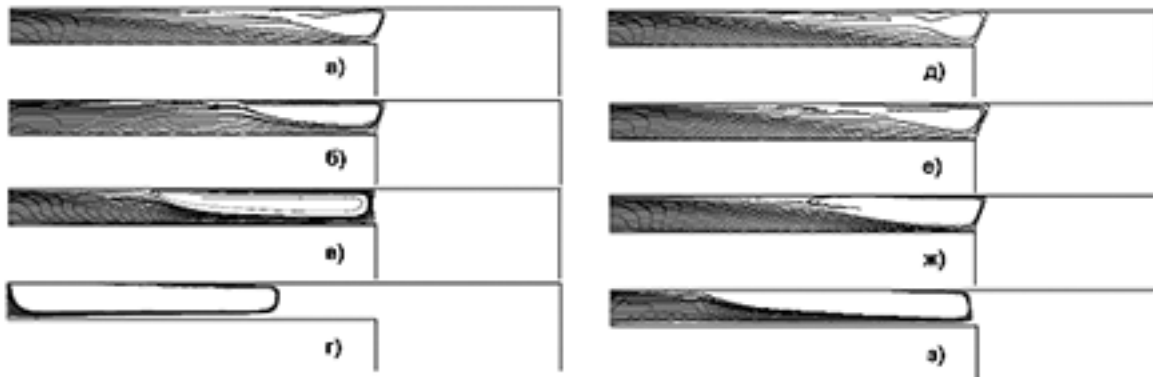


Рисунок 4 – Траєкторії завислих часток розміром 10 мкм, що проходять через вхідний переріз, для значень визначальних параметрів:  $Re_{\phi} = 5 \cdot 10^4$  (а, д),  $Re_{\phi} = 1 \cdot 10^5$  (б, е),  $Re_{\phi} = 2 \cdot 10^5$  (в, ж),  $Re_{\phi} = 5 \cdot 10^5$  (з, з),  $Re_r = 522$  (а — з),  $Re_r = 1044$  (д — з)

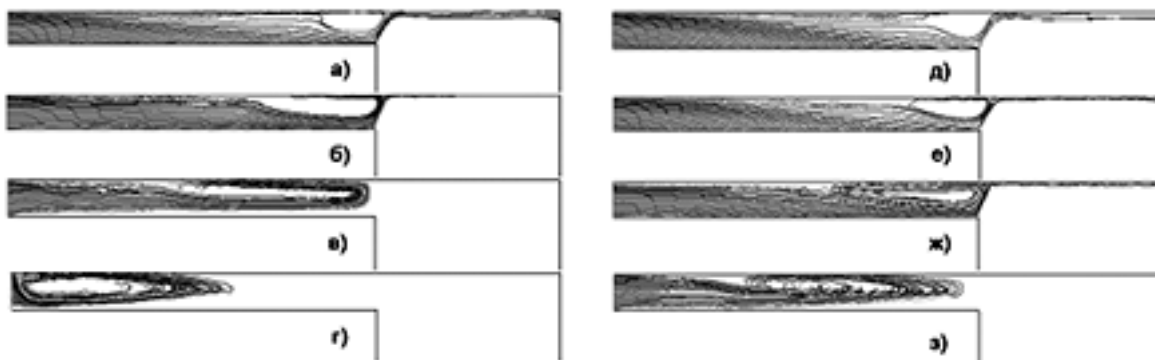


Рисунок 5 – Траєкторії завислих часток розміром 50 мкм, що проходять через вхідний переріз, для значень визначальних параметрів:  $Re_{\phi} = 5 \cdot 10^4$  (а, д),  $Re_{\phi} = 1 \cdot 10^5$  (б, е),  $Re_{\phi} = 2 \cdot 10^5$  (в, ж),  $Re_{\phi} = 5 \cdot 10^5$  (з, з),  $Re_r = 522$  (а — з),  $Re_r = 1044$  (д — з)

швидкості обертання ( $Re_\phi$ ) виникають та збільшують інтенсивність вторинні течії у вигляді макровихорів, які просуваються від межі бункера до вхідного перерізу. Збільшення витрати рідини ( $Re_c$ ) дещо стримує розвиток макровихорів і розміри вихрових зон.

Вторинні вихрові течії чинять вирішальний вплив на рух завислих часток. Вихори заважають потраплянню часток у бункер та сприяють їх рециркуляційному руху, поверненню та утриманню у зоні фільтрування. Цей вплив значною мірою має місце для часток з меншим розміром (при однаковій густині).

Можна також побачити, що за досить великих значень частки під дією відцентрових сил взагалі не контактують з фільтрувальною поверхнею (рисунок 4, г, рисунок 5, в, г, з). Ця тенденція підсилюється зі зменшенням та збільшенням маси (розміру) частки.

## Висновки

Виконаними дослідженнями показано, що відведення часток у бункер для осаду є складною проблемою, вирішення якої є важливою умовою ефективною реалізації повнопоточної схеми фільтрування ротаційним фільтром.

Зокрема, виявлено, що частки з розмірами  $d_p \sim 10 \text{ мкм}$  взагалі не потрапляють до бункера простої циліндричної форми за всіх розглянутих режимів.

Виявлено дві протилежні за своїми наслідками тенденції, пов'язані з підвищенням швидкості обертання фільтруючого циліндра, яка характеризується параметром  $Re_\phi$ . Його збільшення підвищує інтенсивність і розміри вторинних вихрових течій, що призводить до рециркуляції часток у зоні фільтрування і перешкоджає їхньому відведенню до бункера. Збільшення швидкості фільтрування ( $Re_c$ ) стримує цю тенденцію. З іншого боку, зі збільшенням  $Re_\phi$  збільшується вплив відцентрових сил на рух часток поблизу обертової перегородки. Внаслідок цього впливу можливим є виключення контакту часток з перегородкою, що є оптимальним для ефективності фільтрування. Збільшення  $Re_c$  зменшує вплив відцентрових сил.

Таким чином, збільшення частоти обертання одночасно сприяє утворенню ореола часток на відстані від фільтруючої поверхні без контакту з нею та перешкоджає відведенню часток із зони фільтрування. В таких умовах ймовірним є зростання концентрації часток у робочій області фільтра, яке здатне призвести до наслідків, які не піддаються розгляду у постановці, що використана.

На основі отриманих результатів можна сформулювати декілька напрямів підвищення ефективності тонкого очищення рідин повнопоточними ротаційними фільтрами. Поперше, це дослідження впливу геометрії і конструкції бункера на гідродинаміку всього фільтра і можливості таким шляхом забезпечити відведення часток із зони фільтрування. Подруге, це визначення режимів (зокрема, діапазонів сполучення параметрів  $Re_\phi$ ,  $Re_c$ ), за яких відбувається відведення часток визначеного розміру та густини до накопичувального бункера.

## Література

1. Мочалин, Е.В. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил [Текст] / Е.В. Мочалин, А.А. Халатов. — К.: Инт 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 фильтро-элемента ротационного фильтра на гидродинамический эффект очистки жидкости / Е.В. Мочалин // Восточноевропейский журнал передовых технологий. — 2007. — № 5/3 (29). — С. 46—51.

4. Мочалин, Е.В. Гидродинамическая устойчивость в рабочей полости ротационного фильтра / Е.В. Мочалин // Промислова гідравліка і пневматика. — 2005. — №4(10). — С. 50—54.

5. Мочалин, Е.В. Устойчивость течения жидкости снаружи вращающегося сетчатого фильтроэлемента / Е.В. Мочалин // Вісник Сумського державного університету. — 2006. — №12(96). — С. 23—32.

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

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

8. Новомлинский В.В. Математическое моделирование неизотермических одно и двухфазных закрученных потоков / В.В. Новомлинский // Инженернофизический журнал. — Т.60. — № 2. — С. 191—197.

9. Криль, С.И. К вопросу об эффективной вязкости суспензий сферических частиц / С.И. Криль // Вестник НТУ ХПИ. — 2001. — Вып. 129. — Ч.1. — С. 147—157.

10. Boussinesq, J. Essai Sur La Theorie Des Eaux Courantes / J. Boussinesq // Mem. Pressentes Acad. Sci. Paris. — 1877. — № 23. — Р. 46.

11. Белов, И. А. Моделирование турбулентных течений: Учебное пособие / И.А. Белов, С.А. Исаев. — СПб.: Балт. гос. тех. университет, 2001. — 108 с.

12. Белянин, П.Н. Центробежная очистка рабочих жидкостей авиационных гидросистем / П.Н. Белянин. — М.: Машиностроение, 1976. — 328 с.

## References

1. Mochalin, Ye.V. Teploobmen i gydrodinamika v poliakh tsentrobezhnykh massovykh sil / Ye. V. Mochalin, A.A. Khalatov. — K.: Int tekhn. teplofiziki NAN Ukrainy, 2010. — T.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.— Vyp.20.— S. 292—304.

3. Mochalin, Ye.V. Vliyaniye konstruktssii filtroelementa rotatsionnogo filtra na gidrodinamicheskiiy effect ochistki zhidkosti / Ye.V. Mochalin // Vostochnoevropskiy zhurnal pertedovyykh tekhnologiy.— 2007.— № 5/3 (29).— S. 46—51.

4. Mochalin, Ye.V. Gydrodinamicheskaya ustoychivost v rabochey polosti rotatsionnogo filtra / Ye.V. Mochalin // Promyslova gidravlika i pnevmatika.— 2005.— №4(10).— S. 50—54.

5. Mochalin, Ye.V. Ustoychivost techeniya zhidkosti snaruzhi vrashayushegosia setchatogo filtroelementa / Ye.V. Mochalin // Visnik Sumskogo derzhavnogo universitetu.— 2006.— №12(96).— S. 23—32.

6. Khappel, Dzh. Gidrodinamika pri malykh chislakh Reynoldsa / Dzh. Khappel, G. Brenner.— M.: Mir, 1976.— 630 s.

7. Sou, S. Gidrodinamika mnogofaznykh sistem / S. Sou.— M.: Mir, 1971.— 536 s.

8. Novomlinskiy, V.V. Matematicheskoye modelirovaniye neizotermicheskikh odno i dvukhfaznykh potokov / V.V. Novomlinskiy // Inzhenernofizicheskiy zhurnal.— T.60.— № 2.— S. 191—197.

9. Kril, S.I. K voprosu ob effektivnoy viazkosti suspensii sfericheskikh chastits / S.I. Kril // Vestnik NTU KhPI.— 2001.— Vyp. 129.— Ch.1.— S. 147—157.

10. Boussinesq, J. Essai Sur La Theorie Des Eaux Courantes / J. Boussinesq // Mem. Pressentes Acad. Sci. Paris.— 1877.— № 23.— P. 46.

11. Belov, I. A. Modelirovaniye turbulentnykh techeniy: Uchebnoye posobiye / I.A. Belov, S.A. Isayev.— Spb.: Balt. gos. tekhn. universitet, 2001. 108 s.

12. Belianin, P.N. Tsentrobezhnaya ochistka rabochikh zhidkostey aviatsionnykh gidrosistem / P.N. Belianin. — M.: Mashinostroyeniye, 1976.— 328 s.

Надійшла 19.09.2014 року

УДК 536.252:532.527.2

### Анализ движения твердых взвешенных частиц в ротационном фильтре очистки жидкостей с накопительным бункером

Е.В. Мочалин, В.Н. Браженко,  
А. Е. Мочалин

По результатам численного моделирования обнаружены закономерности движения взвешенных частиц в ротационном фильтре тонкой очистки жидкостей с бункером для сбора осадка. Показано влияние вторичных вихревых течений, возникающих вследствие центробежной неустойчивости в кольцевой области фильтрования, на движение твердых примесей. Обнаружена тенденция накопления частиц примесей в зоне фильтрования без отвода их в бункер, которая усиливается с увеличением частоты вращения фильтроэлемента и уменьшением размеров частиц.

*Ключевые слова:* бункер, взвешенные частицы, вторичные течения, ротационный фильтр, численное моделирование.

UDC 536.252:532.527.2

### Examination of suspended particles motion inside of liquids purification rotary filter with sediment bin

Ye.V. Mochalin, V.M. Brazhenko,  
O. Ye. Mochalin

Regularities of suspended particles motion within rotary filter for thin liquids refinement with sediment bin are revealed via numerical simulation. The influence is shown of the secondary flows arising in the annular filtration region due to centrifugal instability onto solid admixtures motion. The trend is disclosed of suspended particles accumulation in the filtration zone without their outcoming into the bin which is reinforcing with enlarging of filtering element rotation rate and reducing of particle size.

*Key words:* bin, suspended particles, secondary flows, rotary filter, numerical simulation.