

В.І. Терьохін, В.С. Манзій, С.О. Пузік, В.С. Шевчук

## АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВІДНОСНОГО РУХУ ЧАСТИНОК ЗАБРУДНЕННЯ У ГРАВІТАЦІЙНОМУ ОЧИСНИКУ

Установлено, що горизонтальне відносне переміщення частинок забруднення в рідині при її очищенні в гравітаційному очиснику практично відсутнє, тобто переносна сила інерції  $F_c^{\text{ін}}$  зрівноважується горизонтальною складовою стоксовської сили опору  $F_o^{\Gamma}$ .

Очистка авіаційних пально-мастильних матеріалів має вирішальний вплив не тільки на їх економію, але і на надійність роботи агрегатів паливної та інших систем повітряних кораблів на безпеку польотів.

Одним із способів очистки нафтопродуктів в силових полях є використання гравітаційного поля Землі в пристроях, які називаються гравітаційними очисниками (ГО)

Як зазначалося в роботі [1], основною структурною частиною ГО є щілина, утворена паралельними горизонтальними круглими осаджувальними пластинами, що являють собою кільця з внутрішнім  $r_o$  та зовнішнім  $R$  радіусами (див. рисунок).

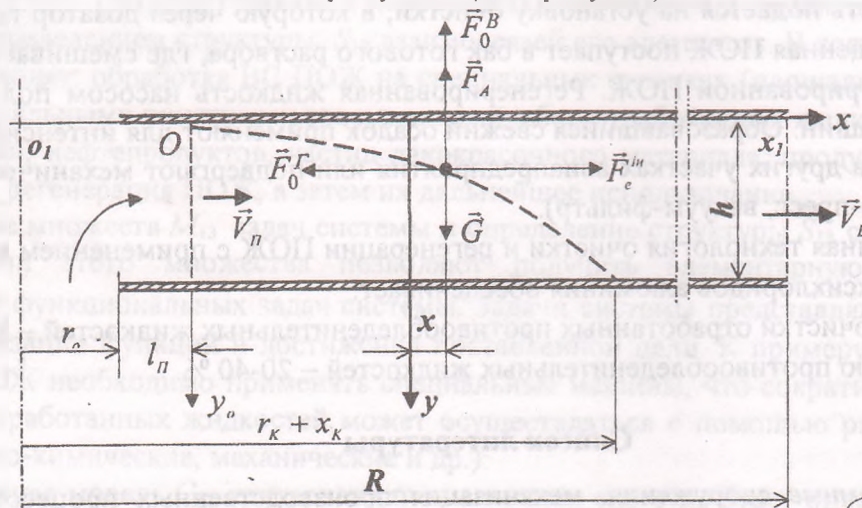


Схема сил, що діють на частинку забруднення

У роботі [2] встановлено, що рух рідини в щілині ламінарний. При цьому рідина плавно входить в щілину радіусом  $r_o$ , а виходить радіусом  $R$ . Згідно з даними роботи [3] формування ламінарного потоку рідини відбувається на початковій ділянці довжини  $l_p$ , яка для плоскої щілини нескінченної ширини і висоти  $h$  дорівнює  $l_p \approx 0,225 h \text{Re}$ , де  $\text{Re}$  – число Рейнольдса, яке визначається з виразу

$$\text{Re} = \frac{VD_{\Gamma}}{\nu}$$

де  $V$  – середня швидкість рідини;  $D_{\Gamma}$  – гідравлічний діаметр поперечного перерізу щілини,  $\nu$  – кінематичний коефіцієнт в'язкості рідини.

Згідно з рівнянням нерозривності об'ємна подача рідини в ГО  $Q = nSV = \text{const}$ , де  $S$  – площа поперечного перерізу щілини,  $n$  – кількість щілин. Тому

$S_B V_B = S_{\Pi} V_{\Pi}$ , де  $S_B$  та  $V_B$  – відповідно площа та середня швидкість на виході із щілини;  $S_{\Pi}$  і  $V_{\Pi}$  – відповідно площа та середня швидкість на відстані  $r_o + l_{\Pi}$  від осі ГО.

Як видно з рисунка,  $S_{\Pi} = 2\pi(r_o - l_{\Pi})h$ , а  $S_B = 2\pi R h$ , тобто середня швидкість  $V = Q/nS$ , обернено пропорційна відстані від осі ГО, а це означає, що рух рідини в щілині рівнозмінний (прискорення рідини  $a_e = \text{const}$ ). Такому рухові притаманні відомі із фізики залежності, які згідно з рисунком мають вигляд:

$$V_B = V_{\Pi} + a_e T \quad \text{та} \quad R = (r_o + l_{\Pi}) + V T + a_e T^2/2, \quad (1)$$

де  $T$  – час проходження рідини через щілину на ділянці  $R - (r_o + l_{\Pi})$ .

Об'єктом дослідження є ГО з такими параметрами:

$$Q=50 \text{ л/хв} = 833 \text{ см}^3/\text{с}; \quad r_o=5 \text{ см}, \quad h=0,3 \text{ см}, \quad n=90, \quad \nu=0,015 \text{ см}^2/\text{с}; \quad R=28,77 \text{ см}.$$

Тому

$$V_{\Pi} = \frac{Q}{2\pi R h \cdot 90} = 0,17 \text{ см/с};$$

$$V_{\Pi} = \frac{Q}{2\pi(r_o + l_{\Pi})h \cdot 90}.$$

Оскільки  $V_B = 0,17 \text{ см/с}$  і за даними роботи [3]  $D_{\Gamma} = 2h$ , то можна обчислити попереднє значення числа Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{2hV_{\Pi}}{\nu} = 6,8.$$

Тоді  $l_{\Pi} \approx 0,045 \text{ см}$ . Початкова середня швидкість рідини  $V_{\Pi} = 0,97 \text{ см/с}$  (якщо за нею визначити число Рейнольдса, то отримаємо  $\text{Re}=38,8$  і  $l_{\Pi} \approx 0,25 \text{ см}$ ).

Вирази (1) набувають вигляду

$$\begin{cases} 0,17 = 0,97 + a_e T, \\ 28,77 = 5 + 0,25 + 0,97T + \frac{a_e T^2}{2}. \end{cases}$$

У результаті розв'язування отриманої системи двох рівнянь з двома невідомими знаходимо

$$a_e = -0,019 \text{ см/с}^2; \quad T = 41,6 \text{ с}$$

Саме ці величини необхідні для дослідження руху частинок забруднення в ГО.

Як відомо з фізики, рух частинок є складним: разом з рідиною уздовж щілини і відносно рідини. Для зручності введемо декартову систему координатних осей  $x$  та  $y$ , пов'язаних з рідиною (початкове положення початків осей – в точці  $O$  (див. рисунок)).

Тепер можна скласти диференціальні рівняння відносного руху частинки забруднення в проєкціях на ці осі.

Згідно із схемою сил, що діють на частинку забруднення,

$$\begin{cases} m\ddot{x} = F_e^{\text{IH}} - F_o^{\Gamma} \\ m\ddot{y} = G - F_A - F_o^{\text{B}}. \end{cases} \quad (2)$$

В цих рівняннях позначено:  $m = \frac{\pi d^3}{b} \rho_r$  – маса частинки ( $d$  – діаметр частинки, умовно прийнятої за кульку;  $\rho_r$  – щільність рідини,  $\pi = 3,14$ ),  $F_e^{\text{ін}} = m|a_e|$  – переносна сила інерції;  $G = mg$  – вага частинки ( $g = 981 \text{ см/с}^2$ ),  $F_A = m_p \cdot g$  – архімедова сила ( $m_p = \frac{\pi d^3}{b} \rho_p$  – маса витісненої частинкою рідини, щільність якої  $\rho_p$ ),  $F_o^{\text{Г}} = 3\pi d \rho_p v_x$  – горизонтальна складова стоксовської сили опору ( $\dot{x}$  – горизонтальна складова відносної швидкості частинки);  $F_o^{\text{В}} = 3\pi d \rho_p v_y$  – вертикальна складова стоксовської сили опору ( $\dot{y}$  – вертикальна складова відносної швидкості частинки).

Після підстановки всіх наведених величин в систему диференціальних рівнянь (2) і спрощення матимемо для  $\rho_p = 3 \text{ г/см}^3$  та  $\rho_r = 0,785 \text{ г/см}^3$ :

$$\begin{cases} \ddot{x} = 0,019 - \frac{0,07}{d^2} \dot{x} \\ \ddot{y} = 654 - \frac{0,07}{d^2} \dot{y} \end{cases} \quad (3)$$

Як і в роботі [1], де розглядалось тільки друге рівняння системи (3), кожне з рівнянь можна розв'язати шляхом поділу змінних. У результаті розв'язання другого рівняння системи (3) отримаємо

$$y = 9343d^2 t + 204e^{6,5 \frac{0,07t}{d^2}} - 204e^{6,5} \quad (4)$$

Оскільки в згаданій роботі не розглядалося перше з рівнянь системи (3), наведемо його розв'язання.

Оскільки  $\ddot{x} = \frac{dx}{dt}$ , то можна це рівняння подати у вигляді

$$\frac{d\dot{x}}{dt} = 0,019 - \frac{0,07}{d^2} \dot{x}$$

Розділяємо змінні

$$\frac{d\dot{x}}{0,019 - \frac{0,07}{d^2} \dot{x}} = dt$$

і інтегруємо обидві частини

$$\int_{\dot{x}_0=0}^{\dot{x}} \frac{d\dot{x}}{0,019 - \frac{0,07}{d^2} \dot{x}} = \int_0^t dt$$

Тоді

$$\dot{x} = 0,27d^2 - 0,27 \cdot 0,019^2 \cdot e^{-\frac{0,07t}{d^2}}$$

Так само подаємо і  $\dot{x} = \frac{dx}{dt}$ . Тоді

$$\frac{dx}{dt} = 0,27d^2 - 0,27 \cdot 0,019^2 \cdot e^{-\frac{0,07t}{d^2}}$$

Розділяємо змінні

$$dx = 0,27d^2 dt - 0,27 \cdot 0,019^2 e^{-\frac{0,07t}{d^2}} dt$$

Інтегруємо

$$\int_0^x dx = \int_0^t 0,27d^2 dt - 0,27 \cdot 0,019^2 e^{-\frac{0,07t}{d^2}} dt$$

Після інтегрування і спрощення маємо

$$x = 0,27d^2 t + 3,86d^4 e^{-\frac{0,07t}{d^2}} - 3,86d^4 \quad (5)$$

Поклавши  $y = h = 0,3$  см, можна з рівняння для  $y$  (4) знайти час  $t_K$  осідання найбільш віддалених від нижньої пластини частинок різних розмірів (розрахунки велися для значень  $d$ , рівних 0,001; 0,002; 0,0025; 0,005; 0,01 та 0,02 см).

Підставляючи знайдені значення часу в рівняння (5) для  $x$ , можна знайти величини горизонтального кінцевого переміщення  $x_K$  таких частинок забруднення. Результати розрахунків зведені в таблицю, де для наочності поміщені і результати розрахунків величини  $r_K$  за формулою (1).

$d$ , см	0,001	0,002	0,0025	0,005	0,01	0,02
$t_K$ , см	32	8	5,2	1,3	0,32	0,08
$x$ , см	$8,64 \cdot 10^{-6}$	$8,63 \cdot 10^{-6}$	$8,77 \cdot 10^{-6}$	$8,76 \cdot 10^{-6}$	$8,64 \cdot 10^{-6}$	$8,63 \cdot 10^{-6}$
$r_K$ , см	26,6	12,4	10,04	6,49	5,56	5,33

Аналіз розрахунків дає підставу стверджувати, що горизонтальне відносне переміщення  $x$  частинок забруднення в рідині практично відсутнє, тобто сила  $F_e^{IH}$  урівноважується силою  $F_o^{\Gamma}$ .

Таким чином обгрунтовано, що при аналітичних розрахунках ГО досить розглянути тільки диференціальне рівняння відносного руху в проекціях на вертикаль, як це мало місце в роботі [1]. Крім того, встановлено, що практично  $r_o + l_{II} = 5 + 0,045 \approx r_o$ , тобто можна вважати, що ламінарний рух устанавлюється відразу на початку щілини.

#### Список літератури

1. *Расчет* гравитационного очистителя непрерывного действия для очистки авиационных топлив от загрязнений С.А. Пузык, В.С. Манзий, В.С. Шевчук «Исследование эксплуатационных свойств авиа ГСМ и спецжидкостей» – Сб. науч. тр. – К.: КИИГА, 1986. – С.115-120.
2. *Торг А.С.* Основные задачи теории ламинарных течений. – М.: ГТТИ, 1951.
3. *Ачеркан Н.С.* Справочник машиностроителя. Т. 2, – М.: Гос. науч.-техн. изд-во маш.-строит. лит.-ры, 1956. – С. 467-468.

Стаття надійшла до редакції 30 грудня 1999 року.