

УДК 681.3:665.66

052-082-320.8 + 111.62-5

<sup>1</sup>С.О. Пузік, канд. техн. наук<sup>2</sup>В.С. Манзій, канд. техн. наук<sup>3</sup>В.С. Шевчук, канд. техн. наук**КІЛЬКІСНА ОЦІНКА КОАГУЛЯЦІЇ В ОЧИСНИКАХ ІНЕРЦІЙНОГО ТИПУ**<sup>1</sup>Факультет військової підготовки НАУ, e-mail: fnt@nau.edu.ua<sup>2,3</sup>Аерокосмічний інститут НАУ, e-mail: aviacosm@nau.edu.ua

Наведено розрахунки константи коагуляції між частинками забруднення різних розмірів в інерційному очиснику рідин. Показано, що коагуляція практично можлива тільки між частинками забруднення розміром  $d = 0,05$  см і частинками інших розмірів. Причому вірогідність коагуляції лежить у діапазоні 1,47–29,5 %.

**Вступ**

Коагуляція являє собою процес зменшення кількості частинок забруднення, що містяться в рідині, унаслідок їх зіткнення і укрупнення з подальшим випадінням (седиментацією) в осад. При цьому більша частинка захоплює меншу, у результаті чого збільшується маса і розміри утворених таким чином нових частинок. Це, в свою чергу, призводить до збільшення сил, що визначають інтенсивність процесу випадіння з рідини частинок забруднення. Тому процес коагуляції бажаний як у гравітаційних, так і в інерційних очисниках рідин.

Результати дослідження характеристики коагуляції в гравітаційних і інерційних очисниках авіаційних палив для газотурбінних двигунів, проведеного авторами, наведено в праці [1].

**Методика оцінки коагуляції в інерційних очисниках**

Як і в праці [1], за основну ознаку було взято константу коагуляції у вигляді, наведеному в авторефераті [2]:

$$K = (V_6 - V_m) \pi (3/4\pi V)^{2/3} E_1, \quad (1)$$

де  $V_6$ ,  $V_m$  – відповідно швидкості осадження більшої та меншої частинки забруднення, які наближено вважають кульками діаметрами  $d_6$ ,  $d_m$ ;  $V$  – об'єм більшої частинки;  $E_1$  – коефіцієнт захоплення малої частинки більшою:

$$E_1 = 4\alpha / (1 - g_1);$$

$\alpha \sim d_m/d_6$  – усереднений коефіцієнт вірогідності злиття двох частинок забруднення;  $g_1 = (d_m/d_6)^2$ .

Отже,

$$E_1 \sim 4(d_m/d_6) : (1 - (d_m/d_6)^2). \quad (2)$$

Після підстановки формули (2) в рівняння (1) матимемо:

$$K \sim (V_6 - V_m) \pi \cdot \pi d_6^2 / 4 \cdot 4(d_m/d_6) : (-d_m/d_6)^2. \quad (3)$$

Частинки забруднення розглядалися з умовними діаметрами 0,001; 0,002; 0,005; 0,01; 0,02 і 0,05 см.

Нескладно обчислити вирази при  $(V_6 - V_m)$  у формулі (3) залежно від розмірів частинок забруднення.

Після підстановки результатів обчислення у формулу (3) матимемо:

– при  $d_m = 0,001$ 

$$K = (V_6 - V_m) 0,000026 \text{ для } d_6 = 0,002,$$

$$K = (V_6 - V_m) 0,000051 \text{ для } d_6 = 0,005,$$

$$K = (V_6 - V_m) 0,0000985 \text{ для } d_6 = 0,01,$$

$$K = (V_6 - V_m) 0,000197 \text{ для } d_6 = 0,02,$$

$$K = (V_6 - V_m) 0,000492 \text{ для } d_6 = 0,05;$$

– при  $d_m = 0,002$ 

$$K = (V_6 - V_m) 0,000116 \text{ для } d_6 = 0,005,$$

$$K = (V_6 - V_m) 0,000205 \text{ для } d_6 = 0,01,$$

$$K = (V_6 - V_m) 0,000395 \text{ для } d_6 = 0,02,$$

$$K = (V_6 - V_m) 0,000984 \text{ для } d_6 = 0,05;$$

– при  $d_m = 0,005$ 

$$K = (V_6 - V_m) 0,00065 \text{ для } d_6 = 0,01,$$

$$K = (V_6 - V_m) 0,00104 \text{ для } d_6 = 0,02,$$

$$K = (V_6 - V_m) 0,00246 \text{ для } d_6 = 0,05;$$

– при  $d_m = 0,01$ 

$$K = (V_6 - V_m) 0,00256 \text{ для } d_6 = 0,02,$$

$$K = (V_6 - V_m) 0,00513 \text{ для } d_6 = 0,05;$$

– при  $d_m = 0,02$ 

$$K = (V_6 - V_m) 0,0117 \text{ для } d_6 = 0,05.$$

**Визначення проєкцій швидкостей осадження більшої та меншої частинок забруднення**

Для знаходження значень швидкостей  $V_6$  та  $V_m$  необхідно скласти та проінтегрувати диференціальні рівняння відносного руху частинок забруднення в координатній формі.

Як видно з рисунка, на кожну частинку забруднення у відносному русі діють:

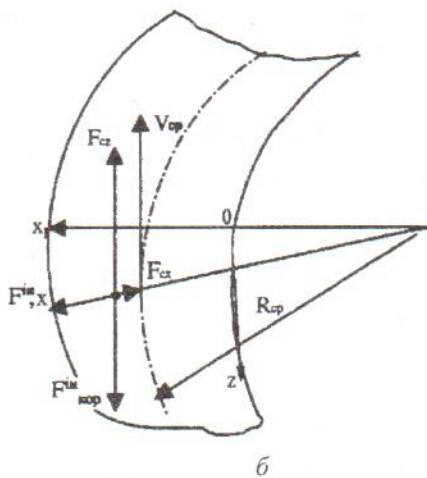
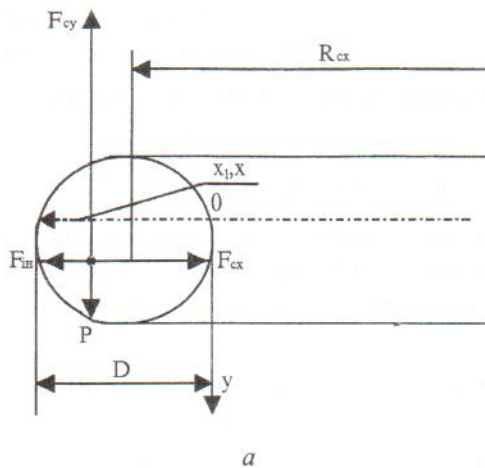


Схема сил, які діють на частинку забруднення в каналі інерційного очисника:

*a* – вертикальний перетин; *b* – горизонтальний перетин

– сила ваги:

$$P = \pi d^3 / 6 \rho_c g,$$

де  $d$  – діаметр частинки;  $\rho_c$  – густина частинки;  $g = 981 \text{ см/с}^2$ .

– архімедова сила:

$$F_A = \pi d^3 / 6 \rho_n g,$$

де  $\rho_n$  – густина рідини (нафтопродукту);

– складові сили стоксівського опору:

$$F_{cx} = 3\pi d \rho_n \nu x';$$

$$F_{cy} = 3\pi d \rho_n \nu y';$$

$$F_{cz} = 3\pi d \rho_n \nu z',$$

де  $\nu$  – кінематичний коефіцієнт в'язкості рідини;  $x'$ ,  $y'$ ,  $z'$  – проекції відносної швидкості  $V$  на координатні осі;

– відцентрова сила інерції:

$$F^{ih} \sim m V_{сеп}^2 / R_{сеп},$$

де  $m = P/g$  – маса частинки забруднення;  $V_{сеп} = 4Q/\pi D^2$  – середня швидкість рідини в очиснику;  $Q$  – втрата рідини,  $\text{см}^3/\text{с}$ ;  $D$  – внутрішній діаметр каналу очисника;  $R_{сеп}$  – середній радіус очисника;

– коріолісова сила інерції:

$$F^{ih}_{кор} = m 2(V_{сеп}/R_{сеп}) x'.$$

У праці [3] наведено результати інтегрування диференціальних рівнянь відносного руху частинок забруднення в проекціях тільки на осі  $x$  та  $y$ . З виразів, одержаних у результаті першого інтегрування, можна знайти:

$$x' = 12138,5 d^2 (1 - e^{-0,065t/d})^2; \quad (4)$$

$$y' = 111,7 d^2 (1 - e^{-0,065t/d})^2$$

при  $Q = 333 \text{ см}^3/\text{с}$ ,  $\rho_r = 3 \text{ г/см}^3$ ,  $\rho_n = 0,78 \text{ г/см}^3$ ,  $\nu = 0,014 \text{ см}^2/\text{с}$ ,  $R_{сеп} = 36 \text{ см}$ ,  $D = 5,3 \text{ см}$ .

Після послідовної підстановки значень  $d$  у виразі (4) матимемо:

– для  $d = 0,001$

$$x' = 0,012 (1 - e^{-65000t}) \sim 0,012,$$

$$y' = 0,0001117 (1 - e^{-65000t}) \sim 0,0001117;$$

– для  $d = 0,002$

$$x' = 0,048 (1 - e^{-16250t}) \sim 0,048,$$

$$y' = 0,0004468 (1 - e^{-16250t}) \sim 0,000447;$$

– для  $d = 0,005$

$$x' = 0,3 (1 - e^{-2600t}) \sim 0,3,$$

$$y' = 0,00279 (1 - e^{-2600t}) \sim 0,0028;$$

– для  $d = 0,01$

$$x' = 1,2 (1 - e^{-650t}) \sim 1,2,$$

$$y' = 0,01117 (1 - e^{-650t}) \sim 0,01117;$$

– для  $d = 0,02$

$$x' = 4,8 (1 - e^{-162,5t}) \sim 4,8,$$

$$y' = 0,04468 (1 - e^{-162,5t}) \sim 0,0447;$$

– для  $d = 0,05$

$$x' = 30 (1 - e^{-26t}) \sim 30,$$

$$y' = 0,279 (1 - e^{-26t}) \sim 0,279.$$

#### Вплив коріолісових сил інерції на переміщення частинок забруднення

Для оцінки величини переміщення частинки забруднення вздовж осі  $z$  складаємо диференціальне рівняння руху в проекціях на вісь  $z$ :

$$mz'' = F^{ih}_{кор} - F_{cz} = 2mV_{сеп}/R_{сеп} x' - 3\pi d \rho_n \nu z'. \quad (5)$$

Після розв'язування рівняння (5) відносно осі  $z'$  матимемо:

$$z'' = 0,84 x' - 0,1 dz'.$$

Набуваючи наближені значення  $x'$ , можемо записати:

$$\begin{aligned} z'' &= 0,01 - 0,0001 z' \text{ для } d = 0,001; \\ z'' &= 0,04 - 0,0002 z' \text{ для } d = 0,002; \\ z'' &= 0,25 - 0,0005 z' \text{ для } d = 0,005; \\ z'' &= 1,04 - 0,001 z' \text{ для } d = 0,01; \\ z'' &= 4,03 - 0,002 z' \text{ для } d = 0,02; \\ z'' &= 25,2 - 0,005 z' \text{ для } d = 0,05. \end{aligned} \quad (6)$$

Інтегруємо кожне з наближених рівнянь (6) у загальному вигляді, зобразивши їх як

$$z'' = a - b z'.$$

Тоді

$$dz' / dt = a - b z'.$$

Розділимо змінні:

$$dz' / (a - b z') = dt.$$

Перше інтегрування:

$$\int_0^{z'} dz' / (a - b z') = \int_0^t dt;$$

$$-1/b \ln|a - b z'|_0^{z'} = 1/b \ln a / (a - b z') = t.$$

Звідси

$$z' = a/b (1 - e^{-bt})$$

$$\text{або } dz = a/b (1 - e^{-bt}) dt.$$

Друге інтегрування:

$$z = a/bt + a/b^2(e^{-bt} - 1) = a/bt - a/b^2(1 - e^{-bt}). \quad (7)$$

Підставивши  $a$  та  $b$  в рівняння (7) для кожного розміру  $d$ , матимемо:

– для  $d = 0,001$

$$z = 100t - 1000000 + 1000000e^{-0,0001t};$$

– для  $d = 0,002$

$$z = 200t - 1000000 + 1000000e^{-0,0002t};$$

– для  $d = 0,005$

$$z = 500t - 1000000 + 1000000e^{-0,0005t};$$

– для  $d = 0,01$

$$z = 1040t - 1000000 + 1000000e^{-0,001t};$$

– для  $d = 0,02$

$$z = 2015t - 1000000 + 1000000e^{-0,002t};$$

– для  $d = 0,05$

$$z = 5040t - 1000000 + 1000000e^{-0,005t}.$$

Час відносного руху для таких частинок було визначено в праці [3]. Підстановка його значень свідчить про те, що переміщенням частинок забруднення вздовж осі  $z$  можна знехтувати, тобто вважати, що відносний рух відбувається в радіальній площині  $xoy$ .

#### Визначення величин швидкостей осадження більшої і меншої частинок забруднення

Оскільки в праці [4] було з'ясовано, що траєкторія відносного руху – майже пряма лінія, то швидкість відносного руху частинок забруднення знаходиться через її проекції з виразу:

$$V = \sqrt{x'^2 + y'^2}. \quad (8)$$

Підставляючи у формулу (8) знайдені раніше значення для різних розмірів частинок, одержимо:

– для  $d = 0,001$

$$V = \sqrt{0,012^2 + 0,0001117^2} \approx 0,012;$$

– для  $d = 0,002$

$$V = \sqrt{0,048^2 + 0,0004468^2} \approx 0,048;$$

– для  $d = 0,005$

$$V = \sqrt{0,3^2 + 0,0028^2} \approx 0,3;$$

– для  $d = 0,01$

$$V = \sqrt{1,2^2 + 0,01117^2} \approx 1,2;$$

– для  $d = 0,02$

$$V = \sqrt{4,8^2 + 0,04468^2} \approx 4,8;$$

– для  $d = 0,05$

$$V = \sqrt{30^2 + 0,279^2} \approx 30.$$

Отже, маємо всі необхідні вихідні дані для обчислення констант коагуляції:

– для  $d_m = 0,001$

$$K = (0,048 - 0,012) 0,000026 = 0,0000009 - d_6 = 0,002,$$

$$K = (0,3 - 0,012) 0,000051 = 0,0000146 - d_6 = 0,005,$$

$$K = (1,2 - 0,012) 0,0000985 = 0,000117 - d_6 = 0,01,$$

$$K = (4,8 - 0,012) 0,000197 = 0,00094 - d_6 = 0,02,$$

$$K = (30 - 0,012) 0,000492 = 0,0147 - d_6 = 0,05;$$

– для  $d_m = 0,002$

$$K = (0,3 - 0,048) 0,000116 = 0,000292 - d_6 = 0,005,$$

$$K = (1,2 - 0,048) 0,000205 = 0,000236 - d_6 = 0,01,$$

$$K = (4,8 - 0,048) 0,000395 = 0,00188 - d_6 = 0,02,$$

$$K = (30 - 0,048) 0,000984 = 0,0295 - d_6 = 0,05;$$

– для  $d_m = 0,005$

$$K = (1,2 - 0,3) 0,00065 = 0,000585 - d_6 = 0,01,$$

$$K = (4,8 - 0,3) 0,00104 = 0,00468 - d_6 = 0,02,$$

$$K = (30 - 0,3) 0,00246 = 0,073 - d_6 = 0,05;$$

– для  $d_m = 0,01$

$$K = (4,8 - 1,2) 0,00256 = 0,0092 - d_6 = 0,02,$$

$$K = (30 - 1,2) 0,00513 = 0,148 - d_6 = 0,05;$$

– для  $d_m = 0,02$

$$K = (30 - 4,8) 0,0117 = 0,295 - d_6 = 0,05.$$

Для наочності результати розрахунків зводимо до таблиці.

Значення константи коагуляції між частинками різних розмірів в інерційному очиснику

$d_m$	$d_6$				
	0,002	0,002	0,01	0,02	0,05
0,001	$9 \cdot 10^{-7}$	$146 \cdot 10^{-7}$	$117 \cdot 10^{-6}$	$94 \cdot 10^{-5}$	0,0147
0,002		$292 \cdot 10^{-7}$	$236 \cdot 10^{-6}$	$188 \cdot 10^{-5}$	0,0295
0,005			$585 \cdot 10^{-6}$	$468 \cdot 10^{-5}$	0,073
0,01				$92 \cdot 10^{-5}$	0,148
0,02					0,295

С.А. Пузик, В.С. Манзий, В.С. Шевчук

Количественная оценка коагуляции в очистителях инерционного типа

Приведены расчеты константы коагуляции между частицами загрязнения разных размеров в инерционном очистителе жидкостей. Показано, что коагуляция практически возможна только между частицами загрязнений размером  $d = 0,05$  и частицами других размеров. Причем вероятность коагуляции находится в диапазоне 1,47–29,5 %.

S.O. Puzik, V.S. Manziy, V.S. Shevchuk

Quantitative estimation of coagulation in cleaners of inertial type

Calculations of a constant of coagulation between particles of pollution of the different sizes in an inertial cleaner of liquids are given. It is shown, that coagulation practically possible only between particles of pollution in the size  $d = 0,05$  sm with particles of other sizes, and reliability of coagulation lays in a range 1,47–29,5 %.

Отже, коагуляція практично можлива тільки між частинками забруднення  $d = 0,05$  і частинками решти розмірів, причому вірогідність коагуляції лежить у діапазоні 1,47–29,5 %.

### Висновки

1. Доведено, що коагуляція можлива між частинками забруднення всіх розмірів.

2. Практичне значення має коагуляція тільки між частинками забруднення  $d = 0,05$  см із частинками забруднення інших розмірів. Причому вірогідність такої коагуляції лежить у діапазоні 1,47–29,5 %.

### Список літератури

1. Пузик С.О., Манзий В.С., Шевчук В.С., Ипатов А.М. Расчет коагуляции при гравитационной очистке топлив для ГТД // Исследование эксплуатационных свойств авиаГСМ и спецжидкостей: Сб. науч. тр. – К.: КИИГА, 1987. – С. 35–38.
2. Пузик С.О. Розробка гравітаційного очисника авіаційних палив: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – К.: КМУЦА, 1999. – 18 с.
3. Терьохін В.І., Пузик С.О., Манзий В.С., Шевчук В.С. Дослідження ефективності застосування циклонів та гравітаційних очисників рідин // III міжнар. наук.-техн. конф. "Авіа-2001". – К.: НАУ, 2001. – С. 14.117–14.119.
4. Пузик С.О., Манзий В.С., Шевчук В.С., Ланецкий В.Г. Визначення траєкторій частинок забруднення в інерційному очиснику рідин // IV міжнар. наук.-техн. конф. "Авіа-2002". – К.: НАУ, 2002. – С. 43.49–43.52.

Стаття надійшла до редакції 12.04.03.