

но спосіб збільшення рівномірності розподілу продуктів згоряння шляхом використання змінного перетину насадок по довжині, що забезпечує підвищення ефективності використання поверхні нагрівання, збільшення температур підігріву повітря й палива.

**Висновки.** 1. На підставі теоретичних досліджень встановлено, що при одночасній роботі регенеративних теплообмінників, працюючих з підігрівом палива та повітря, існує оптимальне положення роздільної стінки, при якому досягається максимальна утилізація тепла відхідних продуктів згоряння.

2. На підставі випробувань встановлено, що швидкість руху димових газів у насадці повинна становити 1,0-1,2 м/с для досягнення оптимального режиму роботи нагрівального колодязя.

3. Запропонована конструкція насадок регенераторів забезпечує рівномірний розподіл продуктів згоряння по перетину та підвищує ефективність використання поверхні нагріву.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Глущенко О.Л. Розробка математичної моделі спільної роботи газових та повітряних регенераторів нагрівальних колодязів для оптимізації їх утилізаційних характеристик / Глущенко О.Л. // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки). – Дніпродзержинськ: ДДТУ. – 2015. – Випуск 2 (27). – С.157-162.
2. Решетняк И.С. Проектирование регенеративных теплообменников для установок, работающих на низкокалорийном топливе / Решетняк И.С., Словиковский П.А., Хандрига Г.С. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1980. – Вып. 3. – С.35-38.
3. Совершенствование системы отопления и повышение тепловой эффективности металлургических печей: тематический отраслевой сборник / отв. ред. Тымчак В.М. и др. – М.: Металлургия, 1984. – 72с.

*Надійшла до редколегії 03.04.2017.*

УДК 658.26

КЛИМОВ Р.О., к.т.н., доцент

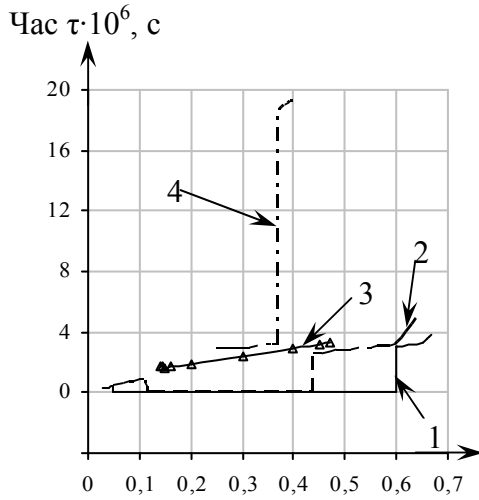
Дніпродзержинський державний технічний університет, м. Кам'янське

### ВПЛИВ СТРУКТУРНИХ ТА ФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ В ПРОЦЕСАХ ПРИГОТУВАННЯ РІДКИХ ПАЛИВ

**Вступ.** Процеси приготування стійких рідких водо-мазутних палив є одними з найбільш енергоємних процесів у промисловості, що пов'язано зі значною перевитратою теплоти і енергії, необхідних для дроблення дисперсної фази. Для створення дисперсних систем найбільшого поширення набув метод механічного дроблення. Основним напрямком зниження витрат енергії є використання принципу дискретно-імпульсного введення енергії [1]. Можливим є використання динамічних ефектів при закипанні крапель малих розмірів для дроблення більш великих крапель. Проведемо дослідження процесів руйнування границі розділу фаз (мазут-пара) і подальшого утворення стійкого до розшарування мазутного палива в суміші з водою при взаємодії двох закипаючих часток води, при різних початкових радіусах, відстанях між частками, температурах і різних значеннях міжфазного натягу.

**Постановка задачі.** Вивчити вплив різних чинників на процес дроблення дисперсної фази емульсії при її закипанні.

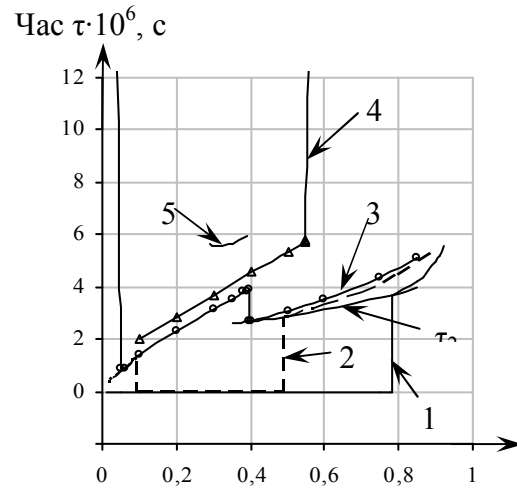
**Результати роботи.** Проведені за моделями [2, 3] розрахунки для двох крапель дисперсної фази, що знаходяться на різних відстанях одна від іншої і при різних початкових радіусах більшої з крапель, наведені на рис.1, 2.



Співвідношення радіусів крапель  $R_2/R_1$

Рисунок 1 – Залежність часу до дроблення краплі від відносного радіуса сусідньої краплі та відстані між поверхнями крапель  $h$ :

1 – 15 мкм; 2 – 20 мкм; 3 – 40 мкм; 4 – 50 мкм;  
 $R_1 = 100$  мкм,  $t = 130$  °C



Співвідношення  $R_2/R_1$

Рисунок 2 – Залежність  $\tau = f(R_2/R_1, h)$  при  $h$ :

1 – 20 мкм; 2 – 40 мкм; 3 – 60 мкм;  
 4 – 100 мкм; 5 – 150 мкм;  
 $R_1 = 200$  мкм,  $t = 130$  °C

На рис.1, 2 представлено залежності часу до дроблення краплі від відносного радіуса сусідньої краплі і різних геометричних розмірів між поверхнями даних крапель при початковій температурі системи 130°C і відповідному тиску насичення, при миттєвому скиданні тиску до атмосферного. З даних рисунків видно, що зі зростанням початкового радіуса великої краплі відбувається збільшення відстані між краплями, при якому ще можливе дроблення крапель. Також збільшується відносний радіус малої краплі, тобто зі збільшенням радіуса великої краплі для існування процесу дроблення необхідною умовою є наявність закипаючої сусідньої краплі, яка за розміром мало відрізняється від великої і, як впливає з рис.2,  $R_2 \approx 0,92R_1$  для даної початкової температури. Час до моменту дроблення в цілому зі збільшенням радіуса  $R_1$  також збільшується, що можна пояснити як більш повільним процесом зростання парової фази в динамічному відношенні, так і збільшенням можливої відстані  $h$ . Аналізуючи рис.1, можна говорити про те, що при певних міжповерхневих відстанях для заданого проміжку значень відносного радіуса другої краплі можливе практично миттєве руйнування великої частки. Зі збільшенням даної відстані діапазон значень відносного радіуса крапель, при якому можливе миттєве дроблення великої краплі, зменшується, а після певного значення  $h$  видно практично лінійну залежність між часом до руйнування і відносним радіусом крапель при постійному значенні  $h$ . З рис.2 випливає, що для даного початкового радіуса  $R_1$  при певному значенні параметра  $R_2/R_1$  можливе також і дроблення більш дрібної краплі (крива  $\tau_2$ ), що вказує на неоднозначність у розгляді процесів дроблення (може подрібнюватися як велика, так і дрібна крапля). Це пояснюється тим, що процеси прискорення-уповільнення для крапель з різними початковими радіусами протікають при різних періодах і амплітудах змін.

У деякий момент часу відбувається суттєвий перепад у значеннях прискорення або швидкості, що діють на поверхні будь-якої з крапель, і в результаті навіть більш дрібна крапля може бути роздроблена великою краплею.

На рис.1, 2 видно, що для певних значень  $h$  та  $R_2/R_1$  відбувається різке збільшення часу до дроблення частки. Дане розрахункове значення часу відповідає тому періоду, при якому дві краплі стикаються своїми поверхнями одна з іншою, що впливає з кривої 1 на рис.2. Для деяких значень  $h$  та  $R_2/R_1$  руйнування великої краплі буде від-

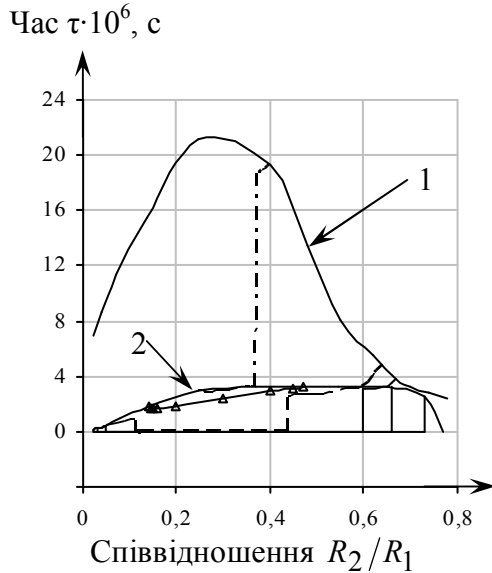


Рисунок 3 – Залежність часу до моменту зустрічі поверхонь крапель (крива 1) та критичного часу для розрахунку (крива 2) від відносного радіуса сусідньої краплі та відстані між поверхнями крапель  $h$ . Вихідні дані з рис.1

буватися при практично повному зіткненні крапель, а для інших значень такий ефект спостерігатися не буде. Це вказує на те, що з більшою ймовірністю дроблення крапель відбуватиметься не в момент їх зіткнення, а в момент часу, визначений під критичною кривою 2 (рис.3) або на даній кривій. Ця крива виключає імовірнісні процеси дроблення при зіткненні крапель, а залишає лише однозначне дроблення будь-якої з двох крапель. З рис.1, 2 випливає, що для кожного розглянутого випадку існують певні критичні значення і відповідні їм  $\tau_{cr}$ , які знаходяться на кривій  $\tau_{cr} = f(R_2/R_1)$  (крива 2, рис.3) і визначають можливість дроблення крапель.

Величину  $h_{cr}$  зручно представити у відносному вигляді  $\vartheta_{cr} = h_{cr}/R_1$ . Для дослідження

залежностей  $\vartheta_{cr}$  ( $y_1 = \vartheta_{cr}$ ) і  $\tau_{cr}$  ( $y_2 = \tau_{cr}$ ) при різних значеннях початкового радіуса великої краплі  $R_1$ , відносного радіуса малої краплі  $\delta = R_2/R_1$ , початкової температури системи  $t_0$  і значення коефіцієнта міжфазного натягу  $\sigma$  використаємо ортогональний центральний композиційний план типу  $2^n$  ( $n = 4$ ) [4]. Для цього плану модель має вигляд

$$y(a, x) = a_0 + a_1x_1 + \dots + a_nx_n + a_{n+1}x_1^2 + \dots + a_{2n}x_n^2 + a_{2n+1}x_1x_2 + \dots + a_kx_{n-1}x_n. \quad (1)$$

Рівні варіювання факторів представлено в табл.1, а матриця планування – в табл.2 [4].

Таблиця 1 – Рівні варіювання факторів

Фактори	Код	-1.414	-1	0	+1	+1,414
$R_1$ , мкм	$x_1$	17.2	100	300	500	582.8
$R_2/R_1$	$x_2$	0.076	0.2	0.5	0.8	0.924
$t$ , °C	$x_3$	109.7	120	145	170.0	180.4
$\sigma$ , мН/м	$x_4$	9.65	20	45	70	80.35

Для величини  $\mathcal{G}_{cr}$  отримано модель процесу у вигляді

$$\begin{aligned} \mathcal{G}_{cr}(x) = & 1.973 - 0.047x_1 + 0.563x_2 + 2.156x_3 - 0.921x_4 - 0.18x_1^2 + \\ & + 0.018x_2^2 + 0.884x_3^2 + 0.657x_4^2 - 0.147x_1x_2 - 0.677x_1x_3 - 0.261x_1x_4 + \\ & + 0.639x_2x_3 - 0.219x_2x_4 - 0.416x_3x_4, \end{aligned} \quad (2)$$

де  $x_1 = \frac{R_1 - 300}{200}$ ,  $x_2 = \frac{\delta - 0.5}{0.3}$ ,  $x_3 = \frac{t - 145}{25}$ ,  $x_4 = \frac{\sigma - 0.045}{0.025}$ .

Оцінка дисперсії помилок розрахунку обчислюється за допомогою залишкової суми квадратів

$$S_R = \sum_{j=1}^N (\hat{y}_j - y_j)^2, \quad (3)$$

з числом ступенів свободи

$$\varphi_1 = N - k - 1, \quad (4)$$

за формулою

$$s_R^2 = \frac{S_R}{\varphi_1}, \quad (5)$$

де  $\hat{y}_j$  – результати, отримані за рівнянням (2) для  $N = 1, 2, \dots, 25$ ;  $y_j$  – результати за табл.2;  $k = 14$ .

Таблиця 2 – Матриця планування і результати розрахунків в кодованих величинах

N	Матриця плану				y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub> , МКС
	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>4</sub>		
1	-1	-1	-1	-1	0.878	2.012
2	+1	-1	-1	-1	2.378	10.15
3	-1	+1	-1	-1	0.823	3.131
4	+1	+1	-1	-1	2.522	50.65
5	-1	-1	+1	-1	5.61	352.0
6	+1	-1	+1	-1	4.928	60.8
7	-1	+1	+1	-1	9.24	651.0
8	+1	+1	+1	-1	7.566	394.6
9	-1	-1	-1	+1	0.576	44.96
10	+1	-1	-1	+1	1.208	17.56
11	-1	+1	-1	+1	0.42	12.15
12	+1	+1	-1	+1	0.766	10.59
13	-1	-1	+1	+1	4.16	338.0
14	+1	-1	+1	+1	2.644	40.5
15	-1	+1	+1	+1	6.52	640.1
16	+1	+1	+1	+1	3.732	314.1
17	-1.414	0	0	0	0.985	32.86
18	+1.414	0	0	0	2.079	7.91
19	0	-1.414	0	0	1.203	6.41
20	0	+1.414	0	0	2.653	654.0
21	0	0	-1.414	0	0.73	8.31
22	0	0	+1.414	0	6.59	726.0
23	0	0	0	-1.414	4.80	4.44
24	0	0	0	+1.414	1.613	31.02
25	0	0	0	0	2.293	63.2

Залишкова сума квадратів для величини  $\mathcal{G}_{cr}$  за отриманою моделлю складає  $S_R = 1.985$  при числі ступенів свободи  $\varphi_1 = 10$ . Перевірка значущості коефіцієнтів проводилася за «порогами» значимості для різних ефектів факторів  $h_m s$ , де  $h_m = t_{cr} \sqrt{c_m}$  ( $m = 1, 2, 3$ ) [4],  $t_{cr}$  – критичне значення розподілу Стьюдента при заданому рівні значущості і числі ступенів свободи.

При цьому коефіцієнт  $a_i$  в моделі вважається значимим, якщо виконується умова

$$|a_i| > h_m \cdot s. \quad (6)$$

Для перевірки значущості коефіцієнтів використовуємо в якості оцінки  $s^2$  дисперсії помилок залишкову дисперсію  $s^2 = s_R^2 = 0.1985$ . При  $n = 4$ ,  $\nu = 1$  і рівні значущості  $1 - P = \alpha = 0.05$  з [4] маємо:  $h_1 = 0.498$ ,  $h_2 = 0.788$ ,  $h_3 = 0.557$ . Порівняння додатків  $sh_1$  з абсолютними значеннями оцінок коефіцієнтів при лінійних членах,  $sh_2$  – з оцінками коефіцієнтів при квадратах факторів і  $sh_3$  – з оцінками при парних взаємодіях показує, що умова (6) не виконується для коефіцієнтів при наступних функціях:  $x_1, x_1^2, x_2^2, x_1 x_2, x_2 x_4$ . Виключаючи ці функції з рівняння (2), отримаємо

$$\begin{aligned} \mathcal{G}_{cr}(x) = & 1.844 + 0.563x_2 + 2.156x_3 - 0.921x_4 + 0.884x_3^2 + \\ & + 0.657x_4^2 - 0.677x_1x_3 - 0.261x_1x_4 + 0.639x_2x_3 - 0.416x_3x_4. \end{aligned} \quad (7)$$

У даному рівнянні всі коефіцієнти, які залишилися (крім  $a_0$ ), збігаються з їх значеннями в рівнянні (2). Цей факт – результат ортогональності плану. Оцінка  $a_0$  пов'язана з оцінками коефіцієнтів при квадратах змінних.

Для перевірки адекватності моделі використовуємо критерій Фішера

$$F = \frac{S_R / \varphi_1}{S_e / \varphi_2} < F_{cr}. \quad (8)$$

При цьому оцінка дисперсії помилок спостережень обчислюється за допомогою суми квадратів помилок

$$S_e = \sum_{i=1}^{\nu} (y_{i0} - \hat{y})^2, \quad (9)$$

з числом ступенів свободи

$$\varphi_2 = N(\nu - 1). \quad (10)$$

Для оцінки дисперсії помилок дослідів, викликаних похибками у визначенні розмірів часток і коефіцієнта міжфазного натягу, були проведені чотири повторних досліди в центральній точці даного плану. Після обчислень отримано  $S_e = 0.179$  для числа ступенів свободи  $\varphi_2 = 3$ . Тоді за рівнянням (8) критерій Фішера дорівнює  $F = 3.326$ . Критичне значення критерію Фішера для  $\alpha = 0.05, \varphi_1 = 10, \varphi_2 = 3$  має значення  $F_{cr} = 8.79$  [4]. Так як  $F < F_{cr}$ , то за критерієм Фішера модель адекватна істинній залежності.

Для величини  $\tau_{cr}$  отримано модель процесу у вигляді

$$\begin{aligned} \tau_{cr}(x) = & (14.05 - 5.9x_1 + 10.63x_2 + 18.27x_3 - 0.34x_4 - 6.97x_1^2 + \\ & + 8.52x_2^2 + 10.37x_3^2 - 7.1x_4^2 + 0.45x_1x_2 - 7.49x_1x_3 - 1.003x_1x_4 + \\ & + 7.54x_2x_3 - 0.87x_2x_4 - 0.91x_3x_4) \cdot 10^{-5}. \end{aligned} \quad (11)$$

Залишкова сума квадратів для величини  $\tau_{cr}$  за отриманою моделлю складає  $S_R = 1.24 \cdot 10^{-7}$  при числі ступенів свободи  $\varphi_1 = 10$ . Дисперсія помилок розрахунку дорівнює  $s^2 = 1.24 \cdot 10^{-8}$ . Після перевірки коефіцієнтів на значущість і виключення незначущих факторів або їх ефектів отримано наступну модель залежності:

$$\tau_{cr}(x) = (8.477 - 5.9x_1 + 10.63x_2 + 18.27x_3 + 8.52x_2^2 + 10.37x_3^2 - 7.1x_4^2 - 7.49x_1x_3 + 7.54x_2x_3) \cdot 10^{-5}. \quad (12)$$

Після проведення чотирьох повторних дослідів в центральній точці даного плану і обчислень отримано  $S_e = 7.6 \cdot 10^{-9}$  для числа ступенів свободи  $\varphi_2 = 3$ . Тоді за рівнянням (8) критерій Фішера дорівнює  $F = 4.89$ . Критичне значення критерію Фішера для  $\alpha = 0.05, \varphi_1 = 10, \varphi_2 = 3$  має значення  $F_{cr} = 8.79$  [4]. Так як  $F < F_{cr}$ , то за критерієм Фішера модель адекватна істинній залежності.

Аналізуючи отримані рівняння (7) і (12) видно, що найбільший вплив на  $\mathcal{G}_{cr}(x)$  і  $\tau_{cr}(x)$  надає чинник  $x_3$  (найбільші значення коефіцієнтів при даному факторі). При цьому даний фактор носить більш складний характер, ніж параболічний, тому сильно взаємодіє з  $x_1, x_2, x_4$  для залежності  $\mathcal{G}_{cr} = f(x)$  і з  $x_1, x_2$  для  $\tau_{cr} = f(x)$ . Зі збільшенням температури системи відстань між краплями, при якій ще можливе дроблення, зростає. Це пояснюється наявністю великих динамічних сил, що виникають при різкому скиданні тиску до атмосферного, в системі двох водних часток, які закипають в мазуті, внаслідок чого збільшується і відстань дії даних сил. Зі збільшенням температури також збільшується і  $\tau_{cr}$ , що є наслідком відповідного збільшення міжбульбашкової відстані.

Другим за впливом на  $\mathcal{G}_{cr}(x)$  є фактор  $x_4$ , який також носить складний характер впливу через своєї взаємодії з іншими факторами. Для  $\tau_{cr}(x)$  цей фактор носить параболічний характер. Зі збільшенням міжфазного натягу величина критичної відстані  $\mathcal{G}_{cr}(x)$  знижується, що викликано фактом збільшення необхідної сили, яка призводить до дроблення краплі, тобто збільшується енергетичний поріг, при подоланні якого можливе дроблення. Зрозуміло, що даний поріг буде з найбільшою ймовірністю подолано при менших відстанях між закипаючими краплями. Зі збільшенням  $\sigma$  критичний час зменшується, що викликано відповідним зменшенням  $\mathcal{G}_{cr}(x)$ .

Фактор  $x_1$  (радіус  $R_1$ ) найбільш значущий лише для критичного часу, а для критичної міжбульбашкової відстані він проявляється тільки при взаємодії з температурою і коефіцієнтом міжфазного натягу. Зі збільшенням початкового радіуса великої краплі величина  $\mathcal{G}_{cr}(x)$  також збільшується. Це викликано тим, що більш велика крапля може бути зруйнована при дії меншого динамічного ефекту відповідно до критеріїв Бонда і Вебера [1], як наслідок, джерело даного динамічного впливу може бути розташоване на більшій відстані від подрібнюваної краплі. Критичний час для найбільшого проміжку досліджуваних температур зі збільшенням  $R_1$  зменшується за лінійним законом, що пояснюється відносною «легкістю» у руйнуванні великих крапель, навіть якщо джерело динамічного впливу розташоване на відносно великій відстані.

Співвідношення радіусів крапель (фактор  $x_2$ ) найбільший вплив має на  $\tau_{cr}(x)$ , і для обох функцій зміни  $\tau_{cr}(x), \mathcal{G}_{cr}(x)$  проявляє сильну взаємодію з температурою. В цілому ж при збільшенні  $\delta$  для більшості значень досліджуваних температур величина критичної відстані збільшується, що пояснюється більшою околицею дії сил від крапель великого розміру (для радіуса  $R_2$ ), ніж від малих крапель, а, значить, більш великі

краплі (що мають радіус менший, ніж  $R_1$ ) можуть розташовуватися на більшій відстані від краплі з радіусом  $R_1$ .

**Висновки.** Основним фактором, що визначає дроблення дисперсних часток води в мазуті, є температура. Цей фактор в першу чергу визначає витрати енергії на приготування стійкого водо-мазутного палива. Другим фактором є натяг на міжфазній межі розділу, значення цього коефіцієнта регулюється шляхом додавання поверхнево-активних речовин. Розміри часток води, розподіленої в мазуті, визначаються процесами прогріву холодного мазуту парою та мають певне значення. Виходячи з цього, основними параметрами регулювання процесу приготування стійкого до розшарування водо-мазутного палива є тиск насичення водної фази та відповідна йому температура системи, а також міжфазний натяг. Визначення оптимальних значень цих параметрів дозволить раціонально використовувати енергію в процесах приготування рідких палив.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Долинский А.А. Дискретно-импульсная трансформация энергии в адиабатно вскипающем потоке / А.А.Долинский, Б.И.Басок // Промышленная теплотехника. – 2001. – Т.23. – №4-5. – С.5-20.
2. Павленко А.М. Кинетика испарения в процессах гомогенизации / А.М.Павленко, Р.А.Климов, Б.И.Басок // Промышленная теплотехника. – 2006. – Т. 28. – №6. – С.14-20.
3. Климов Р.А. Особенности возникновения динамических разрушающих сил при вскипании эмульсий // Збірник наукових праць ДДТУ: (технічні науки) / Дніпродзержинськ: ДДТУ. – 2011. – Випуск 1 (16). – С.159-162.
4. Хартман К. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов / Хартман К. – М.: Мир, 1977. – 552с.

Надійшла до редколегії 23.01.2017

УДК 622.41.012.2

СТАСЕВИЧ Р.К., к.т.н., ст. науч. сотр.  
СТАСЕВИЧ Д.О. \*, инженер  
ЛИТВИНЕНКО А.А. \*\*, к.т.н., доцент  
ЮРЧЕНКО А.А. \*\*, к т н., доцент

Институт геотехнической механики НАН Украины  
\*ПАТ «Днепровский металлургический комбинат»  
\*\*ГВУЗ «Национальный горный университет», г. Днепро

### ИССЛЕДОВАНИЯ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ ВЕНТИЛЯТОРОВ ГЛАВНОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ ДЕЙСТВУЮЩЕЙ ШАХТЫ

**Введение.** Большинство угольных и рудных шахт Украины проветриваются по фланговой схеме. В процессе ведения горных работ режимы работы вентиляторов главного проветривания постоянно изменяется, так как аэродинамическое сопротивление шахтной сети не является постоянной величиной. Это вызвано тем, что площадь сечения участков горных выработок зачастую снижается из-за действия горного давления, выработки загромождаются материалами и оборудованием, изменяется топология шахтной сети из-за погашения отработанных участков и нарезки новых выработок. Кроме этого, внешние и внутренние утечки воздуха в вентиляционной сети трудно поддаются учёту, главные и вспомогательные стволы в момент встречи подъёмных сосудов практически перекрываются, заводские аэродинамические характеристики зачастую в силу разных причин не соответствуют действительным, физика некоторых процессов недостаточно изучена.