

**Выводы.**

1. При визуальном осмотре и металлографическом анализе образцов, упрочненных электроискровым методом на установке ЭИЛ 8А электродами из стали 15Х11МФ-Ш и твердого сплава Т15К6, трещин не обнаружено.

2. При испытании на изгиб не разрушился ни один из образцов, упрочненных как твердым сплавом Т15К6, так и сталью 15Х11МФ-Ш.

3. При осмотре мест изгибов отслаивание упрочненного слоя от основного металла не обнаружено.

4. Средняя толщина поверхностного слоя, упрочненного как сплавом Т15К6, так и сталью 15Х11МФ-Ш практически совпадает.

5. Микротвердость упрочненного слоя, переходной зоны, зона термического влияния на разных расстояниях от границы «основной металл-упрочненный слой» как при использовании твердого сплава Т15К6, так и стали 15Х11МФ-Ш практически не отличается.

6. На основе проведенных исследований можно рекомендовать замену применяемого упрочняющего электрода из сплава Т15К6 на сталь 15Х11МФ-Ш для повышения твердости входных кромок рабочих лопаток паровых турбин.

**ЛИТЕРАТУРА:**

1. *Металлы для турбин и теплообменного оборудования атомных электростанций. Рекомендации по выбору материалов. Общие технические условия.* [текст]: РТМ 108.020.15-86. – Изд. офиц., взамен РТМ 24.024.15-73; введ.1986-07-01.-Л.: НПО ЦКТИ, 1987. – 105с.

2. *Современные методы упрочнения поверхностей деталей машин. Аналитический обзор: Научно-технический прогресс в машиностроении / под ред. К.В. Фролова.* – Москва: ИМАШ АН СССР, 2009. – Вып. 9.1 – С. 205–271.
3. *Мулин Ю.И. Электроискровое легирование рабочих поверхностей инструментов и деталей машин электродными материалами, полученными из минерального сырья / Ю.И. Мулин, А.Д. Верхотуров.-Владивосток: Дальнаука, 1999. – 110с.*
4. *Большаков В. И. Об эффективности защитных покрытий деталей газотурбинных двигателей / В. И. Большаков, В. И. Харченко, В. Н. Журавель – // Перспективные задачи современной науки : сб. науч. тр. – Днепропетровск, 2002 – С. 109 – 1*
5. *Большаков В. И. Етапи ідентифікації параметричних технологій та шляхи їх реалізації / В. И. Большаков, В. М. Волчук, Ю. У. Дубров // Вісник НАН України, – 2013 – № 8. С. 66-72.*
6. *Мацевитый В. М. Способ контроля качества адгезии износостойких покрытий / В. М. Мацевитый, Л. М. Романова, В. М. Береснев // Применение прогрессивных инструментальных материалов и методов повышения стойкости режущего инструмента. – Краснодар, 1983. – С. 93–94.*
7. *Zenz E. The effect of a thin coating of insulation material on the performance of cutting tools / E. Zenz, D. Pnueli and Z. Rozeann // У. Vac. Sci. Technol.– 1979. – Vol. 53. – P. 337–344.*

УДК 621.926.5:539.215

**Науменко Ю.В., Герасимович І.О., Ойцюсь В.О., Ярута О.М.**

*Національний університет водного господарства та природокористування (м. Рівне)*

**ДИНАМІЧНІ ПАРАМЕТРИ РУХУ ЗЕРНИСТОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ ПРИ МАЛОМУ ЗАПОВНЕННІ КАМЕРИ БАРАБАННОЇ МАШИНИ**

**Машини барабанного типу**, завдяки низьці переваг, знаходять широке застосування в промисловості будівельних матеріалів та інших галузях виробництва. Парадоксальною особливістю таких систем є поєднання граничної простоти конструкції та вкрай складної для описування поведінки оброб-

люваного середовища, переважно зернистого.

Зважаючи на недетермінованість чинників робочого процесу барабанних машин, описати його можна лише за допомогою узагальнених динамічних характеристик способів переробки, як критеріїв ефективності

Швидка гравітаційна течія, що реалізується в зсувній зоні завантаження обертової камери, відноситься до класу швидких зсувних течій, які є найбільш загальною формою руху зернистого середовища та супроводжуються інтенсивною взаємодією елементів. Такі течії наближено описуються кінетичною теорією густих газів. Урахування непружності елементів у міжелементних зштовхуваннях дозволяє включити у рівняння балансу їх енергії параметр «температури» середовища [1]. Псевдотемпература зернистого середовища характеризує кінетичну енергію, що відповідає випадковому хаотичному руху елементів. Вираз для безрозмірної питомої псевдотемператури  $T$  у перерізі зсувного шару завантаження має вигляд:

$$T = \left( \frac{V_{zmax} + |V_{z0}|}{h} \right)^2 \frac{R}{g},$$

де  $V_{zmax}$  – максимальна зсувна швидкість на вільній поверхні у перерізі шару,  $V_{z0}$  – швидкість руху опорної поверхні шару,  $h$  – товщина шару,  $R$  – радіус камери,  $g$  – гравітаційне прискорення.

Показник псевдотемператури зернистого середовища має комплексний характер і визначає ступінь активності взаємних переміщень елементів та інтенсивність протікання технологічних процесів. Тому для інтенсифікації та раціональної організації із ура-

хуванням кінетики процесу переробки в барабанних машинах у швидкому гравітаційному потоці завантаження, необхідно забезпечити умови течії, що сприяють підвищенню псевдотемператури середовища, яке досягається за рахунок збільшення швидкості зсування в об'ємі шару.

Загальна продуктивність робочого процесу барабанних машин оцінюється безрозмірною повною енергією хаотичного руху в поперечному напрямку зсувного шару оброблюваного матеріалу, що визначає стираючу дію завантаження, і характеризується добутком псевдотемператури середовища шару  $T$ , як питомої енергії, масової частки шару  $K_{за}$  та оборотності  $K_o$  завантаження –  $T \cdot K_{за} \cdot K_o$ .

У роботах [2,3] розглядалися закономірності зміни динамічних параметрів руху завантаження при великих значеннях ступеня заповнення камери  $\kappa=0,1-0,9$ . Проте робочі процеси значного підкласу машин барабанного типу здійснюються переважно при малому заповненні камер оброблюваним середовищем. До них відноситься, перш за все, обладнання для теплової обробки – обертові печі, охолодники, сушильні та біотермічні барабани [4-8], а також реактори, мийки, скрубери, гранулятори, грудкоутворювачі, дражиратори та барабанно-валкові млини і активатори [9].

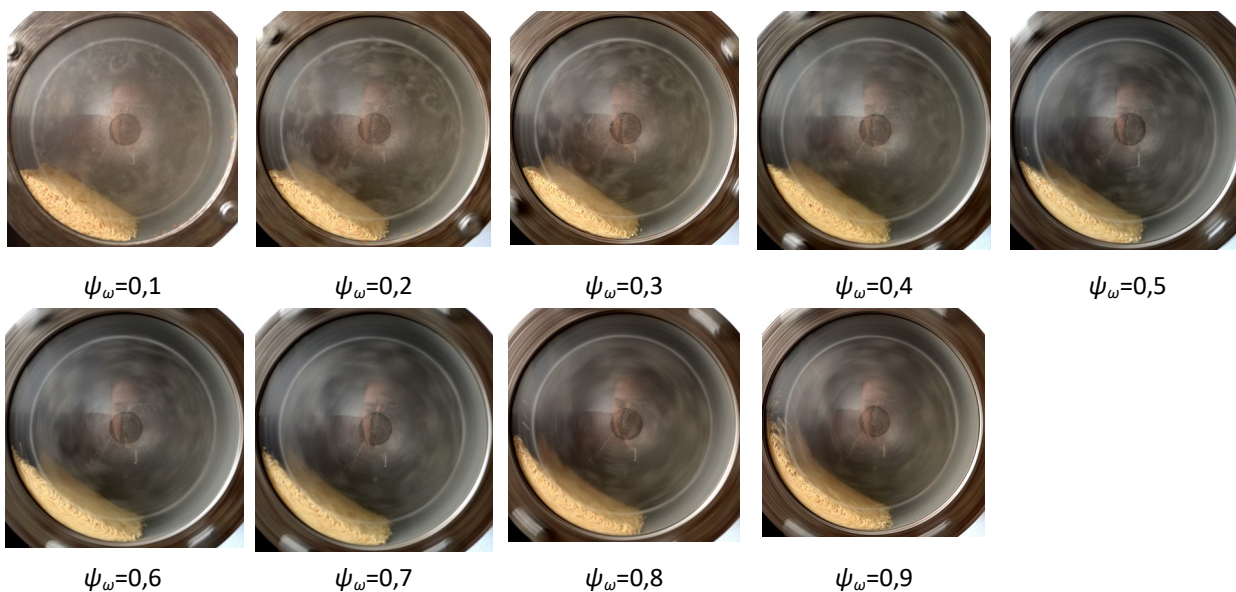


Рис. 1. Картини руху завантаження при  $\kappa=0,05$ .

Метою дослідження було встановлення закономірностей впливу ступеня заповнення та швидкості обертання на масовий розподіл зон, оборотність, псевдотемпературу та повну енергію хаотичного руху зсувного шару при малому заповненні камери зернистим завантаженням.

Було застосовано барабан із камерою з циліндричною поверхнею без виступів радіусом  $R=106$  мм та прозорою торцевою стінкою. Як робочий використовувався незв'язний зернистий матеріал із частинками розміром 2,2 мм. Було виконано 5 серій експериментів для діапазону зміни малих ступенів заповнення камери  $\kappa=0,05-0,25$  із кроком 0,05, при зміні відносної швидкості обертання у діапазоні  $\psi_{\omega}=0,1-0,9$  із кроком 0,1. Отримано 45 фотографії усереднених картин усталеного руху зернистого завантаження у поперечному перерізі обертової камери (рис. 1-5).

зний зернистий матеріал із частинками розміром 2,2 мм. Було виконано 5 серій експериментів для діапазону зміни малих ступенів заповнення камери  $\kappa=0,05-0,25$  із кроком 0,05, при зміні відносної швидкості обертання у діапазоні  $\psi_{\omega}=0,1-0,9$  із кроком 0,1. Отримано 45 фотографії усереднених картин усталеного руху зернистого завантаження у поперечному перерізі обертової камери (рис. 1-5).

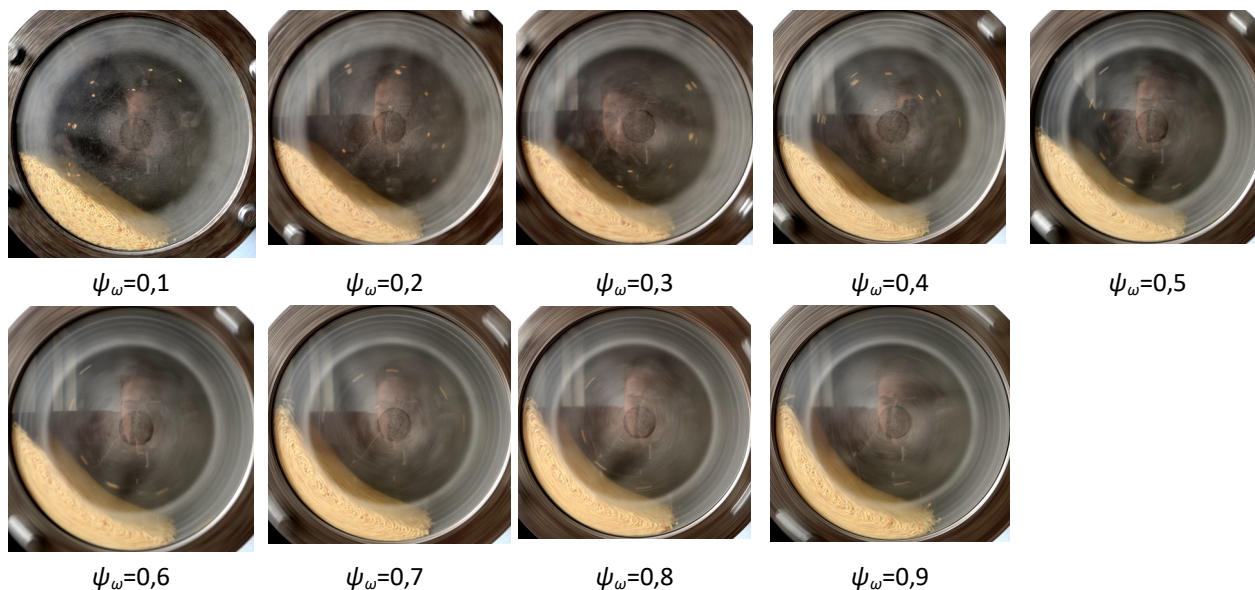


Рис. 2. Картини руху завантаження при  $\kappa=0,1$

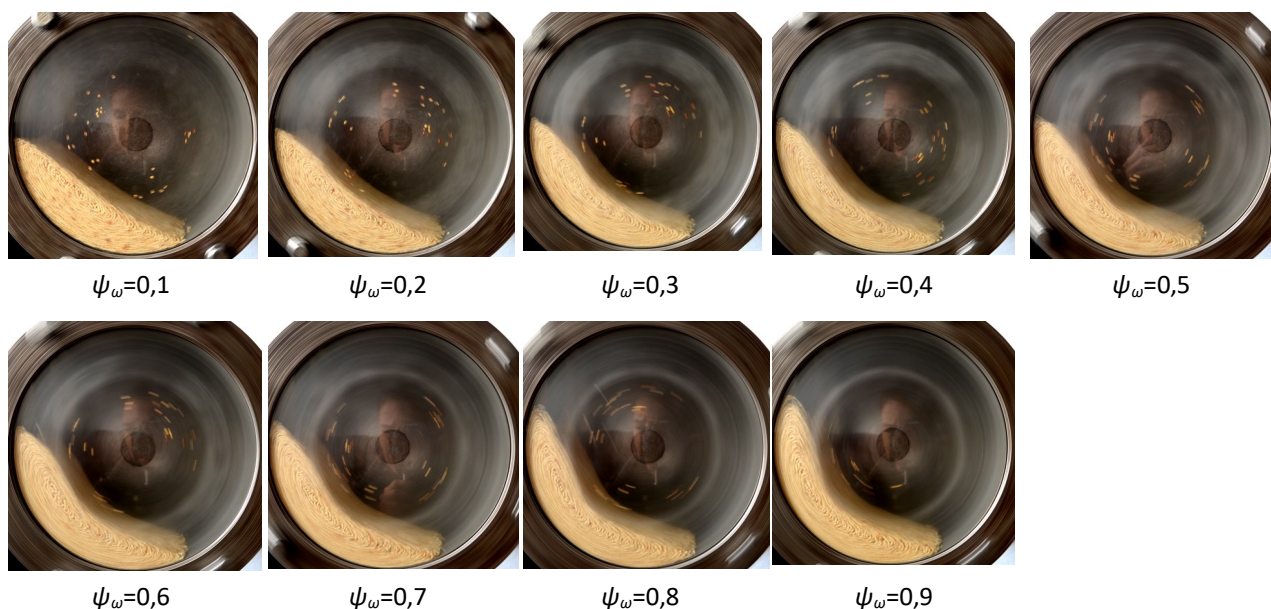


Рис. 3. Картини руху завантаження при  $\kappa=0,15$ .



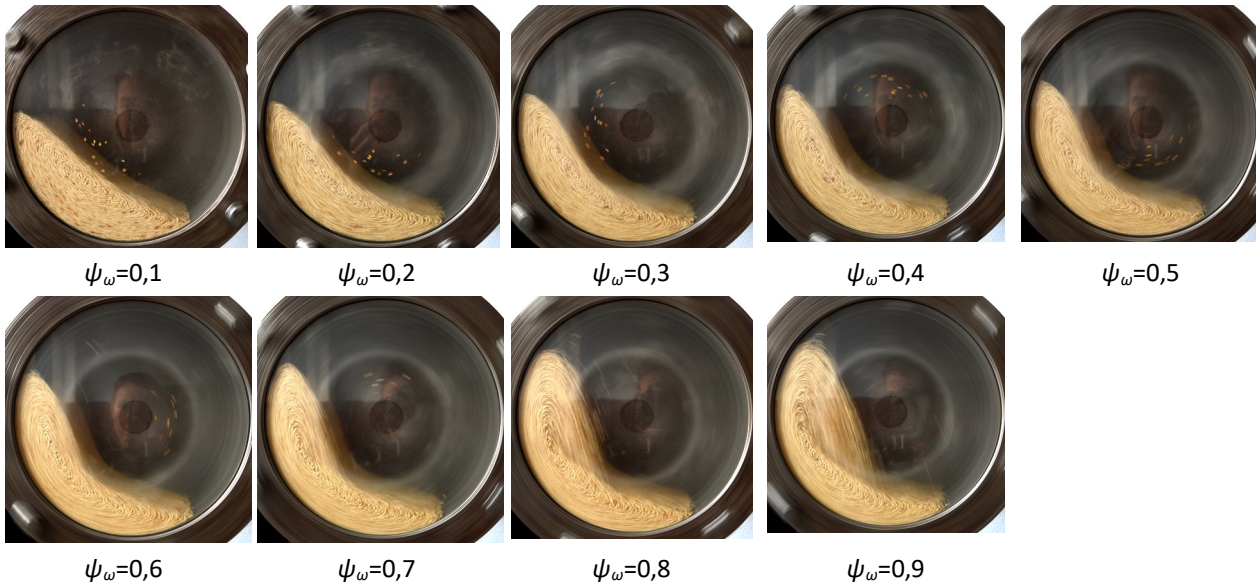


Рис. 4. Картини руху завантаження при  $\kappa=0,2$ .

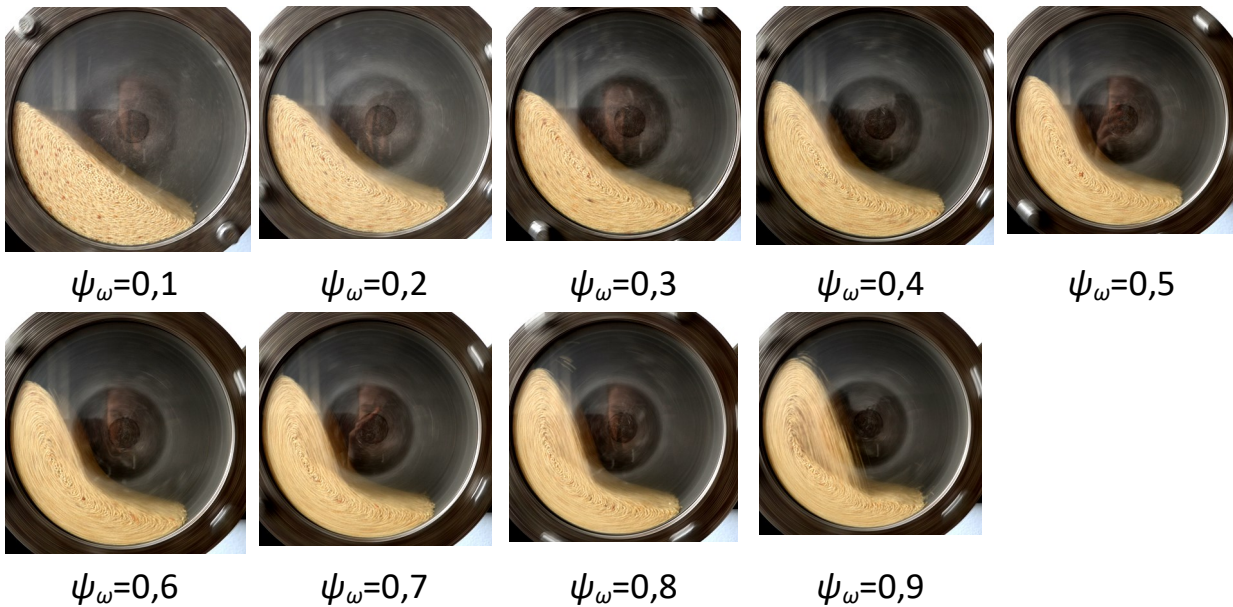
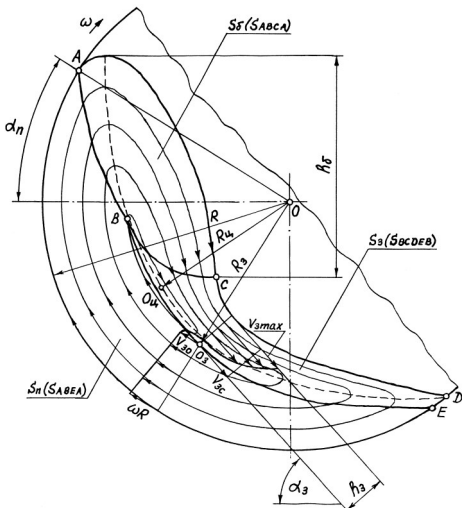


Рис. 5. Картини руху завантаження при  $\kappa=0,25$ .



Значення динамічних параметрів руху завантаження визначались розрахунковим шляхом при візуальному аналізі одержаних картин руху (рис. 6).

Для визначення масового розподілу зон руху завантаження на зображенні картини графічно встановлювалось положення меж ABE і ABC між зонами та вимірювались площі твердотільної (приєднаної) зони  $S_n$  ( $S_{ABEA}$ ) і зони зсувного шару  $S_s$  ( $S_{BCDEB}$ ).

Рис. 6. Розрахункова схема визначення динамічних параметрів руху завантаження обертової камери методом візуалізації.

Значення масових часток твердотільної зони (ступінь приєднання)  $K_n$ , зони зсувного шару (ступінь зсувної активації)  $K_{за}$  та зони невідного падіння (ступінь балістичної активації)  $K_{ба}$  завантаження обчислювались за виразами

$$K_n = \frac{S_n}{\pi R^2 \kappa}, \quad K_{за} = \frac{S_3}{\pi R^2 \kappa},$$

$$K_{ба} = 1 - K_n - K_{за}$$

Значення оборотності завантаження  $K_o$ , що характеризує кількість періодів його циркуляції протягом одного оберту камери, обчислювалось за виразом

$$K_o = \frac{1 - \left(\frac{R_y}{R}\right)^2}{\kappa}$$

де  $R_y$  – радіальна координата центра циркуляції завантаження.

Значення псевдотемператури зсувного шару завантаження  $T$  визначалось за виразом

$$T = \psi_\omega^2 \left[ \frac{(R - R_3)(R + R_3) + 2R_3 h_3}{h_3^2} \right]^2$$

де  $R_3$  – радіальна координата основи характерного перерізу зсувного шару з основою в точці  $O_3$ ,  $h_3$  – висота цього шару.

Отримані чисельні результати вимірювань і обчислень геометричних та динамічних параметрів завантаження обертової камери наведено у табл. 1-5.

Графічні результати отриманих залежностей динамічних параметрів руху завантаження зображено на рис. 7-10.

Таблиця 1 - Результати вимірювань та обчислень при  $\kappa=0,05$

$\psi_\omega$	$R$ (мм)	$R_y, R_3$ (мм)	$h_3$ (мм)	$K_{ба}$	$K_{за}$	$K_n$	$K_o$	$T$	$T \cdot K_{за} \cdot K_o$
0,1	64	54	4	0,059	0,396	0,545	5,76	102	232
0,2	63,5	54	4	0,07	0,434	0,496	5,54	374	900
0,3	63,5	53	4	0,081	0,448	0,471	6,07	954	2590
0,4	64	55	4	0,09	0,469	0,441	5,23	1430	3500
0,5	64	54	4	0,1	0,494	0,406	5,76	2540	7220
0,6	64	54	4	0,1	0,498	0,402	5,76	3650	10500
0,7	63,5	56	3	0,112	0,491	0,397	4,45	3460	7560
0,8	64	56	4	0,122	0,517	0,361	4,69	4960	12000
0,9	63,5	57	4	0,13	0,512	0,358	3,88	4860	9650

Таблиця 2 - Результати вимірювань та обчислень при  $\kappa=0,1$

$\psi_\omega$	$R$ (мм)	$R_y, R_3$ (мм)	$h_3$ (мм)	$K_{ба}$	$K_{за}$	$K_n$	$K_o$	$T$	$T \cdot K_{за} \cdot K_o$
0,1	64	46	5	0,073	0,371	0,556	4,83	95,3	171
0,2	66	50	5	0,07	0,381	0,549	4,26	355	577
0,3	66	53	6	0,091	0,444	0,465	3,55	331	522
0,4	66	51	6	0,096	0,445	0,459	4,03	692	1240
0,5	68	53	7	0,113	0,453	0,434	3,93	681	1210
0,6	68	53	6	0,121	0,454	0,425	3,93	1670	2980
0,7	66	53	7	0,132	0,48	0,388	3,55	1070	1820
0,8	66	53	7	0,126	0,486	0,388	3,55	1400	2410
0,9	66	54	8	0,129	0,545	0,326	3,31	1050	1890

Таблиця 3 - Результати вимірювань та обчислень при  $\kappa=0,15$

$\psi_{\omega}$	$R$ (мм)	$R_{\psi}, R_3$ (мм)	$h_3$ (мм)	$K_{\delta a}$	$K_{3a}$	$K_n$	$K_o$	$T$	$T \cdot K_{3a} \cdot K_o$
0,1	66	45	7	0,069	0,336	0,595	3,57	36,5	43,8
0,2	66	49	8	0,078	0,408	0,514	2,99	73,3	89,4
0,3	66	48	8	0,09	0,4	0,51	3,14	175	219
0,4	65,5	50	9	0,118	0,39	0,492	2,78	176	191
0,5	66	50	7,5	0,105	0,407	0,488	2,84	537	620
0,6	65,5	52	10	0,113	0,404	0,483	2,46	248	247
0,7	66	51	10	0,111	0,417	0,472	2,69	377	423
0,8	66	53	8	0,132	0,444	0,424	2,37	896	943
0,9	66	54	9	0,158	0,463	0,379	2,2	718	732

Таблиця 4 - Результати вимірювань та обчислень при  $\kappa=0,2$

$\psi_{\omega}$	$R$ (мм)	$R_{\psi}, R_3$ (мм)	$h_3$ (мм)	$K_{\delta a}$	$K_{3a}$	$K_n$	$K_o$	$T$	$T \cdot K_{3a} \cdot K_o$
0,1	66	42	8	0,084	0,386	0,53	2,98	26	29,9
0,2	66	45	10	0,084	0,392	0,524	2,68	41,8	43,9
0,3	66	47	11	0,089	0,46	0,451	2,46	62,2	70,4
0,4	66	48	10	0,093	0,458	0,449	2,36	145	157
0,5	66	49	11	0,089	0,48	0,431	2,24	157	169
0,6	66	50	10	0,086	0,515	0,399	2,13	294	322
0,7	66	50	12	0,087	0,528	0,385	2,13	221	248
0,8	66	52	9	0,09	0,559	0,351	1,9	653	693
0,9	66	55	8	0,092	0,575	0,333	1,53	967	850

Таблиця 5 - Результати вимірювань та обчислень при  $\kappa=0,25$

$\psi_{\omega}$	$R$ (мм)	$R_{\psi}, R_3$ (мм)	$h_3$ (мм)	$K_{\delta a}$	$K_{3a}$	$K_n$	$K_o$	$T$	$T \cdot K_{3a} \cdot K_o$
0,1	66,5	34	8	0,063	0,363	0,574	2,95	35,4	37,9
0,2	66	38	9	0,06	0,411	0,529	2,67	78,8	86,5
0,3	66	42	11	0,067	0,426	0,507	2,38	76	77
0,4	66	42	8	0,068	0,472	0,46	2,38	416	467
0,5	66	41	10	0,066	0,513	0,421	2,46	305	385
0,6	66	44	10	0,073	0,532	0,395	2,22	392	463
0,7	66	45	14	0,077	0,569	0,354	2,14	164	200
0,8	66	45	11	0,075	0,599	0,326	2,14	482	618
0,9	66	52,5	7	0,072	0,627	0,301	1,47	1700	1560

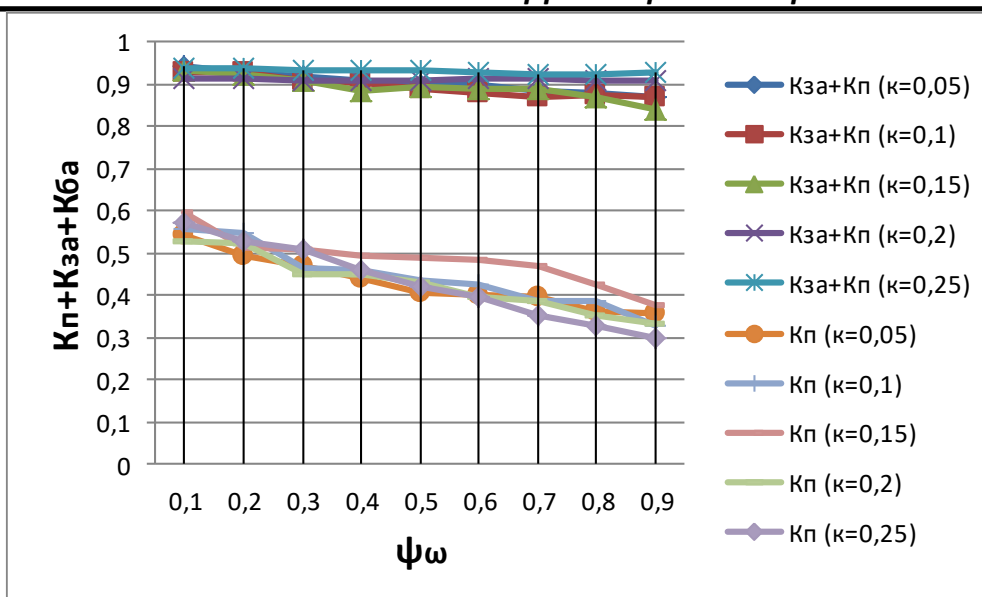


Рис. 7. Залежності масових часток  $K_{ба}$ ,  $K_{за}$  та  $K_n$  від  $\psi_\omega$  при  $\kappa=0,1-0,9$ .

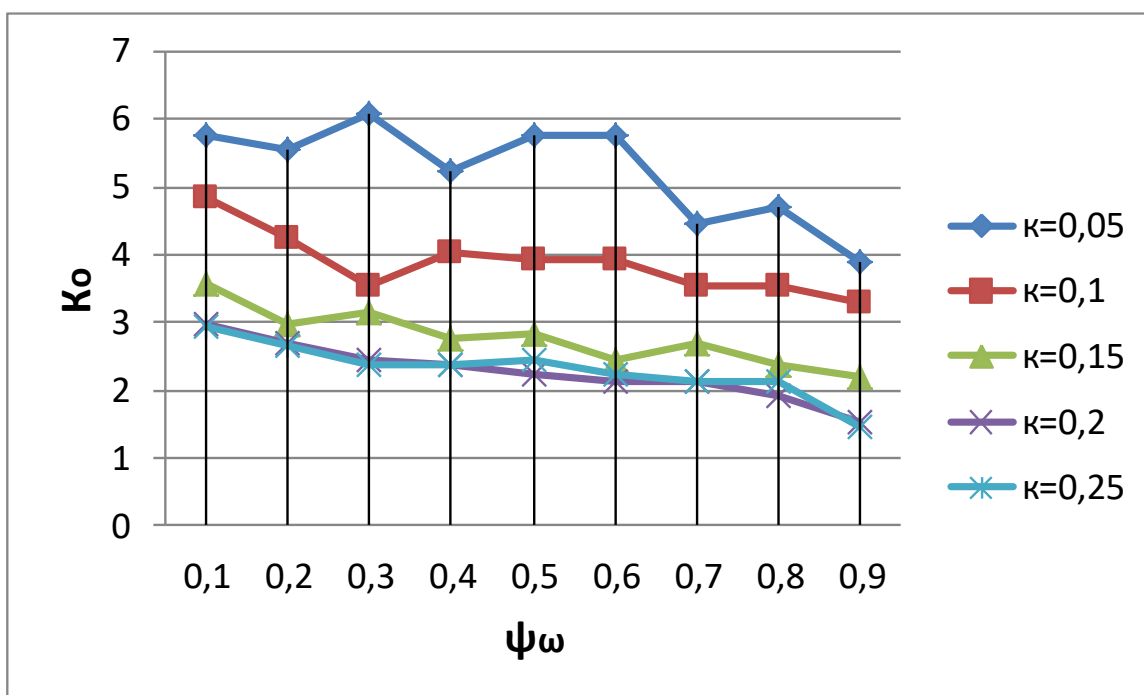


Рис. 8. Залежності оборотності  $K_o$  від  $\psi_\omega$  при  $\kappa=0,1-0,9$ .

Аналіз залежностей зміни масових часток зон руху завантаження на рис. 7 свідчить про деяке збільшення частки зони зсувного шару  $K_{за}$  зі зменшенням ступеня заповнення камери.

Із рис. 8 впливає, що оборотність руху завантаження  $K_o$  істотно підвищується зі зменшенням заповнення камери. Максимального значення оборотність набуває при малій швидкості обертання, чисельно пря-

муючи до 1 зі збільшенням швидкості.

Графік на рис. 9 свідчить про значне зростання псевдотемператури зсувного шару завантаження  $T$  зі зменшенням заповнення камери. Таке зростання псевдотемператури, зі збільшенням швидкості обертання, відбувається аж до переходу циркуляційного режиму руху в режим пристінкового шару при величині відносної швидкості  $\psi_\omega$ , значно більший за 1.

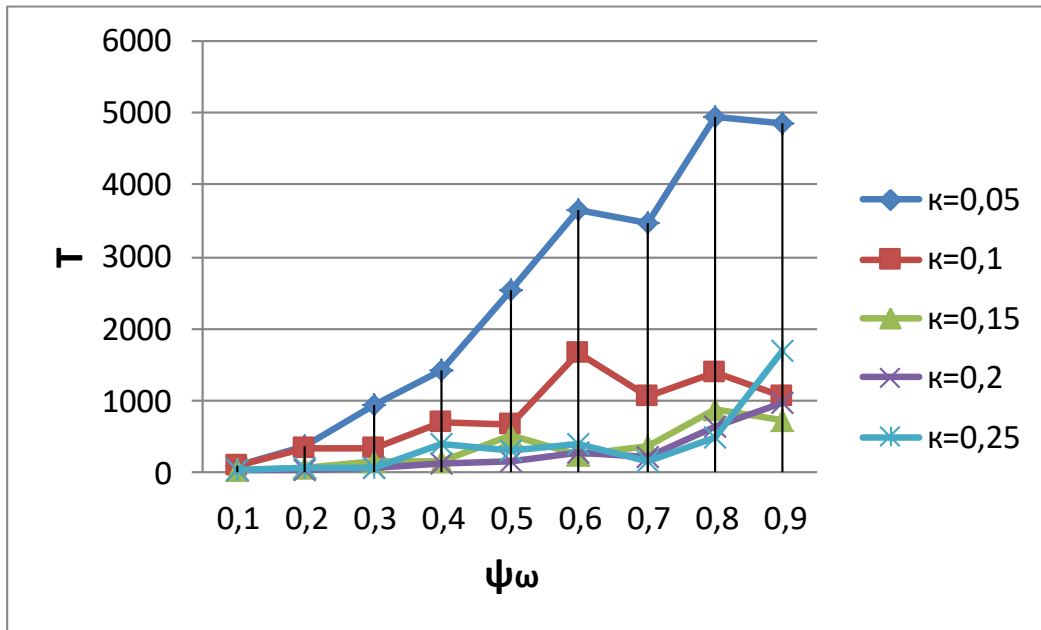


Рис. 9. Залежності псевдотемператури  $T$  від  $\psi_{\omega}$  при  $\kappa=0,1-0,9$ .

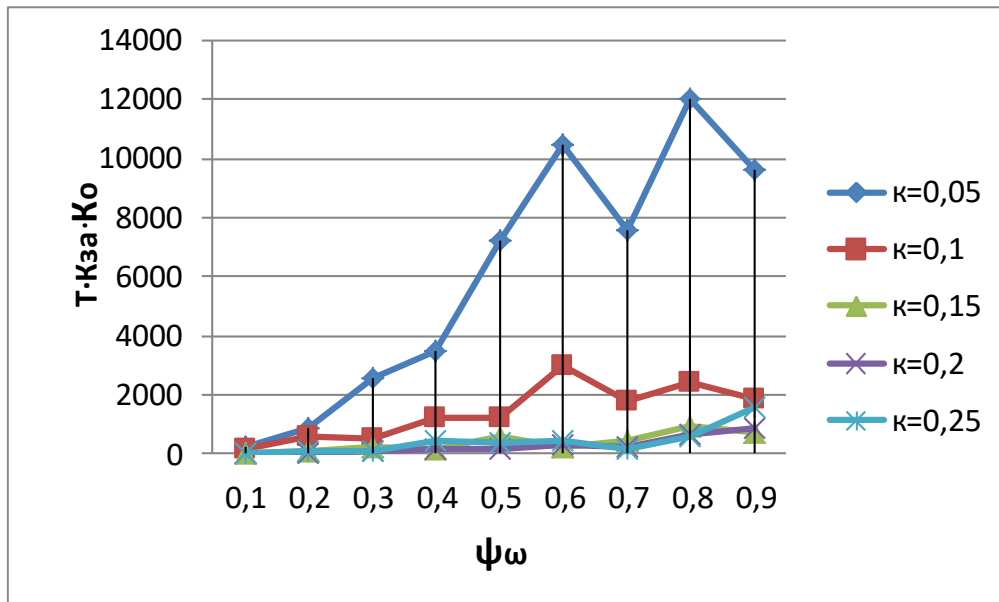


Рис. 10. Залежності комплексної характеристики  $T \cdot K_{за} \cdot K_{о}$  від  $\psi_{\omega}$  при  $\kappa=0,1-0,9$ .

Нарешті, аналіз узагальненого графіка на рис. 10 засвідчує інтенсивне зростання повної енергії зсувного шару завантаження  $TK_{за}K_{о}$  зі зменшенням заповнення камери.

**Висновки:** 1. Встановлено закономірності підвищення масової частки зсувного шару, оборотності руху та псевдотемператури зсувного шару зернистого завантаження зі зменшенням ступеня заповнення обертової камери.

259 2. Оборотність завантаження має найбільше значення при малій швидкості обер-

тання камери.

3. Виявилось, що повна енергія зсувного шару завантаження значно зростає зі зменшенням заповнення камери.

4. Для підвищення ефективності процесу обробки зсувною дією зернистого завантаження в машині барабанного типу доцільно знижувати ступінь заповнення камери, наприклад шляхом збільшення її радіуса при незмінному об'ємі порції оброблюваного матеріалу.



ЛІТЕРАТУРА:

1. Борщев В.Я. «Температура» зернистой среды и физические эффекты взаимодействия частиц при быстром сдвиговом течении зернистых материалов / В.Я. Борщев, В.Н. Долгунин // Изв. вузов. Химия и хим. технология. – 2007. – Т. 50, вып. 8. – С. 78-82.
2. Науменко Ю.В. Вплив розподілу зон та обертності руху зернистого завантаження на робочі процеси барабанних машин / Ю.В. Науменко, В.М. Ярмолюк // Вісн. НУВГП: Зб. наук. пр. – Рівне: НУВГП, 2015. – Вип. 2 (70). Техн. науки. – С. 133-142.
3. Науменко Ю.В. Вплив псевдотемператури зсувного шару зернистого завантаження на робочі процеси барабанних машин / Ю.В. Науменко, О.В. Манелюк // Вісн. НУВГП: Зб. наук. пр. – Рівне: НУВГП, 2015. – Вип. 2 (70). Техн. науки. – С. 51-59.
4. Исламов М.Ш. Печи химической промышленности / М.Ш. Исламов. – Л.: Химия, 1975. – 432 с.
5. Лыков М.В. Сушка в химической промышленности / М.В. Лыков. – М.: Химия, 1970. – 430 с.
6. ГОСТ 27120-86. Печи химических производств с вращающимися барабанами общего назначения. Основные параметры и размеры. – М.: Изд-во стандартов, 1992. – 17 с.
7. ГОСТ 11875-86. Аппараты теплообменные с вращающимися барабанами общего назначения. Холодильники. Основные параметры и размеры. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 8 с.
8. ГОСТ 27340-86. Аппараты сушильные с вращающимися барабанами. Основные параметры и размеры. – М.: Изд-во стандартов, 2000. – 2 с.
9. Науменко Ю.В. Теоретичні основи робочих процесів машин барабанного типу: Монографія / Ю.В. Науменко, К.Ю. Дейнека. – Рівне: НУВГП, 2014. – 531 с.

УДК 621.926.5:539.215:531.36

Дейнека К.Ю., Науменко Ю.В., Сич А.Л., Бабич Я.О.

*Національний університет водного господарства та природокористування (м. Рівне)*

**ВПЛИВ СТРУКТУРИ ВНУТРІШНЬОКАМЕРНОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ НА АВТОКОЛИВНІ ПРОЦЕСИ ПОДРІБНЕННЯ В БАРАБАННИХ МЛИНАХ**

**Процеси багатотоннажного** тонкого подрібнення в барабанних млинах характеризуються високою питомою енергоємністю та порівняно низькою енергетичною ефективністю. Тому доволі перспективним для практичного застосування видається удосконалення таких процесів на основі застосування динамічного ефекту самозбудження автоколивань внутрішньокамерного завантаження барабанного млина, що активізують циркуляцію молольних тіл. Зазначене може бути реалізовано на базі традиційних конструктивних рішень млинів із поверхнею камери без додаткових виступаючих елементів, що зазнають прискореного абразивного зношування з боку робочого середовища.

Нестійкі режими роботи барабанних млинів досліджувались низкою авторів. Було розроблено моделі вимушених коливань у приводі завантаженого барабана [1], фрикційних коливань при проковзуванні всього завантаження відносно поверхні камери [2], фрикційних коливань при проковзуванні

всього завантаження відносно поверхні камери та пружних коливаннях приводу [3], фрикційних коливань при проковзуванні центральної малорухливої частини відносно решти завантаження [4] та фрикційних коливань внутрішніх шарів завантаження [5]. Однак застосування таких спрощених моделей фрикційних крутильних коливань зумовлює розбіжність одержуваних розрахункових результатів із експериментальними даними, оскільки проковзування завантаження відносно поверхні камери практично не виникає.

Внаслідок складності режимів руху внутрішньомлинного завантаження, отримані останнім часом на основі аналітичних та чисельних моделей результати розрахунків режимів його руху [6-9] лише за якісними характеристиками та зовнішніми ознаками наближаються до реальних проявів автоколивань, а за кількісними показниками суттєво розбігаються з ними.