

## ТЕОРІЯ ТРИФАЗНОГО РЕЖИМУ РУХУ ЗЕРНИСТОГО ВНУТРІШНЬОКАМЕРНОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ МАШИНИ БАРАБАННОГО ТИПУ

*Розроблено модель реального трифазного режиму руху зернистого завантаження камери обертового барабана. Застосовано аналітико-експериментальний метод досліджень. Візуалізація отриманих картин руху засвідчує хорошу збіжність результатів розрахунку із експериментальними даними.*

**Ключові слова:** машина барабанного типу, трифазний режим руху, внутрішньокамерне завантаження, зсувний шар, поверхня ковзання, профіль швидкості, картина руху, візуалізація, моделювання

**Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями.** Машини барабанного типу завдяки простоті конструкції й експлуатації, надійності роботи, універсальності та можливості реалізації великої одиничної продуктивності знаходять широке застосування в промисловості будівельних матеріалів, хімічній, металургійній, гірничо-збагачувальній та інших галузях виробництва. Парадоксальною особливістю таких систем є поєднання граничної простоти конструкції й у край складної для описування поведінки оброблюваного середовища.

**Аналіз останніх публікацій, у яких започатковане розв'язання цієї проблеми і на які спирається автор, виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.** Теорію робочих процесів барабанних машин, що оброблюють зернисті матеріали, для випадку барабанних млинів як найпоширенішого різновиду таких машин започатковано на початку минулого століття [1]. Надалі цю гіпотезу було покладено в основу практично всіх існуючих методів розрахунку більшості барабанних машин [2 – 6].

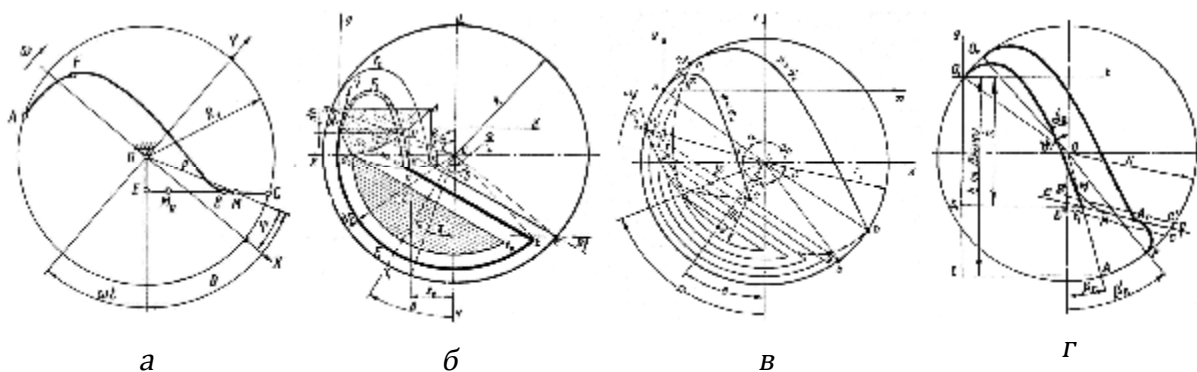
Традиційна теорія базується на концепції ізольованого від навколишнього середовища окремого елемента завантаження камери, який рухається під дією лише масових сил тяжіння і відцентрової інерції та реакції обмежуючої поверхні. Взаємодія елементів між собою, зокрема внутрішнє тертя, не враховується. Вважається, що елементи завантаження захоплюються обертовим барабаном до моменту, коли сили тяжіння перевищують відцентрові сили, після чого ці елементи рухаються за параболою. Передбачається, що режим руху завантаження є двофазним «водоспадним», із твердотільною зоною і зоною підкидання та падіння в

поперечному перерізі камери, а вплив на оброблюване середовище здійснюється лише ударною дією при переході елементів завантаження з параболічних на колові траєкторії. Завдяки граничній спрощеності така модель дозволяє виконати й усебічну формалізацію параметрів руху ідеалізованого завантаження при розрахунку, зокрема, траєкторій руху елементів із характерними точками на них, поверхонь переходу траєкторій, швидкостей елементів, оборотності циркуляції завантаження, моменту опору та потужності приводу завантаженого барабана.

Однак експериментальні дослідження виявили істотну розбіжність практичного застосування традиційної гіпотези з реальним режимом руху. Одержані результати свідчать про її непридатність для низьких швидкостей обертання. Порівняно з розрахунком має місце зменшення висоти падіння та дальності польоту елементів, непараболічність їх траєкторій і розсіювання гравітаційного потоку. Висота ж падіння при відносній швидкості обертання  $u_{\omega}=0,75$  не є максимальною. Крім того, пристінковий шар завантаження ще не починає утворюватися на поверхні камери при критичній швидкості обертання.

Виявилось, що реальним режимом руху завантаження при роботі барабанних машин є трифазний. При цьому виникає третя зсувна зона руху, яка доповнює твердотільну та зону підкидання з падінням традиційного двофазного режиму. Вплив на оброблюване середовище здійснюється переважно стиранням та роздавлюванням у зсувному шарі.

Модель реального трифазного режиму враховує виникнення третьої зсувної зони руху завантаження, де і відбуваються основні процеси обробки зернистого середовища. Такий режим був предметом досліджень низки авторів [7 – 10]. Було здійснено спроби створення теорії змішаного режиму руху. Однак отримані результати (рис. 1) не дозволили розробити достатньо універсальні методики прогнозування параметрів руху завантаження.



**Рис. 1. Схеми моделей картин руху завантаження при змішаному режимі:**  
**а – за П. В. Маляровим; б – за М. М. Юдахиним;**  
**в – за Є. Ф. Морозовим; г – за В. М. Матісгою**

**Формулювання цілей статті (постановка завдання).** За мету роботи було поставлено побудову моделі реального трифазного режиму руху зернистого завантаження камери барабанної машини.

**Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів.** За основу було прийнято уточнену трифазну схему усталеного руху завантаження в поперечному перерізі стаціонарно обертової камери, що містить твердотільну зону руху без відносного пересування елементів завантаження та проковзування по поверхні камери I, зону невідного падіння II і зону зсувного шару III (рис. 2). Завантажений барабан обертається з кутовою швидкістю  $\omega$  під дією моментів рушійних  $M_p$  та сил опору  $M_o$ .

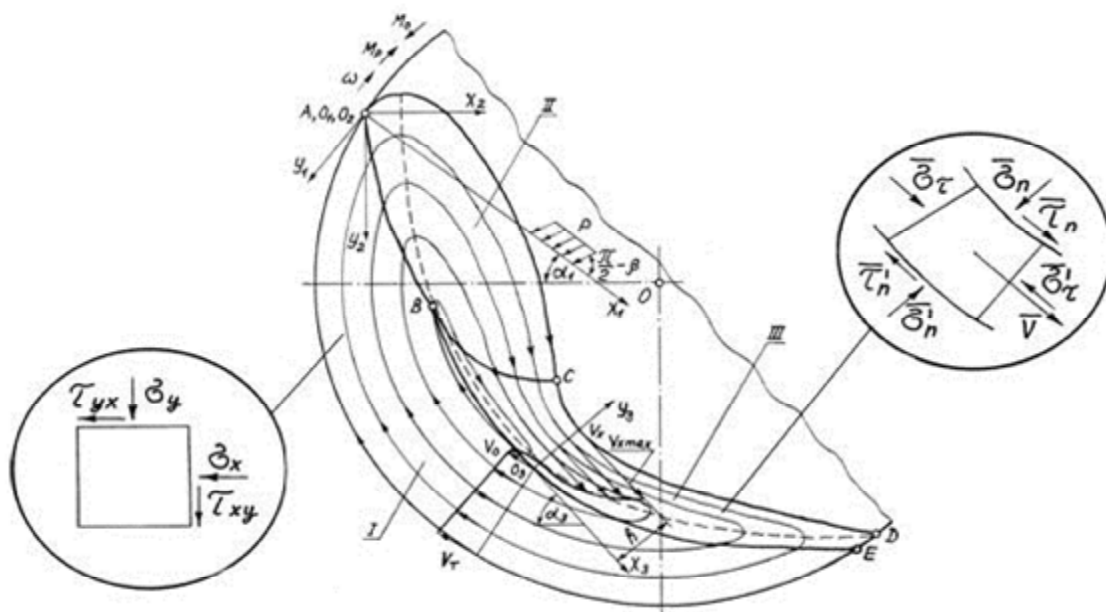


Рис. 2. Розрахункова схема руху завантаження у поперечному перерізі обертової камери

Вплив на оброблюване середовище переважно ударною дією здійснюється на межі ВС переходу між другою та третьою зонами. Основний робочий процес подрібнення переважно стиранням відбувається у верхній частині третьої зони при швидкій течії зі значним зсувним градієнтом. Вплив переважно роздавлюванням виникає у нижній частині третьої зони при сповільненні потоку.

Було застосовано гіпотезу суцільності внутрішньокамерного завантаження. Стан середовища описано осередненими по об'єму характеристиками. Реологічні властивості зернистого завантаження камери обертового барабана було формалізовано пластичною моделлю. Усталений двовимірний рух середовища описано системою рівнянь, до якої входять рівняння руху середовища (1) та (2), умова граничної рівноваги (3), умова

суцільності нестисливого середовища (4) й умова збігання напрямку максимальної швидкості деформації зсування з однією із сімей ліній ковзання (активною сім'єю) (5):

$$F_x - \frac{g}{g} \frac{\partial s_x}{\partial x} + \frac{\partial t_{xy}}{\partial y} \frac{\ddot{\phi}}{\phi} = \frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y}, \quad (1)$$

$$F_y - \frac{g}{g} \frac{\partial s_y}{\partial y} + \frac{\partial t_{yx}}{\partial x} \frac{\ddot{\phi}}{\phi} = \frac{\partial V_y}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y}, \quad (2)$$

$$(s_x - s_y)^2 + 4t_{xy}^2 = (s_x + s_y + 2k \times ctg j)^2 \sin^2 j, \quad (3)$$

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0, \quad (4)$$

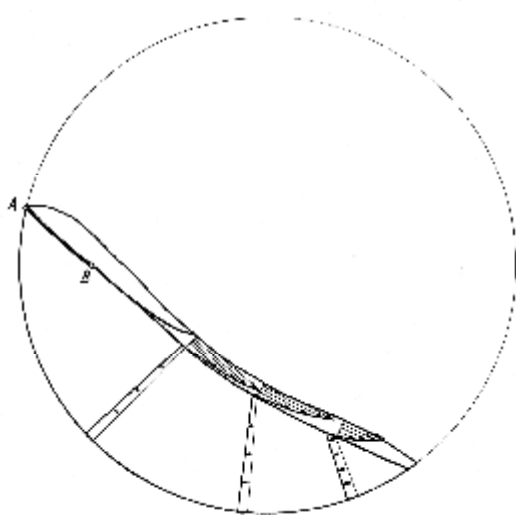
$$\frac{2t_{xy}}{s_x - s_y} = \frac{\frac{1}{2} \frac{\partial V_y}{\partial V_x} - \frac{V_x}{V_y} \frac{\ddot{\phi}}{\phi} \pm tgj}{1 \pm \frac{1}{2} \frac{\partial V_y}{\partial V_x} - \frac{V_x}{V_y} \frac{\ddot{\phi}}{\phi} tgj}, \quad (5)$$

де  $x, y$  – координати;  $F_x, F_y$  – проекції масових сил;  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}=\tau_{yx}$  – компоненти тензора напружень;  $V_x, V_y$  – проекції вектора швидкостей;  $\phi$  – кут внутрішнього тертя;  $k$  – коефіцієнт зчеплення;  $\gamma$  – об'ємна вага середовища;  $t$  – час;  $g$  – гравітаційне прискорення.

На основі моделювання напружено-деформованого стану завантаження було розв'язано задачі з визначення поверхні переходу між першою та другою зонами й руху зсувного шару [11].

Для чисельного визначення картин руху було застосовано аналітико-експериментальний метод. Він полягав у моделюванні поверхні зсування та зсувного шару на основі аналітичних залежностей з урахуванням експериментальних даних. Задавалися вихідні дані: радіус  $R$  (діаметр  $D$ ) камери, розмір елемента завантаження  $d$ , ступінь заповнення камери завантаженням  $\kappa, \omega, \gamma$  та  $\phi$ . За допомогою отриманої картини руху вимірювався кут підйому завантаження  $\alpha_n$ , що задає положення точки А. Розраховувалося положення поверхні зсування АВ. Вимірювалася максимальна висота падіння у другій зоні та встановлювалося положення точки С. Вимірювалося положення центра циркуляції завантаження. Установлювалося положення точки Е та поверхонь ВС та ВЕ. Вибиралося положення перерізу зсувного шару з основою в точці  $O_3$ . Вимірювалася радіальна координата основи, висота та кут нахилу  $\alpha_3$  перерізу.

На рис. 3 – 7 наведено отримані розрахункові картини руху завантаження з поверхнями переходу зон АВ та епіюрами швидкостей у декількох перерізах зсувного шару і твердотільної зони та фотографії картин руху для п'яти випадків роботи барабаних машин.

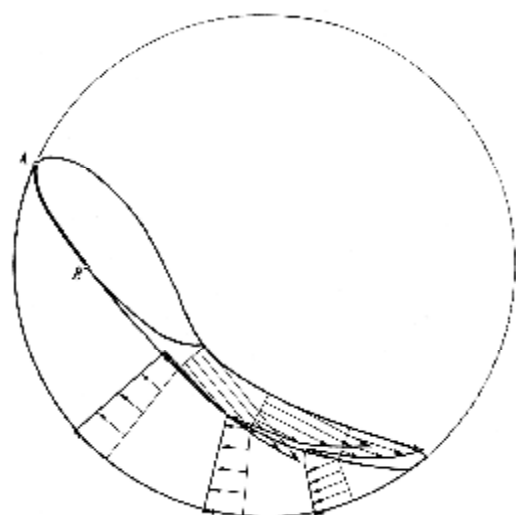


а



б

Рис. 3. Розрахункова (а) та експериментальна (б) картини руху завантаження при  $\psi_\omega=0,1$ ,  $\kappa=0,25$ ,  $d/D=0,0024$  у гладкій камері



а

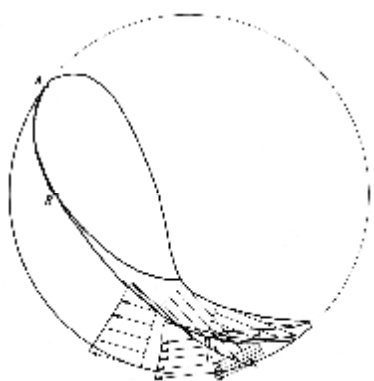


б

Рис. 4. Розрахункова (а) та експериментальна (б) картини руху завантаження при  $\psi_\omega=0,4$ ,  $\kappa=0,3$ ,  $d/D=0,01$  у гладкій камері

Картини розташовано за зростанням відносної швидкості обертання  $\psi_\omega$  та ступеня заповнення  $\kappa$ . Було прийнято  $\varphi=33^\circ$ . Значення ординат епюр швидкості зсувного шару оцінювалося за величиною лінійної швидкості поверхні камери. Масштаб швидкості для всіх картин руху однаковий.

Порівняння картин засвідчує близькість положення вільної поверхні та меж зон руху завантаження.

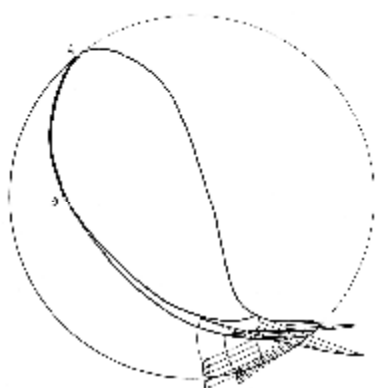


а

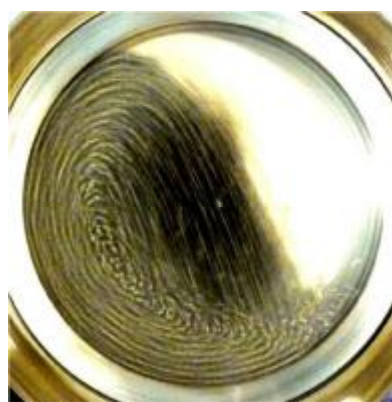


б

Рис. 5. Розрахункова (а) та експериментальна (б) картини руху завантаження при  $\psi_{\omega}=0,75$ ,  $\kappa=0,35$ ,  $d/D=0,026$  у гладкій камері

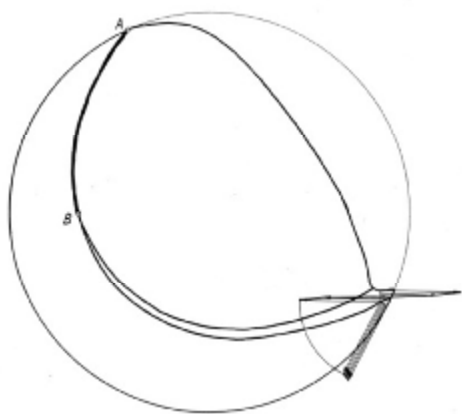


а



б

Рис. 6. Розрахункова (а) та експериментальна (б) картини руху завантаження при  $\psi_{\omega}=0,9$ ,  $\kappa=0,4$ ,  $d/D=0,022$  у хвильовій камері



а



б

Рис. 7. Розрахункова (а) та експериментальна (б) картини руху завантаження при  $\psi_{\omega}=1,05$ ,  $\kappa=0,45$ ,  $d/D=0,0024$  у гладкій камері

На рис. 8 зображено положення поверхні зсування завантаження, отримані за допомогою розрахунку та експерименту для попередніх п'яти картин руху. Розбіжність результатів не перевищує 13%. На рис. 9 наведено розрахункові й експериментальні профілі швидкості зсувного шару для попередніх п'яти картин руху. Розбіжність між ними не перевищує 11%.

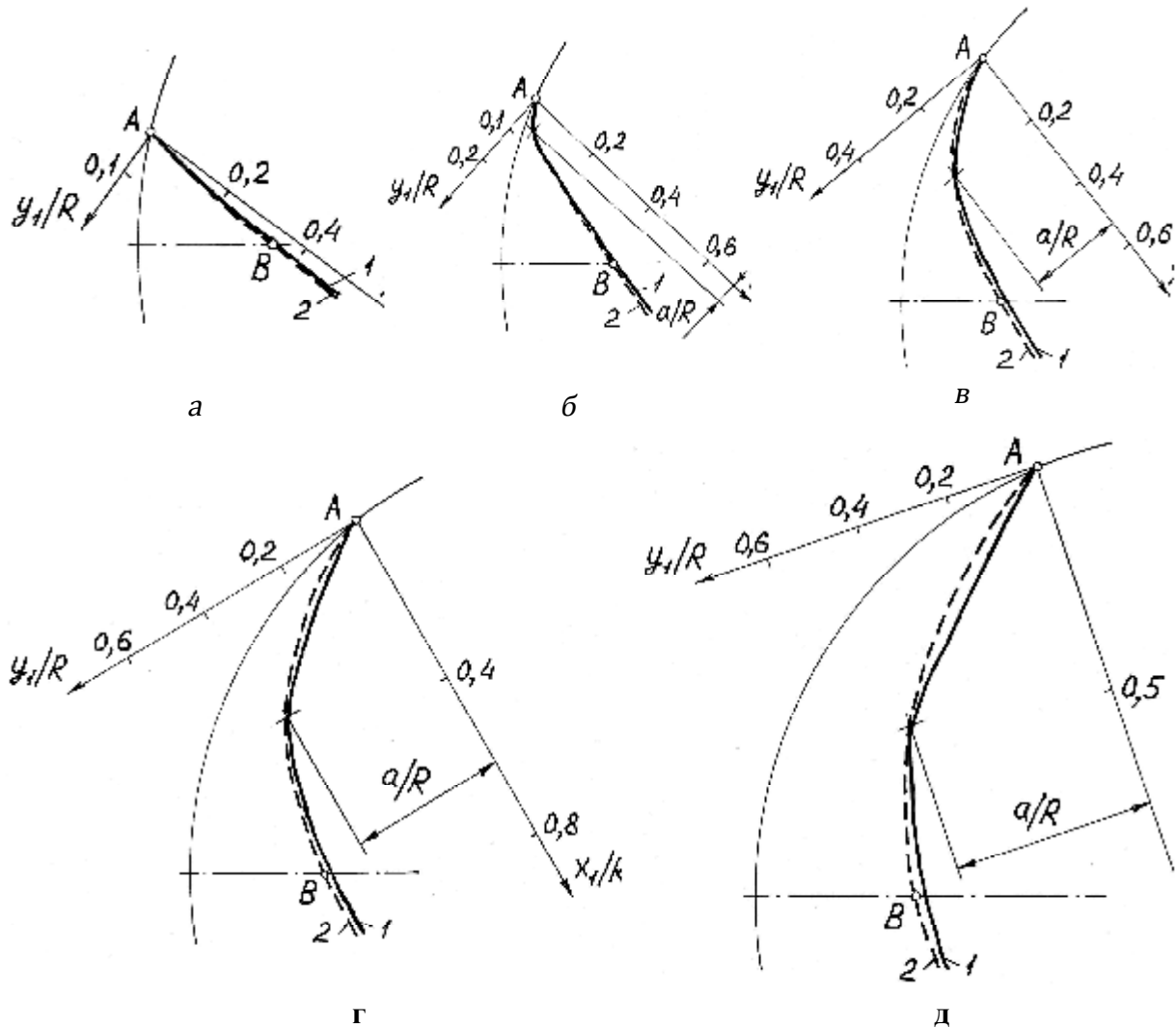


Рис. 8. Положення поверхні зсування завантаження:  
 1 – розрахунок; 2 – експеримент:  
 при  $\psi_\omega=0,1$ ,  $\kappa=0,25$ ,  $d/D=0,0024$  і гладкій камері (а);  
 при  $\psi_\omega=0,4$ ,  $\kappa=0,3$ ,  $d/D=0,01$  і гладкій камері (б);  
 при  $\psi_\omega=0,75$ ,  $\kappa=0,35$ ,  $d/D=0,026$  і гладкій камері (в);  
 при  $\psi_\omega=0,9$ ,  $\kappa=0,4$ ,  $d/D=0,022$  і хвильовій камері (г);  
 при  $\psi_\omega=1,05$ ,  $\kappa=0,45$ ,  $d/D=0,0024$  і гладкій камері (д)

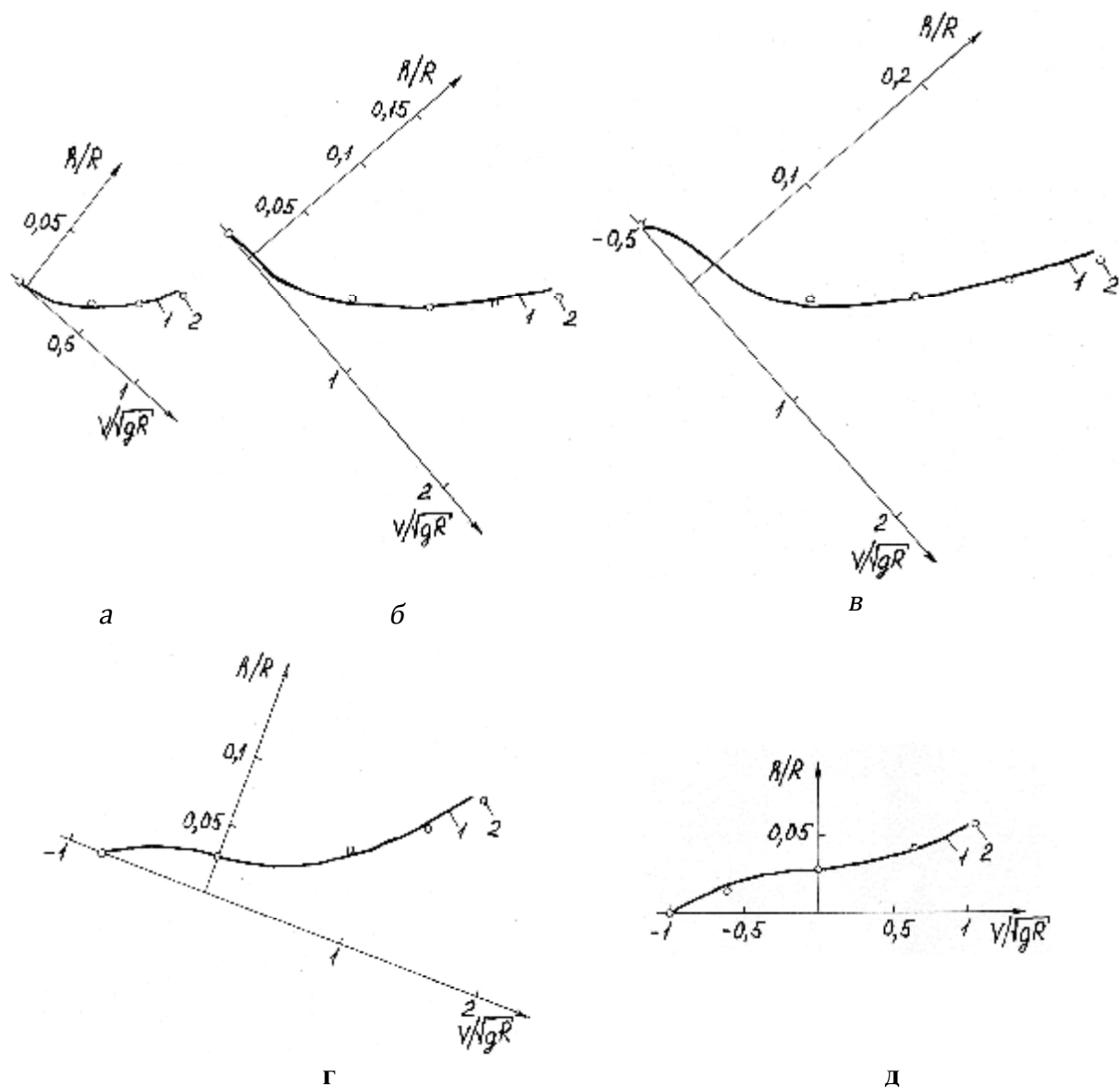


Рис. 9. Профіль швидкості зсувного шару завантаження:

1 – розрахунок; 2 – експеримент;

при  $\psi_{\omega}=0,1$ ,  $\kappa=0,25$ ,  $d/D=0,0024$  і гладкій камері (а);

при  $\psi_{\omega}=0,4$ ,  $\kappa=0,3$ ,  $d/D=0,01$  і гладкій камері (б);

при  $\psi_{\omega}=0,75$ ,  $\kappa=0,35$ ,  $d/D=0,026$  і гладкій камері (в);

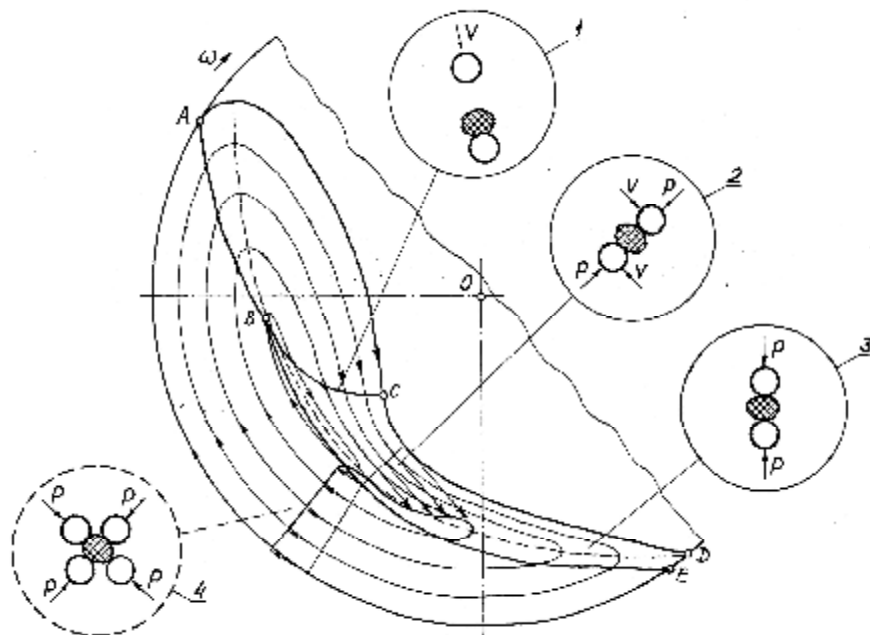
при  $\psi_{\omega}=0,9$ ,  $\kappa=0,4$ ,  $d/D=0,022$  і хвильовій камері (г);

при  $\psi_{\omega}=1,05$ ,  $\kappa=0,45$ ,  $d/D=0,0024$  і гладкій камері (д)

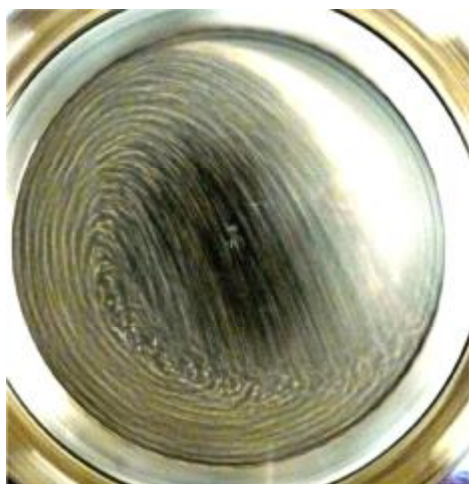
Аналіз отриманих картин руху завантаження дозволив уточнити реалізацію робочих процесів барабаних машин із зернистим оброблюваним середовищем. Зокрема, для барабаних млинів процес ударної дії (рис. 10) реалізується на межі ВС переходу між другою та третьою зонами завантаження. Основний процес стираючої дії реалізується у верхній частині третьої зони при швидкій течії зі значним зсувним



градієнтом, а процес роздавлюючої дії виникає у нижній частині цієї зони при сповільненні потоку.



*Рис. 10. Реалізація способів подрібнення в барабанних млинах: 1 – подрібнення ударною дією; 2 – подрібнення стиранням; 3 – подрібнення роздавлюванням; 4 – подрібнення частковим різноспрямованим роздавлюванням*



*Рис. 11. Картини руху завантаження при зовнішньокамерному двостадійному подрібненні в барабанних млинах: а – попередній грубий помел; б – остаточний тонкий помел*

На основі отриманих результатів було встановлено діапазони параметрів реалізації раціональних режимів зовнішньокамерного багастадійного помелу на основі концепції енергетичної селективності дезінтеграції [12]: для першого етапу попереднього грубого подрібнення

переважно ударною дією –  $\psi_{\omega}=0,85-1,05$ ,  $\kappa=0,45$ ,  $d/D=0,015-0,04$  (рис. 11, а), для останнього етапу остаточного тонкого подрібнення стиранням та роздавлюванням –  $\psi_{\omega}=0,25-0,45$ ,  $\kappa=0,25$ ,  $d/D=0,002-0,01$  (рис. 11, б).

**Висновки із цього дослідження і перспективи подальших розвідок у цьому напрямі.** Побудовано модель, що дозволяє описати реальний трифазний режим руху завантаження, істотно уточнити характер реалізації способів впливу на оброблюване середовище в робочій зоні, а також встановити раціональні параметри процесу багатостадійного подрібнення в барабанних млинах. Видається доволі перспективним надалі дослідити вплив параметрів трифазного режиму руху зернистого завантаження на робочі процеси інших машин барабанного типу з метою їх удосконалення.

#### Література

1. Дэвис Э.В. Тонкое дробление в шаровых мельницах / Э.В. Дэвис / Пер. с англ. // *Технология и практика измельчения*. – М., Л., Новосибирск: ГНТГИ, 1932. – С. 194 – 234.
2. Олевский В.А. Размольное оборудование обогатительных фабрик / В.А. Олевский. – М.: Госгортехиздат, 1963. – 448 с.
3. Андреев С.Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых / С.Е. Андреев, В.А. Перов, В.В. Зверевич. – М.: Недра, 1980. – 415 с.
4. Крюков Д.К. Усовершенствование размольного оборудования горнообогатительных предприятий / Д.К. Крюков. – М.: Недра, 1966. – 174 с.
5. Сиденко П.М. Измельчение в химической промышленности / П.М. Сиденко. – М.: Химия, 1977. – 368 с.
6. *Справочник по обогащению руд. Подготовительные процессы* / Под ред. О.С. Богданова, В.А. Олевского. – М.: Недра, 1982. – 366 с.
7. Маляров П.В. О движении внешнего слоя шаров при смешанном режиме работы барабанных мельниц / П.В. Маляров, В.Ф. Степурин // *Обогащение руд*. – 1979. – № 2(142). – С. 29 – 32.
8. Юдахин Н.Н. Распределение массы загрузки в трубной мельнице при смешанном режиме / Н.Н. Юдахин // *Тр. ВНИИЦеммаш*. – 1979. – Вып. 22. – С. 61 – 67.
9. Морозов Е.Ф. О механике дробящих тел барабанной мельницы при смешанном скоростном режиме / Е.Ф. Морозов // *Физико-техн. проблемы разработки полез. ископаемых*. – 1981. – № 6. – С. 73 – 80.
10. Матієга В. Механіка руху тіл, що мелють, у млинах з активаційними бронефутераціями / В. Матієга // *Вісн. ТДТУ: наук. журн.* – Тернопіль: ТДТУ, 1999. – Т. 4, № 2. – С. 23 – 29.
11. Науменко Ю. В. *Основи теорії режимів роботи барабанних млинів : монографія* / Ю.В. Науменко. – Рівне : Видавництво СПД Зелент О.І., 2009. – 282 с.

12. Рекомендації до розрахунку, проектування та експлуатації барабанних млинів багатостадійного подрібнення / Ю.В. Науменко. – Рівне: НУВГП, 2008. – 74 с.

Надійшла до редакції 20.11.2014

© Ю. В. Науменко

**УДК 621.926.5:539.215**

*Ю. В. Науменко, д.т.н., доц.  
Национальный университет водного хозяйства и природопользования (г. Ровно)*

### **ТЕОРИЯ ТРЕХФАЗНОГО РЕЖИМА ДВИЖЕНИЯ ЗЕРНИСТОЙ ВНУТРИКАМЕРНОЙ ЗАГРУЗКИ МАШИНЫ БАРАБАННОГО ТИПА**

*Разработана модель реального трехфазного режима движения зернистой внутрикамерной загрузки вращающегося барабана. Применен аналитико-экспериментальный метод исследований. Визуализация полученных картин движения свидетельствует о хорошей сходимости результатов расчета с экспериментальными данными.*

*Ключевые слова: машина барабанного типа, трехфазный режим движения, внутрикамерная загрузка, сдвиговый слой, поверхность скольжения, профиль скорости, картина движения, визуализация, моделирование*

**UDC 621.926.5:539.215**

*Yu. V. Naumenko, Sc.D.  
The National University of Water Management and Nature Resources Use (Rivne)*

### **THE THEORY OF THE DRUM MACHINE INTRACHAMBER GRANULAR FILLING THREE-PHASE FLOW**

*The model of the actual rotating drum intrachamber granular filling three-phase flow is worked out. The analytical-experimental investigative techniques were used. The obtained flow patterns visualization corroborates a close relationship between the data were calculated and the experimental data.*

*Keywords: drum machine, three-phase flow, intrachamber filling, shifting layer, sliding*