

Ю.В. НАУМЕНКО, д-р техн. наук, проф., НУВГП, Рівне

ЕКСТРЕМАЛЬНІ ШВИДКІСНІ ДИНАМІЧНІ СТАНИ ВНУТРІШНЬОКАМЕРНОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ БАРАБАННОГО МЛИНА

Зареєстровано ефект виникнення подвійного максимуму безрозмірних комплексних критеріїв сдвигового шару внутрішньо камерної завантаження барабанної млини. Показано, що виникнення тихохідного локального максимуму критеріїв обумовлено лавиноподібним руйнуванням контактів між частинками і зрідженому зернистої середовища. Запропоновано використовувати такий режим роботи для підвищення енергетичної ефективності тонкого подрібнення

Барабанні млини мають низьку енергетичну ефективність. Згідно гіпотези двофазного режиму руху внутрішньомлинного завантаження оптимальною щодо продуктивності вважається відносна швидкість обертання $\psi_{\omega} = 0,75$.

Натомість реальним режимом руху завантаження є трифазний [1, 2] при виникненні зсувного шару, де переважно здійснюється тонке подрібнення.

Селективність помелу полягає у здійсненні грубого подрібнення при підвищеній швидкості обертання та тонкого – при зниженій [3, 4].

У [5] описано явище отримання максимальної питомої ефективності подрібнення при зниженій швидкості обертання $\psi_{\omega} = 0,5$, а у [6, 7] – при зменшенні її до $\psi_{\omega} = 0,58$. Однак рекомендації щодо вибору швидкості є неоднозначними.

Метою роботи є визначення раціональних режимів руху завантаження для підвищення енергетичної ефективності багатостадійного помелу.

Процес подрібнення в барабанних млинах носить яскраво виражений випадковий характер. Описати його можна лише за допомогою узагальнених динамічних параметрів, що визначаються поведінкою завантаження.

Рух зсувного шару завантаження характеризується такими безрозмірними питомими динамічними критеріями.

Форсування зсувної швидкості K_{ϕ_3} – відношення середнього значення швидкості у вибраному перерізі шару до швидкості циліндричної поверхні камери при критичній швидкості обертання.

Гradient зсувної швидкості K_2 – відношення швидкості зсування у перерізі до критичної швидкості.

© Ю.В. Науменко, 2012

Питома енергія поступального руху шару E_3 – відношення квадрата середньої швидкості у перерізі до квадрата лінійної швидкості камери при критичній швидкості.

Температура середовища шару T – відношення квадрату швидкості зсування у перерізі до квадрата критичної швидкості. Це питома кінетична енергія, що відповідає випадковому хаотичному руху елементів. Динамічність активації K_∂ – відношення уявного сумарного вертикального прискорення, обумовленого зростанням кінетичної енергії при невеликому падінні, у перерізі до гравітаційного прискорення.

Розрахунок параметрів полягав у візуальному аналізі зареєстрованих картин руху завантаження (рис. 1). Задавались: радіус камери R , кутова швидкість ω та кут внутрішнього тертя завантаження φ . Вибиралось положення перерізу шару з основою в точці O_3 . Вимірювались радіальна координата основи R_3 , висота h_3 та кут нахилу α_3 перерізу. Обчислювались значення середньої зсувної швидкості перерізу V_{3c} , швидкість опорної поверхні в перерізі V_{30} та максимальна зсувна швидкість на його вільній поверхні V_{3max} за виразами:

$$V_{3c} = \omega(R^2 - R_3^2)/(2h_3), \quad (1)$$

$$V_{30} = \omega R_3, \quad (2)$$

$$V_{3max} = \sqrt{2Wh_3 \sin \alpha_3 \cos \varphi / (1 - \sin \varphi) - V_{30}^2}, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{де} \quad W &= \sqrt[3]{-L/2 + \sqrt{f}} + \sqrt[3]{-L/2 - \sqrt{f}} - q/3, & c &= (1 - \sin \varphi)/(3h_3 \sin \alpha_3 \cos \varphi), \\ f &= \left(-q^2/9 + m/3\right)^3 + (L/2)^2, & m &= \left(2V_{3c}|V_{30}^3|/c + 3dV_{30}^4\right)/d^3, \\ q &= -\left(V_{3c}^2/c^2 + 3d^2V_{30}^2\right)/d^3, & L &= 2(q/3)^3 - qm/3 - 2V_{30}^6/d^3, \\ d &= 2h_3 \sin \alpha_3 \cos \varphi / (1 - \sin \varphi). \end{aligned}$$

Обчислювались параметри за виразами:

$$K_{\phi_3} = V_{3c} / \sqrt{Rg}, \quad (4)$$

$$E_3 = K_{\phi_3}^2, \quad (5)$$

$$K_2 = (V_{\text{зmax}} + |V_{30}|) \sqrt{R/g} / h_3, \quad (6)$$

$$T = K_2^2, \quad (7)$$

$$K_0 = W/g. \quad (8)$$

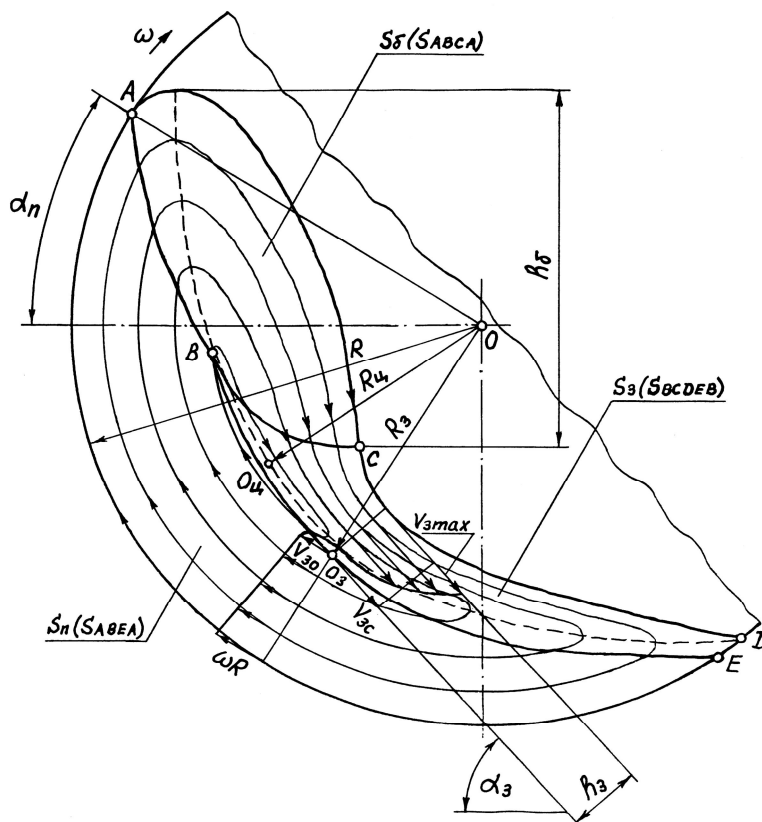


Рис. 1 – Розрахункова схема визначення критеріїв ефективності подрібнення за допомогою візуалізації картини руху завантаження

На основі аналізу масиву отриманих усереднених картини руху було розраховано залежності параметрів від швидкості обертання для окремих ступенів заповнення камери k .

На рис. 2 наведено одержані залежності за умови дрібного молоткового завантаження, із розміром елементів d у камері діаметром D – $d/D < 0,005 - 0,01$, та гладкої поверхні камери. Графіки ілюструють зареєстрований ефект виникнення подвійного максимуму значень параметрів $K_{\phi 3}$, E_3 , K_2 , T та K_0 при різних швидкостях.

Тихохідний локальний максимум реалізується при $\psi_{\omega} = 0,15 - 0,45$, швидкохідний абсолютний максимум – при $\psi_{\omega} = 0,85 - 1,03$, а середньоходовий мінімум – при $\psi_{\omega} = 0,51 - 0,63$.

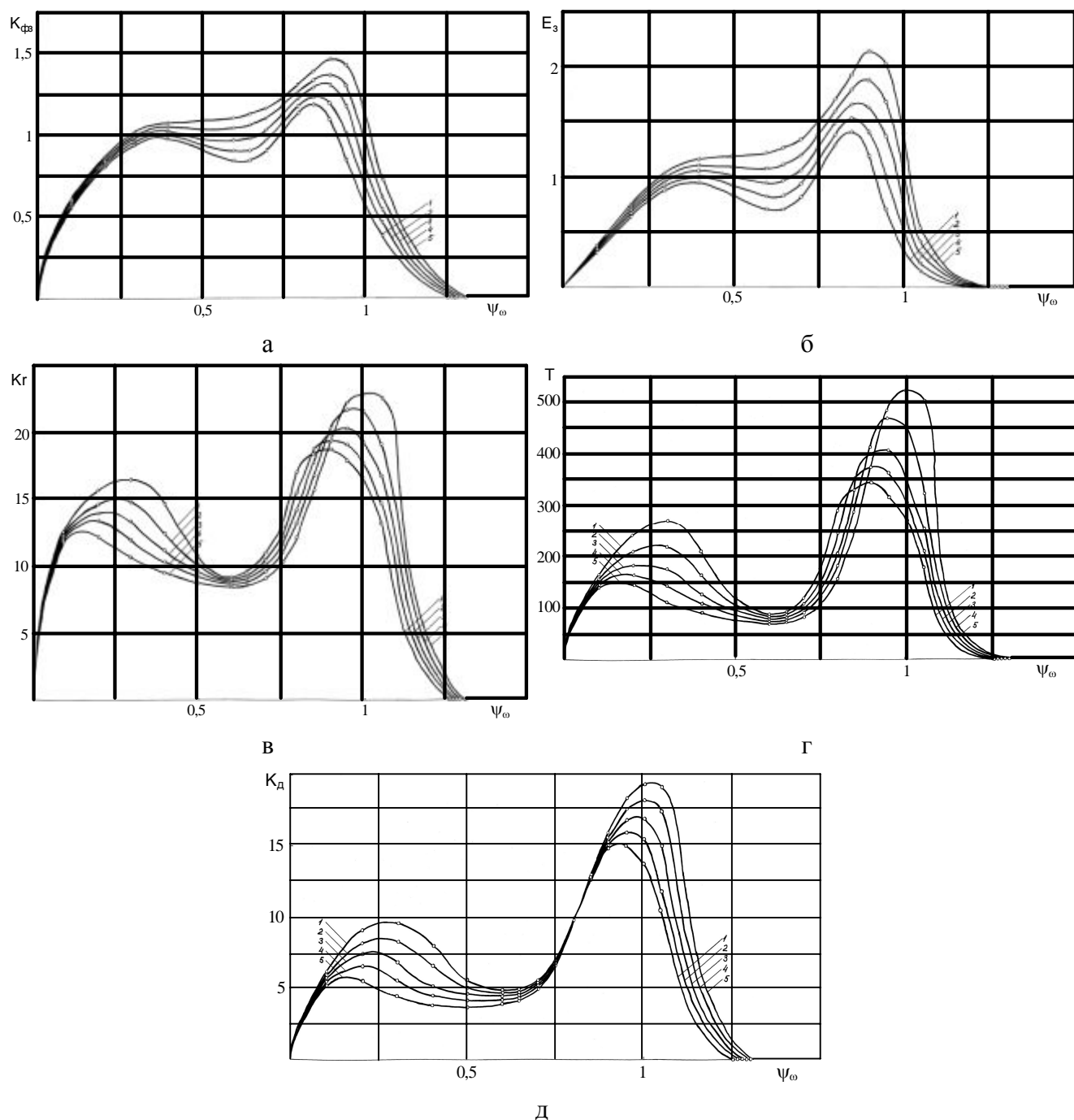


Рис. 2 – Залежності $K_{\phi з}$ (а), $E_з$ (б), $K_г$ (в), T (г), та $K_д$ (д) від ψ_ω при $d/D=0,0024$ та гладкій камері: 1 – $\kappa = 0,25$; 2 – $\kappa = 0,3$; 3 – $\kappa = 0,35$; 4 – $\kappa = 0,4$; 5 – $\kappa = 0,45$.

Виникнення тихохідного максимуму спричинено ефектом аномального зниження псевдов'язкості завантаження [8, 9]. Таке явище кваліфікується як надтекучість зернистого матеріалу. При цьому невелика висота зсувного шару зумовлює підвищені значення динамічних параметрів. Крім того, незначна за масою зона невірного падіння не здатна суттєво завадити розвитку та прискоренню зсувного потоку. Натомість виникнення середньоходового мінімуму параметрів спричинено значним збільшенням висоти зсувного шару

та зростанням маси зони невідного падіння, що здійснює гальмівний вплив на потік. Зі зростанням швидкості обертання зменшується товщина шару, підвищується висота падіння в зоні невідного падіння та кінетична енергія потоку, що компенсує гальмівний вплив цієї зони і сприяє прискоренню зсувного потоку та виникненню швидкохідного абсолютного максимуму параметрів, який спадає до нуля із утворенням пристінкового шару завантаження.

На рис. 3 зображено графіки залежностей опору середовища завантаження σ_{on} та його компонентів σ_{on1} та σ_{on2} від основної складової швидкості руху шару V_x . Перша складова характеризує сили тертя спокою, що виникають у момент початку руху середовища. Внаслідок реалізації ефекту дискретності зернистого матеріалу, такі сили опору різко зростають до максимального значення в момент початку руху і різко спадають, прямуючи до нуля, зі зростанням швидкості. Друга складова характеризує сили тертя ковзання при русі середовища, що описуються кулонівським законом сухого тертя.

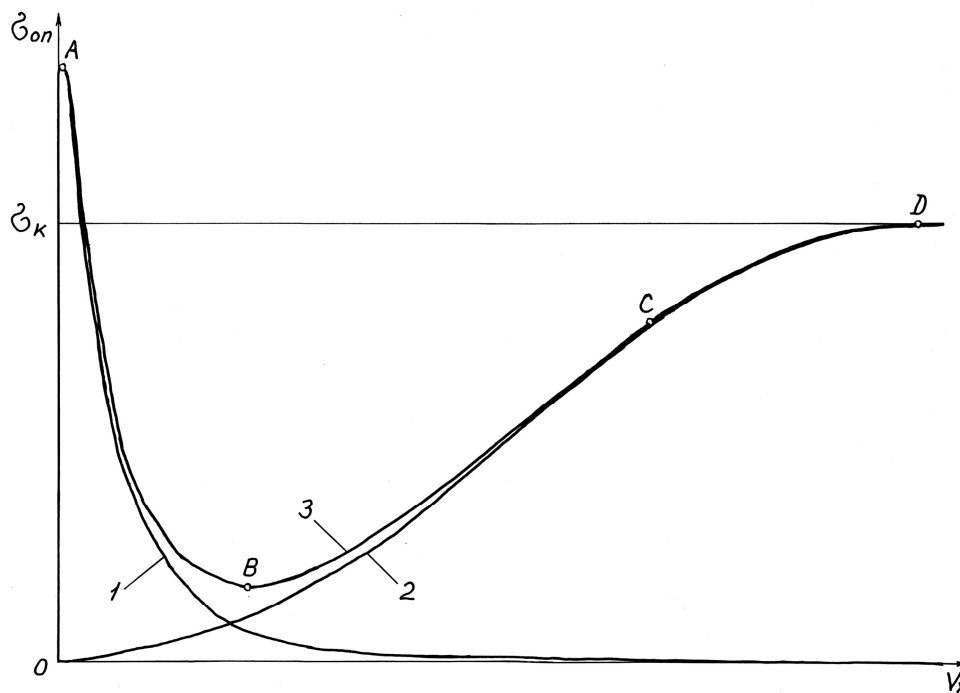


Рис. 3 – Графік залежності опору середовища від швидкості шару вздовж осі x : 1 – $\sigma_{on1}(V_x)$, 2 – $\sigma_{on2}(V_x)$, 3 – $\sigma_{on}(V_x)$

На графіку $\sigma_{on}(V_x)$ точками O , A , B , C і D показані характерні щодо прояву реологічних властивостей середовища ділянки. Точка O позначає стан спокою шару і відповідає стану граничної рівноваги середовища у пластичній постановці задачі. Ділянка OA відповідає раптовому імпульсному зрос-

танню опору при зрушуванні потоку. На цій ділянці реалізується ефект повзучості, коли під дією сталого навантаження виникає дуже в'язка течія середовища з дуже низькими швидкостями. Ділянка AB відповідає області аномальної в'язкості середовища. В цій області внаслідок інтенсивних структурних змін у зернистому матеріалі відбувається лавиноподібне руйнування міжчастинкових контактів та зрідження середовища. В точці B значення напруження опору набуває мінімуму і формується течія, що розплескується [10, 11]. Якщо реологічна поведінка середовища на ділянці OB визначається переважно першою складовою σ_{on1} та силами тертя спокою, то на ділянці BD – переважно другою σ_{on2} та силами тертя ковзання при русі. На ділянці BC , при збільшенні швидкості, опір зростає практично за лінійною залежністю. Тут зернистий матеріал веде себе як лінійно в'язке середовище. Ділянка CD відповідає області кулонова тертя, оскільки напруження опору майже не залежить від швидкості та пропорційно стискаючій силі. Ефект виникнення аномальної в'язкості та мінімального опору поблизу точки B залежності $\sigma_{on}(V_x)$ було експериментально підтверджено при реєструванні явища лавиноподібного гравітаційного руху зернистого матеріалу по похилій поверхні [12 – 14].

Таким чином, зареєстровано ефект виникнення подвійного максимуму значень питомих динамічних параметрів зсувного шару для різних швидкостей обертання при малому відносному розмірі елементів молоткового завантаження барабанних млинів. Виникнення тихохідного локального максимуму параметрів, що підвищує ефективність останньої стадії тонкого подрібнення стиранням та роздавлюванням, зумовлено явищем аномально низької в'язкості зернистого середовища зсувного шару завантаження, коли рух потоку набуває лавиноподібного характеру.

Список літератури: 1. *Науменко Ю.В.* Основи теорії режимів роботи барабанних млинів: Монографія / *Ю.В. Науменко.* – Рівне: Видавництво СПД Зелент О.І., 2009. – 282 с. 2. *Науменко Ю.В.* Рекомендації до розрахунку, проектування та експлуатації барабанних млинів багатостадійного подрібнення / *Ю.В. Науменко.* – Рівне : Видавництво СПД Зелент О.І., 2009. – 88 с. 3. *Півняк Г.Г.* Ресурсозбереження та інтенсифікація процесів подрібнення / *Г.Г. Півняк, В.І. Кириченко.* – Дніпропетровськ: НГАУ, 2001. – 163 с. 4. *Півняк Г.Г.* Подрібнювання. Енергетика і технологія / [*Г.Г. Півняк, Л.А. Вайсберг, В.І. Кириченко, В.В. Кириченко.*] – Дніпропетровськ: НГУ, 2006. – 314 с. 5. *Крюков Д.К.* Футеровки шарових мельниц / *Д.К. Крюков.* – М.: Машиностроение, 1965. – 184 с. 6. *Ковалюх В.Р.* Зависимость производительности цементной мельницы от коэффициента заполнения и частоты вращения / *В.Р. Ковалюх, М.Б. Гуз* // Цемент. – 1978. – № 7. – С. 8 – 9. 7. *Ковалюх В.Р.* Оптимизация процесса измельчения в шаровых мельницах с регулируемым электроприводом / *В.Р. Ковалюх* // Цемент. – 1985. – № 8. – С. 19 – 22. 8. *Ден-Гартог Дж.П.* Механические колебания/ *Дж.П. Ден-Гартог*; [пер. с англ.]. – М.: Физматгиз, 1960. – 580 с. 9. *Ротенберг А.В.* О воз-

можном виде тензора вязких напряжений в механике сыпучих тел / *А.В. Ротенберг* // Исследовано в России. – 2001. – Вып. 42. – С. 465 – 475: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2001/042.pdf/>. **10.** Долгунин В.Н. Быстрые гравитационные течения зернистых материалов: техника измерения, закономерности, технологическое применение / *В.Н. Долгунин, В.Я. Борщев*. – М.: Изд-во Машиностроение-1, 2005. – 112 с. **11.** Долгунин В.Н. Сегрегация в зернистых средах: явление и его технологическое применение / *В.Н. Долгунин, А.А. Уколов*. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. – 180 с. **12.** Borzsonyi T. Two scenarios for avalanche dynamics in inclined granular layers / *T. Borzsonyi, T.C. Hasley, R.E. Ecke* // *Phys. Rev. Lett.* – 2005. – Vol. 94, № 208001. – P. 208001. **13.** Borzsonyi T. Avalanche dynamics on a rough inclined plane / *T. Borzsonyi, T.C. Hasley, R.E. Ecke* // *Physical Review E*. – 2008. – Vol. 78. – P. 011306 (15 pages). **14.** Armanini A. Liquid-granular channel flow dynamics / *A. Armanini, L. Fraccarollo, M. Larcher* // *Powder Technology*. – 2008. – Vol. 182. – P. 218 – 227.

Надійшла до редколегії 20.08.12

УДК 621.926.5:539.215

Екстремальні швидкісні динамічні стани внутрішньокамерного завантаження барабанного млина / Ю.В. НАУМЕНКО // Вісник НТУ «ХПІ». – 2012. – № 48 (954). – (Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія). – С. 119 – 125. – Библиогр.: 14 назв.

Зарегистрировано эффект возникновения двойного максимума безразмерных комплексных критериев сдвигового слоя внутрикамерной загрузки барабанной мельницы. Показано, что возникновение тихходного локального максимума критериев обусловлено лавинообразным разрушением контактов между частицами и ожижением зернистой среды. Предложено использовать такой режим работы для повышения энергетической эффективности тонкого измельчения.

The effect of tumbling mills intrachamber filling shifting layer integral dimensionless criterions double maximum was established. The initiation of slow local criterions maximum was demonstrated to determine by avalanche elements contacts collapse and granular medium fluidization. The use of these operating conditions was put forward for raising the fine milling energy efficiency.

Н.И. СОКУР, д-р техн. наук, проф., **Л.М. СОКУР**, ст. препод.,
И.Н. СОКУР, науч. сотруд., КрНУ им. М. Остроградского, Кременчуг

ИСПЫТАНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ДРОБИЛКИ ЦД-50 В ПОЛУПРОМЫШЛЕННЫХ УСЛОВИЯХ

В статье приводится описание разработанной авторами новой конструкции центробежной дробилки ЦД-50 и результаты ее испытаний в полупромышленных условиях. Делаются выводы о целесообразности ее приложения для дробления руд и строительных материалов.

Центробежная дробилка ЦД-50, разработанная при участии авторов и изготовлена в механическом цехе института «Механобрчермет» (рис. 1, табл. 1).

Во время работы дробилки исходный материал, подлежащий дроблению, равномерно подается через загрузочную точку 1 и втулку на крышке 2 на центральную точку 3 ротора 5.

Попадая на конус 4, материал равномерно распределяется на разгонном диске ротора.

Перемещаясь на диске по спиральной траектории, куски материала достигают внутренней кромки двух разгонных ребер 6, материал разгоняется и приобретает скорость 90 – 130 м/с, выбрасывается ими в зону дробления и разрушается при ударе о футеровочные плиты 7. Угол встречи материала с рабочей поверхностью плиты составляет 75 – 90°.

Из бункера 9 дробленый материал разгружается через точку 11.

Вращение ротору 5 передается от электродвигателя 20 через клиноременную передачу 21, карданный вал 22, гидромуфту 12, смонтированных на специальной раме 13, второй карданный вал 10, подпятник 8.

Ротор 5, посредством опорной платформы 17 через демпфирующие элементы 16 опирается на опорный узел 18 корпуса дробилки 19.

Верхняя часть корпуса дробилки закрыта крышкой 15, снабженную люками 14, обеспечивающих свободный доступ к ротору.

Подача смазки в гидропривод осуществляется через систему смазки гидропривода 12. Гидропривод с системой смазки технологическими трубопроводами связан со станцией циркуляционной жидкой смазки ЧД-70 м.

© Н.И. Сокур, Л.М. Сокур, И.Н. Сокур, 2012

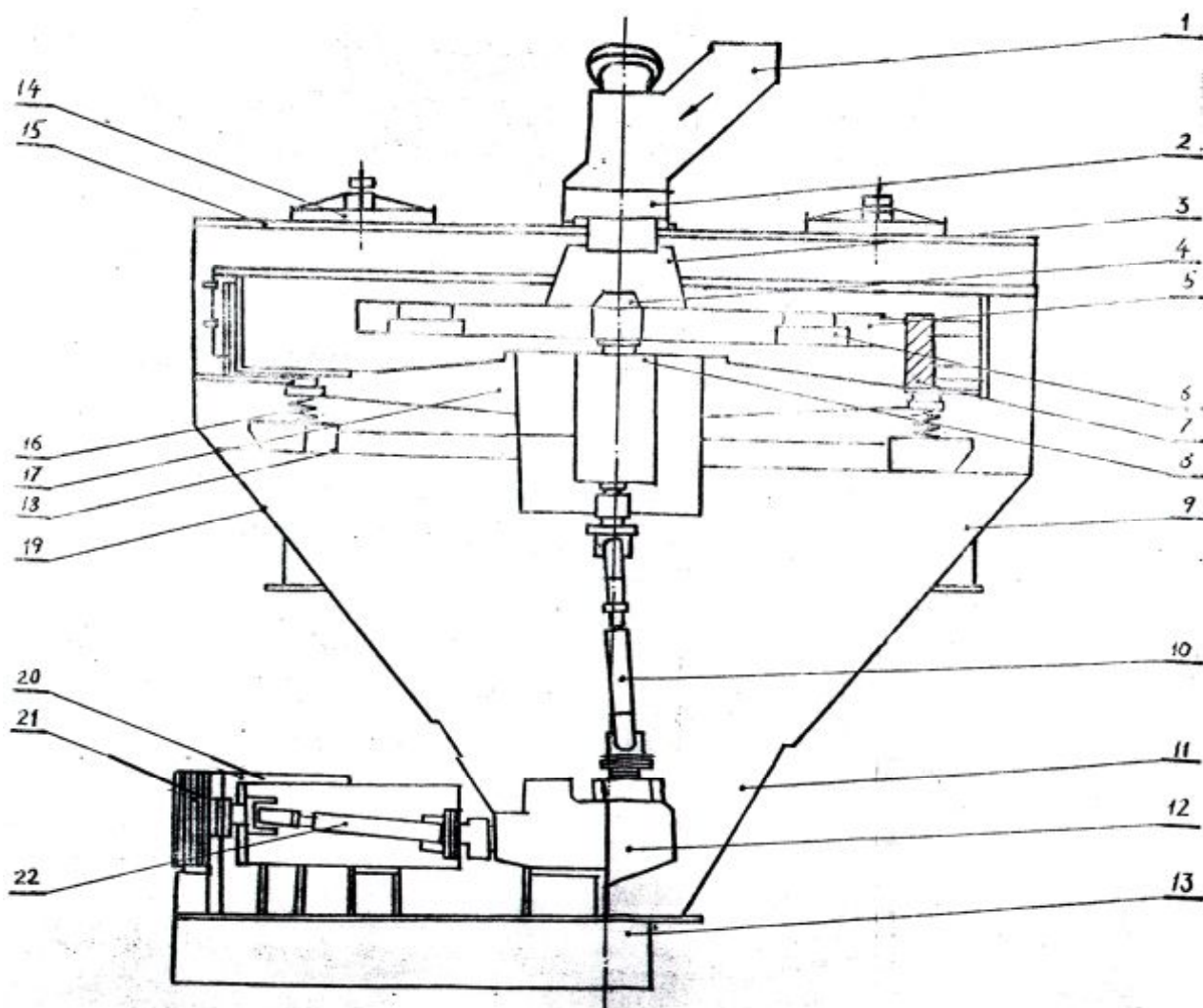


Рис. 1 – Схема центробежной дробилки ЦД-50

Частота вращения выходного вала муфты и соединенного с ним ротора регулируется в интервале $1,67 \div 16,7 \text{ с}^{-1}$ ($100 - 1000 \text{ мин}^{-1}$), что позволяет производить плавный запуск дробилки и устанавливать оптимальный режим работы рабочего органа – ротора.

В приводе дробилки применен асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.

Таблица 1

Техническая характеристика дробилки ЦД-50

	Наименование измерения	Единица	Величина
1	Производительность	$\text{м}^3/\text{ч}$	25
2	Крупность исходного материала	мм	100 – 0
3	Крупность дробленого материала	мм	10 – 0
4	Диаметр вылета разгонных ребер ротора	мм	2200

Экспериментальный образец центробежной дробилки был доставлен с механического завода института укрупненными узлами и смонтирован в дробильном отделении опытной обогатительной фабрики института Механо-брчермет (ОПИ).

Технологическая цепочка включала в себя бункер исходной руды, пластинчатый питатель, наклонный ленточный конвейер, промежуточный бункер, ленточный питатель, загрузочную течку (рис. 2).

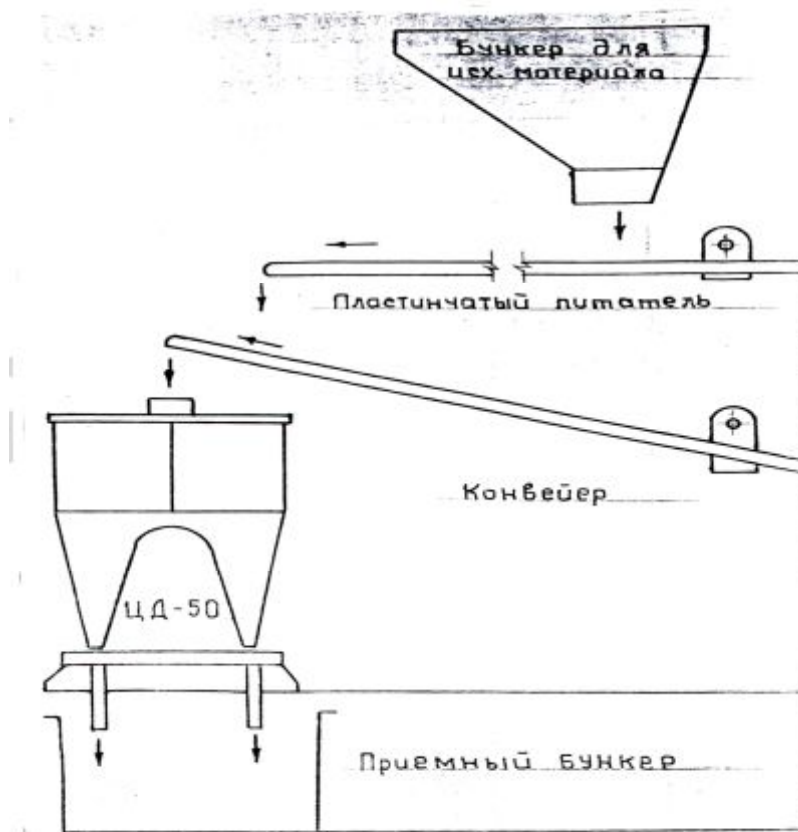


Рис. 2 – Схема расположения центробежной дробилки ЦД-50 на опытном производстве

Исходная руда подавалась из накапливающего бункера с помощью грейферного погрузчика в бункер исходной руды.

Дробленый продукт через разгрузочные течки дробилки разгружался в два бункера, расположенные диаметрально противоположно от дробилки.

При испытаниях производительность дробилки лимитировалось максимально возможной производительностью ленточного питателя 30 – 35 т/ч.

В процессе испытаний частота вращения ротора изменялась в пределах от 200 до 1200 мин⁻¹ (соответственно скорость вылета частиц от 23,0 до 138,0 м/с).

Установлено, что потребляемая приводом мощность с увеличением частоты вращения ротора в указанных пределах увеличивается от 26 до 185 кВт при нагрузке 30 т/ч, а на холостом ходу от 10,0 до 40,0 кВт. Удельный расход электроэнергии без учета степени дробления изменяется от 0,8 до 6,0 кВтч/т исходного питания.

Средневзвешенная крупность при этом уменьшается с 13,0 до 2,3 мм, а степень дробления возрастает от 4 до 24,0, причем, имеется тенденция к снижению кратности дробления при повышении производительности (рис. 3). Как следует из анализа результатов испытаний, максимальный прирост класса минус 5,0 мм составил 85,6 %, класса минус 10,0 мм составил 85,8 % при максимальной частоте вращения ротора 1200 мин^{-1} и производительности 30,0 т/ч.

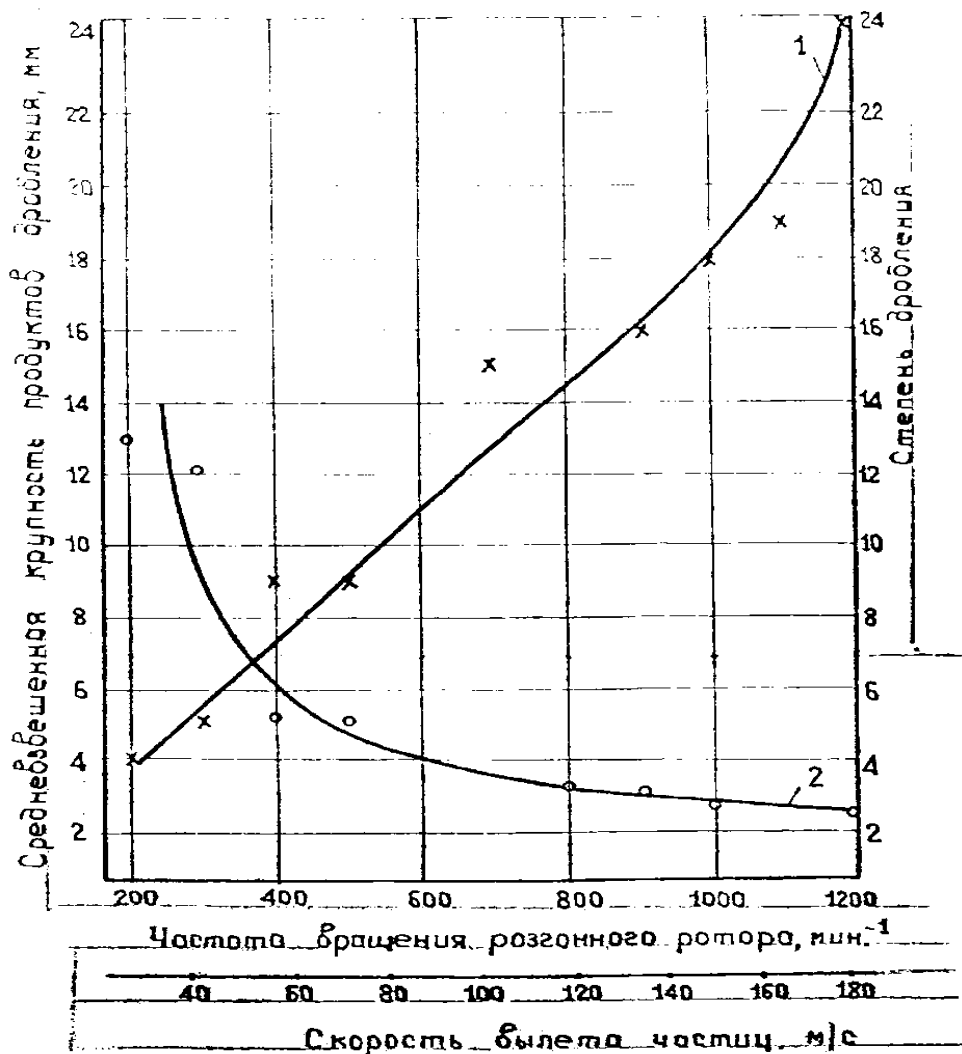


Рис. 3 – Зависимость технологических показателей дробления от частоты вращения разгонного ротора: 1 – степень дробления, 2 – средневзвешенная крупность продуктов дробления.

Массовая доля классов минус 1,0 мм минус 5,0 мм и минус 10,0 мм в дробленом продукте составила при этом 42,0 %, 92,9 % и 97,9 % соответственно.

При работе в проектном режиме (Π 1000 мин^{-1}) массовая доля классов минус 5,0 мм и 10,0 мм составила соответственно 85 % и 95 % (рис. 4).

Средневзвешенная крупность продукта в опытах составила 13 – 2,0 мм (при изменении n от 200 до 1200 мин^{-1}).

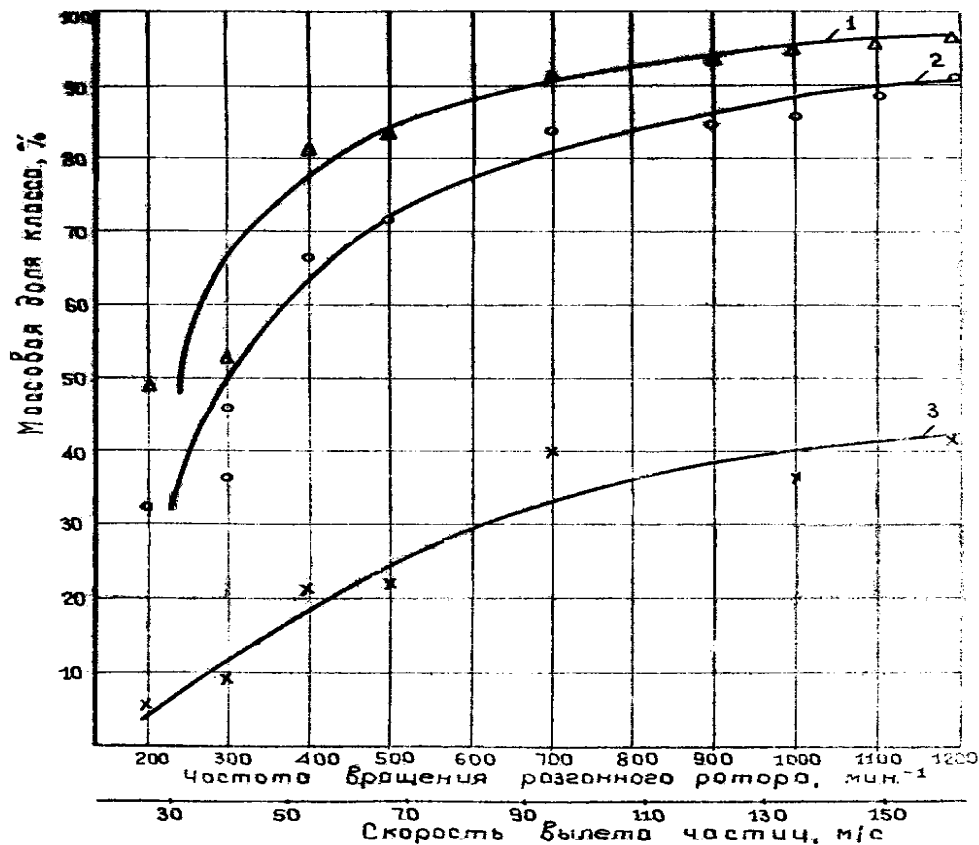


Рис. 4 – Зависимость крупности дробления от частоты вращения разгонного ротора: 1 – массовая доля класса минус 10,0 мм, 2 – массовая доля класса минус 5,0 мм, 3 – массовая доля класса минус 1,0 мм

Таким образом, при увеличении частоты вращения разгонного ротора увеличивается выход классов – 5,0 – 10, мм, степень дробления материала и уменьшается средневзвешенная крупность дробленого продукта.

Полученные в процессе испытаний технологические показатели работы дробилки ЦД-50 удовлетворяют требованиям отрасли по дроблению магнетитовых руд, поэтому созданная конструкция дробилки представляется перспективной, и она была рекомендована для проведения испытаний в промышленных условиях действующей дробильной фабрики Северного ГОКа.

Выводы.

1. Испытания центробежной дробилки ЦД-50 на опытном производстве института Механобрчермет на измельчении железистых кварцитов месторождения ЮГОКа подтвердили ее работоспособность и возможность получения запланированных технологических показателей.

2. При дроблении железистых кварцитов крупностью 100 – 0 мм установлено: производительность дробилки по исходному питанию составила 50 т/ч и обусловлена технологическими параметрами питающего конвейера; при проектной частоте вращения разгонного ротора $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$ массовая доля классов минус 10 мм и минус 5 мм в дробленом продукте составляет 95 % и 85 % соответственно, степень дробления составила 15 – 18; удельный расход электроэнергии по исходной руде без учета степени дробления составляет 4,3 кВтч/т; полученные технологические показатели удовлетворяют требованиям промышленности.

3. Установлено, что технологические показатели работы центробежной дробилки зависят от частоты вращения ротора, при этом с увеличением частоты вращения массовая доля готовых классов, степень дробления и удельный расход электроэнергии увеличиваются.

Список литературы: 1. Сокур Н.И. Дробление и измельчение руд / Н.И. Сокур, В.Н. Потураев, Е.К. Бабец. – Кривой Рог: «ВЭЖА», 2000. – 290 с. 2. Сокур Н.И. Центробежные дробилки / Н.И. Сокур, И.Н. Сокур, Л.М. Сокур. – Кременчуг: ЧП Щербатых А.В., 2009. – 204 с.

Поступила в редколлегию 20.08.12

УДК 622.27:6292.9

Испытания центробежной дробилки ЦД-50 в полупромышленных условиях / Н.И. СОКУР, Л.М. СОКУР, И.Н. СОКУР // Вісник НТУ «ХП». – 2012. – № 48 (954). – (Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія). – С. 126 – 131. – Библиогр.: 2 назв.

В статті приводиться опис розробленої авторами нової конструкції відцентрової дробарки ЦД-50 і результати її випробувань у напівпромислових умовах. Робляться висновки про доцільність її застосування для дроблення руд і будівельних матеріалів.

In the article description over of the new construction of centrifugal crusher of CD-50 and results of its tests developed authors is brought in semiindustrial terms. Drawn conclusion about expedience of its application for crushing of ores and build materials.

Е.В. ШТЕФАН, д-р техн. наук, проф., НУХТ, Київ,
С.І. БЛАЖЕНКО, канд. техн. наук, доц., НУХТ, Київ

ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСІВ МЕХАНІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ ОРГАНІЧНОГО ПОХОДЖЕННЯ

Розглянуто проблему визначення модуля пружності та коефіцієнту Пуасона дисперсних матеріалів типу лузги соняшника, соломи, жому, пивної дробини, деревинної стружки і подібних матеріалів. Представлено методику експериментального визначення модуля пружності коефіцієнта Пуасона дисперсних систем.

Постановка проблеми дослідження обумовлена необхідністю проектування ефективного технологічного обладнання для виробництва твердого біопалива. Використання методів математичного моделювання у якості інструментального ядра у сучасних технологіях проектування процесів та обладнання по обробленню дисперсних матеріалів (ДМ) неможливо без врахування структурно-механічних особливостей цих матеріалів і, в першу чергу, таких їх реологічних властивостей твердої фази, як пружність, пластичність, в'язкість та ін. Значною проблемою при отриманні адекватних результатів чисельного моделювання процесів пресування при виробництві твердого біопалива є відсутність в довідковій літературі реологічних характеристик відповідних видів дисперсних матеріалів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій по даній проблемі свідчить, що на сьогоднішній день розроблено математичні моделі оброблення ДМ в галузі механіки ґрунтів, порошкової металургії та харчової промисловості [1 – 3]. Застосування таких моделей для аналізу процесів пресування, подрібнення, змішування ДМ з твердою фазою органічного походження обмежується відсутністю даних про реологічні властивості відповідних фаз. Тому, **метою роботи** є розроблення методів та проведення експериментальних досліджень по визначенню структурно – механічних та реологічних параметрів твердої фази ДМ типу лушпиння зернових культур, соломи, стружки деревини та ін.

Математична модель. Розглядаючи конкретну переробну технологію,

© Е.В. Штефан, С.І. Блаженко, 2012

приймаємо концепцію подання сировинних дисперсних мас як двохфазних сумішей пористої або зернистої твердої деформованої структури з рідиною чи газом, яку надалі будемо розглядати у вигляді моделі суцільного текучого середовища з приписуваними їй фізичними властивостями, які феноменологічно відображають молекулярну структуру середовища і внутрішні рухи речовини, що відбуваються в ній.

Для описання механічної поведінки таких матеріалів необхідно використовувати поняття напружень, деформацій, щільності, а також швидкості зміни цих параметрів.

Ці тензорні та скалярні характеристики мають локальну природу і визначаються за допомогою операцій граничного переходу, коли елементи простору (об'єми і поверхні) стягуються до точок (матеріальних).

У традиційних моделях континуума точки ототожнюють з частками середовища (нескінченно малий об'єм матеріального континуума), а ті, у свою чергу, є елементарними носіями властивостей матеріалу.

Подібне ототожнення в дисперсній масі з твердою фазою рослинного походження ускладнюється через брак єдиної думки про те, що потрібно розуміти під часткою такого середовища.

Динамічні аспекти механічної поведінки ДМ регламентуються рівняннями балансу у формі закону збереження кількості руху з врахуванням закону збереження маси у межах представницького елемента (ПЕ) ДМ. При цьому для кожної з фаз ДМ рівняння відносного руху фаз представляються у вигляді [1]:

$$\alpha_1 \left(\rho_1 \frac{d\mathbf{u}}{dt} - \rho_2 \frac{d\mathbf{v}}{dt} \right) - \nabla \boldsymbol{\sigma}^f - \frac{\mathbf{R}}{\alpha_2} - \alpha_1 (\rho_1 - \rho_2) \mathbf{G} = 0, \quad (1)$$

$$\rho_2 \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla \mathbf{P} - \frac{R}{\alpha_2} + \rho_2 \mathbf{G} = 0, \quad (2)$$

де відповідно до конкретного механізму взаємопроникнення фаз дисперсної системи (фільтрація, дифузія і т.п.) враховується сила \mathbf{R} , яка пропорційна відносній середній швидкості потоку газорідкої фази (аналог сили в'язкого опору):

$$\mathbf{R} = \frac{\mu}{a^2} \alpha_1 \alpha_2 (\mathbf{v} - \mathbf{u}), \quad (3)$$

де μ – коефіцієнт динамічної в'язкості (кг с/м) для нестисливої рідини; a – узагальнений коефіцієнт, що враховує конфігурацію простору пор дисперсійного середовища.

Для формулювання визначальних співвідношення (між деформаціями та напруженнями) у межах ПЕ ДМ розроблена методика, яка складається з наступних етапів:

1. Вводиться у розгляд два рівні структурного аналізу ДМ – мікроаналіз (на основі розглядання окремого мікро-фрагменту (частки) дисперсної системи формулюються співвідношення щодо параметрів його механічної поведінки) та макроаналіз, де виконується осереднення параметрів по макро-об'єму ПЕ. Запропоновано ввести у розгляд ідеалізований мікро-фрагмент ДМ – елементарний об'єм у вигляді кругового порожнього циліндра (рис. 1).

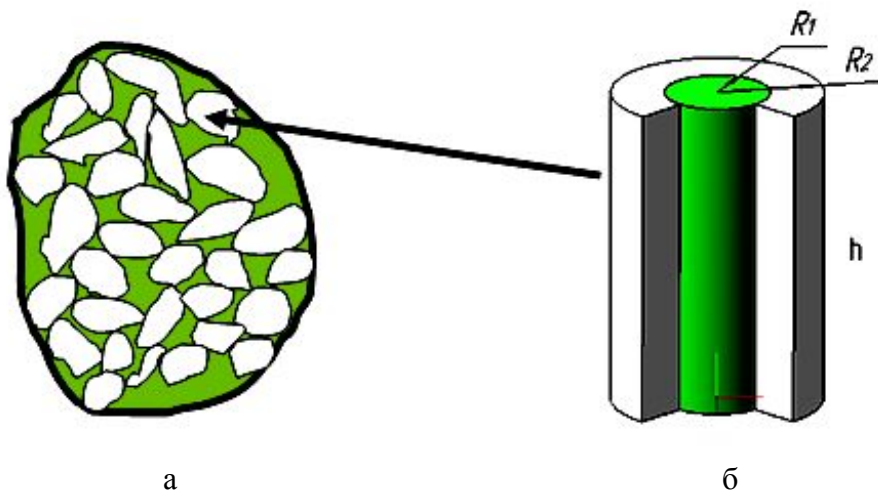


Рис. 1 – Макро-фрагмент (а) та ідеалізований мікро-фрагмент (б) ДМ

Матеріал даного циліндра (тверда фаза ДМ на мікро рівні) вважається нестисливим, а його вісь збігається з напрямком одного з головних компонентів тензора швидкостей деформації.

В області зайнятій циліндром $R_1 < r < R_2$; $0 < z < h$ розглядаються тільки два компоненти швидкості переміщень точок матеріалу v_r і v_z , які задовольняють рівнянню нерозривності:

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0. \quad (4)$$

2. Для нівелювання результатів введеної ідеалізації розглядається параметр швидкості локальної (на мікрорівні) енергії деформування твердої фази з подальшим її осередненням по всьому об'єму циліндра:

$$D = \sigma_0 \gamma_0 \cdot \left(\frac{1}{\alpha_1} \sqrt{\frac{\psi e^2}{\gamma_0^2} + \frac{\varphi \Gamma^2}{\gamma_0^2}} \right)^{n+1} + \sigma_T \gamma_0 \frac{1}{\alpha_1} \sqrt{\frac{\psi e^2}{\gamma_0^2} + \frac{\varphi \Gamma^2}{\gamma_0^2}}. \quad (5)$$

При виведенні (5) враховані параметри дисперсності матеріалу $\alpha_2 = 1 - \alpha_1 = \frac{R_1^2}{R_2^2}$, $\varphi = \alpha_1$; $\psi = \frac{\alpha_1}{2\alpha_2}$, а також узагальнена реологічна модель ма-

теріалу твердої фази $\sigma = \sigma_0 \left(\frac{\dot{\gamma}}{\gamma_0} \right)^n + \sigma_m$, де σ_T – границя текучості,

$\gamma = \sqrt{\frac{1}{2} \frac{R_1^4}{r^4} e^2 + \Gamma^2}$ – параметр інтенсивності швидкостей деформацій ПЕ, σ_0 ,

γ_0 , n – константи апроксимації експериментальних даних; e , Γ – перший та другий інваріанти тензора напружень; $w = \frac{1}{\alpha_1} \sqrt{\psi e^2 + \varphi \Gamma^2}$.

3. На основі (5) формулюється загальна структура визначальних співвідношень через компоненти тензорів напружень σ_{ij} і швидкостей деформацій e_{ij} :

$$\sigma_{ij} = \left(\frac{\sigma_0 \left(\frac{w}{\gamma_0} \right)^n + \sigma_T}{w} \right) \left[\varphi e_{ij} + \left(\psi - \frac{1}{3} \varphi \right) e \delta_{ij} \right], \quad (6)$$

Експериментальні дослідження проведені з використанням спеціального пресуючого обладнання, яке забезпечує високий тиск (400 – 500 МПа) ущільнення ДМ з незначним (в ідеалі наближеним до нуля) об'ємним вмістом дисперсійного середовища. Отриманий таким способом матеріал можна умовно вважати компактним (однофазним), тобто матеріалом твердої фази досліджуваного ДМ. Згідно розробленої методики [4] отримано набір зразків, що представляють собою тверду фазу лузги соняшника та гречки, стружки сосни та дуба, соломи та висівок. Проведено експериментальні випробування цих зразків з метою визначення модуля пружності та коефіцієнта Пуассона відповідних матеріалів. Для експериментальних випробувань було використано універсальну випробувальну машину TIRATEST-2151.

Оброблення результатів проведених досліджень (рис. 2) дозволили визначити значення реологічних параметрів, що представлені у табл. 1.