

ТЕОРЕТИЧНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РУХУ МАТЕРІАЛУ В ГЛАДКОМУ ОБЕРТОВОМУ БАРАБАНІ

Незважаючи на значну кількість робіт, присвячених опису руху матеріалу в обертовому барабані, переважна більшість авторів схиляється до використання одного з двох наступних підходів. "Одночастковий" підхід [2, 4, 6], при якому розглядається рівновага окремої частки, або метод "в'язких потоків" [3, 5], відповідно до якого рух матеріалу розглядається як потік в'язкопластичного середовища.

Проте перший підхід успішно можна використовувати тільки при описі вільного руху, наприклад, при зсипанні матеріалу з лопаті, а основний недолік другого підходу полягає в тому, що залежності, які у ньому використовуються, містять емпіричні коефіцієнти, що вимагають визначення на лабораторних установках. Крім цього, метод "в'язких потоків" описує симетричну щодо центра циркуляції границю розділу шарів, що не відповідає реальній картині, особливо при швидкостях обертання барабана більших 0,2 від критичної.

При розгляді характеру розподілу оброблюваного середовища в робочих органах барабанних апаратів, до яких відносяться і гравітаційні бетонозмішувачі, багатьма дослідниками [1-5] зазначається, що в залежності від типу цього середовища характер руху матеріалу в барабані не однаковий. Це є наслідком як конструктивних особливостей, так і необхідних технологічних режимів роботи барабанних апаратів. Відповідно до запропонованої класифікації [1, 2, 3] рух матеріалу може бути:

- з обвалюванням, при якому періодично відбувається перерозподіл матеріалу із руйнуванням відкритої поверхні суміші;
- циркуляційним, при якому матеріал утворює замкнений контур, що складається з колової ділянки та ділянки руху по відкритій поверхні матеріалу;
- закритичним або циркуляційним, при якому весь матеріал обертається разом із барабаном.

На практиці найчастіше використовується циркуляційний рух. Звичайно даний режим руху стійко існує при кутових швидкостях обертання барабана $(0,2 \dots 0,6)\omega_{кр}$, де $\omega_{кр}$ – критична кутова швидкість, при якій частка починає обертатися разом з обичайкою барабана.

Можливий також рух з коливаннями, при якому, сегмент матеріалу, обертаючись разом з барабаном, періодично піднімається на деяку висоту, а потім переміщається вниз, прослизавши щодо обичайки барабана. Даний режим можливий при малих кутових швидкостях обертання барабана, малому заповненні барабана матеріалом і коли коефіцієнт тертя часток об внутрішню поверхню барабана менше коефіцієнта тертя між частками (що характерно для великих значень водоцементного відношення).

Для гравітаційних бетонозмішувачів характерне поєднання перших двох режимів. Таким чином, елементарний об'єм матеріалу безперервно піднімається по колу разом із барабаном, а потім скидається по параболічній траєкторії або зсувається по похилій площині, яка утворюється нижніми шарами матеріалу. Тобто, в перерізі барабана утворюється два об'єми матеріалу: АСВДФ – об'єм, що піднімається разом із барабаном по концентричним колам, та АЕВС – об'єм, що рухається вздовж межі розділу АСВ (рис. 1). Крім того, до зазначених рухів додається також осьова складова вздовж осі барабана [2, 3].

Характер руху оброблюваного матеріалу залежить від багатьох параметрів, проте переважний вплив має діаметр барабана, частота його обертання, кут нахилу барабана до горизонту, ступінь заповнення матеріалом, склад бетонної суміші і пов'язані із ним коефіцієнти тертя матеріалу по сталі та внутрішнього тертя. Крім того, значний внесок складає наявність в барабані внутрішніх робочих елементів (лопатей, шнеків, т. ін.). Перераховані фактори чинять значний вплив на висоту підйому бетонної суміші і, як наслідок, на енергію взаємодії елементарних об'ємів між собою при падінні або зсуві. Слід також зазначити швидкість відносного руху об'єму матеріалу під час його зсування вздовж межі розділу АСВ, яка може бути як площиною, так і кривою.

Розглянемо рух елементарного об'єму суміші всередині барабана, побудувавши послідовне положення суміші в барабані під час його обертання.

Із збільшенням кута повороту барабана α від 0 до кута тертя матеріалу в стані спокою α_0 суміш рухається разом із барабаном, залишаючись відносно нього нерухомою (рис. 2, а). Починаючи з кута α_0 навіть самі верхні частки матеріалу (біля точки А) гарантовано починають сповзати по поверхні суміші. Враховуючи, що на елементарний об'єм матеріалу діють сила тяжіння, сила інерції та сила тертя, рівняння граничної рівноваги частки, розташованої біля точки А має вид

$$m \cdot g \cdot \sin(\alpha) - f \cdot m \cdot g \cdot \cos(\alpha) - \frac{m \cdot \omega^2 \cdot R \cdot \cos(\delta_0) \cdot (\sin(\phi) + f \cdot \cos(\phi))}{\cos(\phi)} = 0 \quad (1)$$

де m - маса елементарної частки; δ_0 - половина центрального кута, який визначає величину сегменту суміші в стані спокою; ϕ - кут, який характеризує положення частки на відкритій поверхні матеріалу; f - коефіцієнт тертя в стані спокою; ω - кутова швидкість обертання барабана; R - радіус обертання барабана.

В загальному випадку рівняння (1) має два корені. Приймаючи до розгляду частку у крайньому положенні (точка А), маємо, що кут $\phi = \delta_0$. Тоді корінь рівняння (1) після виконання перетворень набуває вигляду

$$\alpha_0 = \arccos \left[\frac{-\omega^2 \cdot f \cdot R \cdot (\sin(\delta_0) + f \cdot \cos(\delta_0)) + \sqrt{(f^2 + 1) \cdot g^2 - (\sin(\delta_0) + f \cdot \cos(\delta_0))^2 \cdot R^2 \cdot \omega^4}}{(f^2 + 1) \cdot g} \right] \quad (2)$$

Вже в наступну мить вся суміш приходить до руху, починаючи зсуватися. Припустивши, що все ж вдасться повернути барабан із сумішню на кут $\alpha_1 = \alpha_0 + \Delta\alpha$, остання займе нестійке положення (рис. 2, б). Частина суміші, яка знаходиться вище лінії вільного скочування (пунктирна лінія на рис. 2, б), обрушується вниз, утворюючи в нижній частині сегменту краплеподібну фігуру (вище пунктирної лінії на рис. 2, в).

На справді ж, рух часток суміші починається раніше кута α_0 , оскільки першими в рух приходять частки, розташовані на відкритій поверхні суміші ближче до центра барабана (на них діє набагато менша сила інерції у порівнянні із периферійними

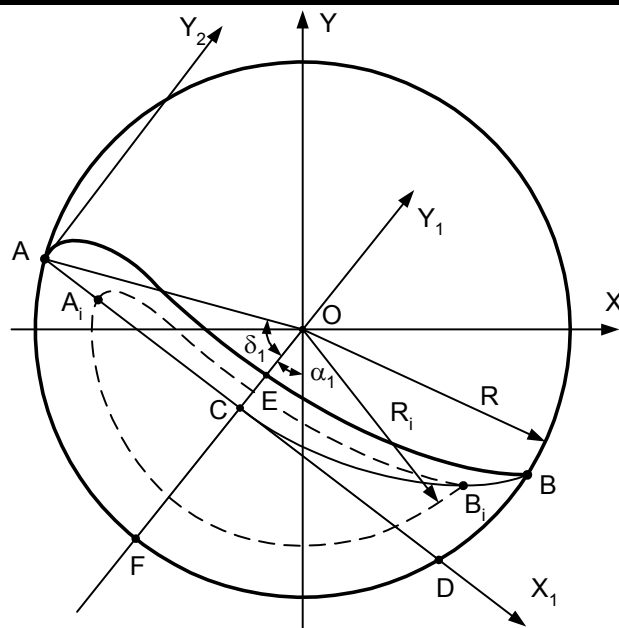


Рис. 1. Схема руху елементарного об'єму суміші

частками). При цьому, подальше збільшення кута α_1 можливе лише за рахунок збільшення кутової швидкості обертання барабана ω .

По досягненні кута α_0 усі частки на ділянці АС приходять до руху, а центральний кут, який визначає величину сегменту нерухомої відносно барабана частини суміші, зменшується від δ_0 до δ_1 . При подальшому збільшенні кута α вище α_0 (тобто при збільшенні ω) величина δ_1 постійно зменшується, а площа краплеподібної фігури – збільшується (оскільки збільшується кількість суміші, що зсипається).

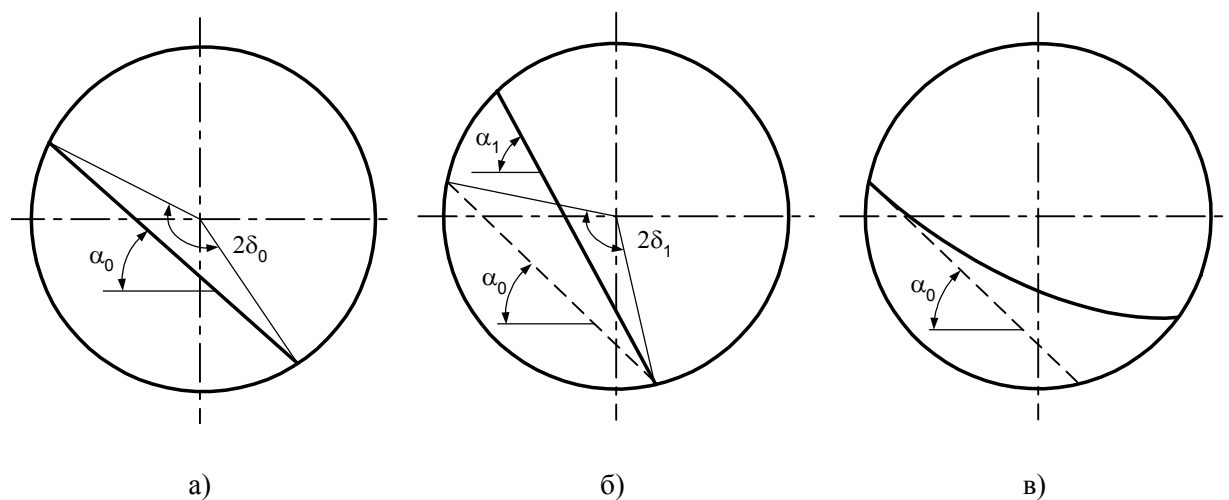


Рис. 2. Схема послідовної зміни положення вільної поверхні суміші

Отже, можна зробити висновок, що реально переріз суміші в барабані має набагато більш складний вид, ніж широкоживаний в літературі сегмент. Більше того, із збільшенням швидкості обертання барабана ця відмінність значно зростає.

Для встановлення характеру руху матеріалу в поперечному перерізі гладкого обертового барабана була розроблена експериментальна установка (рис. 3). Установка складається з нерухомих рами та поворотної рами-траверси, що закріплена на нерухомій рамі і має можливість зміни кута нахилу до горизонту. Положення траверси фіксується за допомогою розпирного елемента із фіксованим розташуванням отворів. Отвори виконані таким чином, що забезпечують нахил траверси на кут від 0 до 60° із кроком 15°. На поворотній траверсі змонтовані двигун постійного струму потужністю 1,5 кВт та черв'ячний редуктор. Обертання від двигуна передається на редуктор через клинопасову передачу. Повне передавальне відношення клинопасової передачі та черв'ячного редуктора дозволяє отримувати швидкість обертання від 0,2 до 1,2 $\omega_{кр}$.

На вихідному валу редуктора встановлюється змішувальний барабан. З метою дослідження впливу конструктивних і технологічних параметрів на процес перемішування було виготовлено декілька різних за співвідношенням поздовжніх та поперечних розмірів барабанів. Всі барабани мали однакові посадочні місця для закріплення на вихідному валу редуктора.

При виборі типу двигуна приводу обертання барабана був обраний двигун постійного струму, який дозволяє плавно змінювати частоту обертання двигуна, а отже і барабана.

На експериментальній установці встановленні датчики частоти обертання та датчики вимірювання спожитої потужності. Оскільки при обертанні барабана частина енергії неминує витрачатися на подолання опору тертя в підшипникових опорах, клинопасовій передачі тощо, в конструкцію установки введений пристрій – навантажувач, який імітує вагове навантаження на привод з боку барабана та суміші. Такий пристрій

дозволяє встановити величину потужності на подолання опору тертя. Таким чином, решта буде потужністю, що витрачається виключно на перемішування.

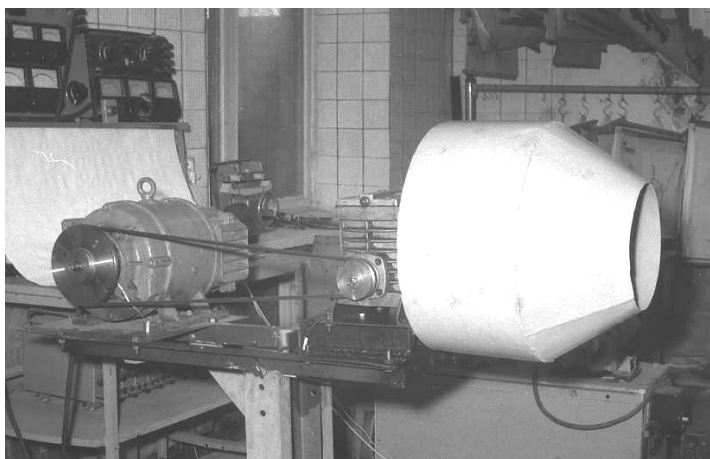


Рис. 3. Експериментальна установка

Серія виконаних на експериментальній установці експериментів дозволила підтвердити справедливості попередніх висновків та припущень. З наведених на рис. 4 фотографій добре видно поступове утворення та збільшення площі краплеподібної фігури із збільшенням кутової швидкості обертання барабана ω .

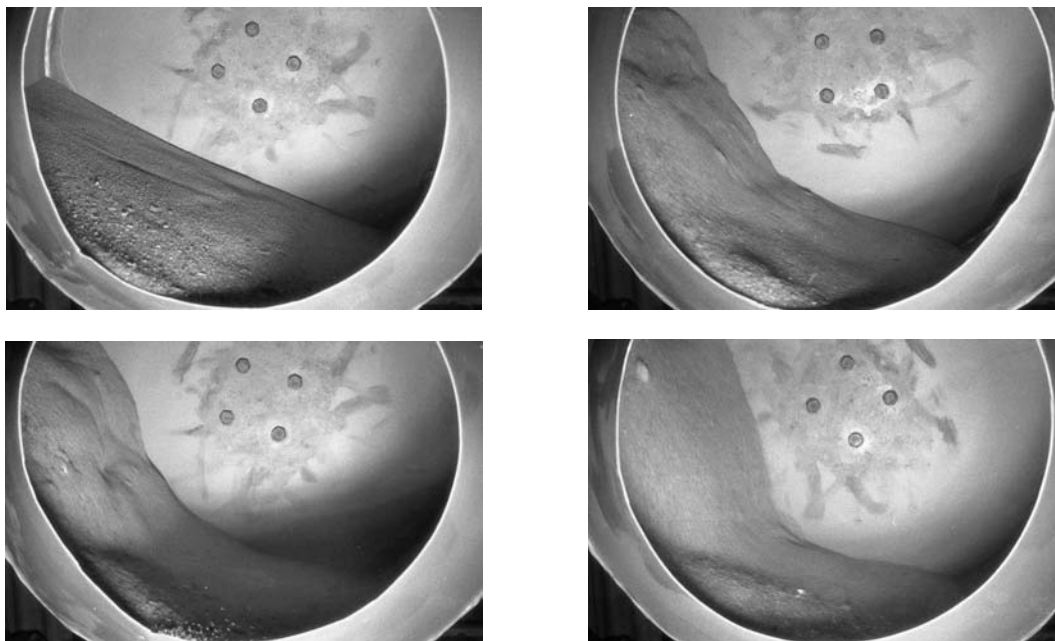


Рис. 4. Фотографії послідовної зміни положення вільної поверхні суміші

Визначимо для такого складного перерізу суміші площу нерухокої відносно барабана частини та координати її центра ваги. Необхідність визначення нерухокої частини викликана тим, що саме вона створює статичний момент, який необхідно подолати для обертання барабана.

Прийmemo, що межа розділу АСВ (рис. 1) складається з прямолінійної ділянки АС та параболічної – СВ, причому точка С розташована по центру перерізу суміші. Проведемо дві допоміжні декартові вісі – X_1CV_1 та X_1AV_2 , сумістивши вісь OX_1 із прямолінійною ділянкою АС.

Прийmemo також, що параболічна ділянка може бути описана законом [2]



$$x1 = \sqrt{\frac{y1}{a}}, \quad (3)$$

де a – коефіцієнт, величина якого може бути визначена як

$$a = 2 \frac{R \cdot \sin(\delta 0) \cdot \sin(\delta 0 - \delta 1)}{(2R \cdot \sin(\delta 0) \cdot \cos(\delta 0 - \delta 1) - R \cdot \sin(\delta 1))^2}. \quad (4)$$

Оскільки коло, що описує внутрішню поверхню барабана, в системі координат X_1CY_1 може бути задане рівнянням

$$x1 = \sqrt{R^2 - (y1 - R \cdot \cos(\delta 1))^2}, \quad (5)$$

то точка перетину параболи СВ поверхні матеріалу та кола барабана визначається координатами

$$X1b = \frac{1}{2} \sqrt{2} \sqrt{\frac{2 \cdot a \cdot R \cdot \cos(\delta 1) - 1 + \sqrt{-4 \cdot a \cdot R \cdot \cos(\delta 1) + 1 + 4 \cdot a^2 \cdot R^2}}{a^2}} \quad (6)$$

$$Y1b = \frac{1}{2} \frac{2 \cdot a \cdot R \cdot \cos(\delta 1) - 1 + \sqrt{-4 \cdot a \cdot R \cdot \cos(\delta 1) + 1 + 4 \cdot a^2 \cdot R^2}}{a}$$

Площа, яку займає переріз матеріалу, складається з площі сегменту ACDF та площі краплеподібної фігури CBD. Площа сегменту визначається рівнянням

$$Sacdf = \frac{1}{2} R^2 (2 \cdot \delta 1 - \sin(2 \cdot \delta 1)), \quad (7)$$

а площа краплеподібної фігури знаходиться як різниця площ, обмежених кривими DB (частина кола) та CB

$$Sdb = \int_0^{Y1b} \sqrt{R^2 - (y1 - R \cos(\delta 1))^2} dy1, \quad Scb = \int_0^{Y1b} \sqrt{\frac{y1}{a}} dy1. \quad (8)$$

Тоді, виконавши перетворення, отримуємо

$$Sfull = \frac{1}{2} \sqrt{R^2 - (Y1b - R \cdot \cos(\delta 1))^2} (Y1b - R \cdot \cos(\delta 1)) -$$

$$- \frac{1}{2} R^2 \cdot \left[\arctg \left(\frac{-Y1b + R \cdot \cos(\delta 1)}{\sqrt{R^2 - (-Y1b + R \cdot \cos(\delta 1))^2}} \right) - \sin(\delta 1) \cdot \cos(\delta 1) - \frac{\pi}{2} + \arccos(\cos(\delta 1)) \right] -$$

$$- \frac{2}{3} \left(\frac{Y1b}{a} \right)^{3/2} a \quad (9)$$

а повна площа перерізу дорівнює $Sfull = Sabdf + Scbd$.

Після підстановки і перетворень матимемо

$$Sfull = \left[\frac{1}{2} R^2 (2\delta 1 - \sin(2\delta 1)) + \frac{1}{2} \sqrt{R^2 - (Y1b - R \cdot \cos(\delta 1))^2} (Y1b - R \cdot \cos(\delta 1)) - \right.$$

$$- \frac{1}{2} R^2 \cdot \arctg \left(\frac{-Y1b + R \cdot \cos(\delta 1)}{\sqrt{R^2 - (-Y1b + R \cdot \cos(\delta 1))^2}} \right) - \sin(\delta 1) \cdot \cos(\delta 1) - \frac{\pi}{2} + \arccos(\cos(\delta 1)) -$$

$$\left. - \frac{2}{3} \left(\frac{Y1b}{a} \right)^{3/2} a \right] \quad (10)$$

Координати центру ваги перерізу суміші в системі координат X_1CY_1 визначаються рівняннями статичних моментів сегменту та краплеподібної фігури

$$X1 = \frac{Sacdf \cdot X1acdf + Scbd \cdot X1cbd}{Sacdf + Scbd}, \quad Y1 = \frac{Sacdf \cdot Y1acdf + Scbd \cdot Y1cbd}{Sacdf + Scbd}. \quad (11)$$

Для сегменту

$$X1acdf = 0; \quad Y1acdf = -\frac{4}{3} \frac{R \cdot \sin^3(\delta 1)}{2 \cdot \delta 1 - \sin(2 \cdot \delta 1)} + R \cdot \cos(\delta 1). \quad (12)$$

Для краплеподібної фігури CBD

$$X1cbd = \frac{1}{Scbd} \int_0^{Y1b} \left[R^2 - (y1 - R \cos(\delta 1))^2 - \frac{y1^2}{a} \right] dy1 \quad (13)$$

$$Y1cbd = \frac{1}{2Scbd} \int_0^{Y1b} \left[y1 \cdot \sqrt{R^2 - (y1 - R \cos(\delta 1))^2} - y1 \cdot \sqrt{\frac{y1^2}{a}} \right] dy1$$

Виконаємо інтегрування рівнянь (13). Для координати $X1cbd$ матимемо:

$$X1cbd = \frac{1}{Scbd} \left[-\frac{1}{3} Y1b^3 + \frac{1}{2} \left(2R \cos(\delta 1) - \frac{1}{a} \right) \cdot Y1b^2 + R^2 \cdot Y1b \cdot \sin^2(\delta 1) \right]. \quad (14)$$

Інтегрування та проведені спрощення отриманого результату для другого рівняння з (13) дають значення координати $Y1cbd$

$$\begin{aligned} Y1cbd = & \frac{1}{2Scbd} \left[\sqrt{R^2 - (-Y1b + R \cdot \cos(\delta 1))^2} \times \right. \\ & \times \left(-\frac{1}{3} \cdot R^2 + \frac{1}{3} \cdot Y1b^2 - \frac{1}{6} \cdot Y1b \cdot R \cdot \cos(\delta 1) - \frac{1}{6} \cdot R^2 \cdot \cos^2(\delta 1) \right) - \\ & - \frac{1}{2} R^3 \cdot \cos(\delta 1) \arctg \left(\frac{-Y1b + R \cdot \cos(\delta 1)}{\sqrt{R^2 - (-Y1b + R \cdot \cos(\delta 1))^2}} \right) - \frac{2}{5} \left(\frac{Y1b}{a} \right)^{5/2} a^2 + \frac{1}{3} R^3 \sin(\delta 1) + \\ & \left. + \frac{1}{4} R^3 \cdot \cos(\delta 1) (\pi - 2 \arccos(\cos(\delta 1))) + \frac{1}{6} R^3 \cdot \cos^2(\delta 1) \sin(\delta 1) \right]. \end{aligned} \quad (15)$$

Здійснивши підстановку (7), (9), (12) – (15) у рівняння (11), визначають положення центру ваги усієї суміші в системі координат X_1CV_1 .

Розглядаючи рух суміші і послідовну зміну положення вільної поверхні суміші (рис. 2), можна відзначити той факт, що для будь-якого положення завжди залишається вірним рівність $\alpha_1 + \delta_1 = \alpha_0 + \delta_0$. А отже, реальний кут α_1 , якого досягає вільна поверхня при провертанні барабана, перевищує кут α_0 тертя матеріалу у стані спокою і дорівнює $\alpha_1 = \alpha_0 + \delta_0 - \delta_1$.

Тоді, виконавши перенесення центру системи координат X_1CV_1 в точку O із її одночасним поворотом на кут α_1 , будемо мати положення центру ваги усієї суміші в системі координат XOY:

$$\begin{aligned} X &= X1 \cdot \cos(\alpha_0 + \delta 0 - \delta 1) - (Y1 - R \cdot \cos(\delta 1)) \cdot \sin(\alpha_0 + \delta 0 - \delta 1); \\ Y &= Y1 \cdot \sin(\alpha_0 + \delta 0 - \delta 1) + (Y1 - R \cdot \cos(\delta 1)) \cdot \cos(\alpha_0 + \delta 0 - \delta 1). \end{aligned} \quad (16)$$

Багатьма дослідниками [2, 3] приймається, що визначена вище площа ACBDF, яка складається з сегменту та краплеподібної фігури, є нерухомою по відношенню до барабана. Крім того, її потенційна енергія незмінна для будь-якого положення барабана і дорівнює енергії суміші, під час переходу від стану руху до стану спокою. Таким чином, приймаючи, що в даний момент кут сегменту становить δ_0 , а кут підйому суміші $\alpha = \alpha_2$, маємо мінімум потенційної енергії:

$$E_{\min} = -\frac{2}{3} \cdot R^3 \cdot \sin^3(\delta 0) \cdot (\cos(\alpha_2) - 1) \cdot l_i \cdot \rho \cdot g, \quad (17)$$

де l_i - довжина елементарної ділянки барабану; ρ - щільність матеріалу.

Потенційна енергія нерухомої відносно барабана частини суміші дорівнює

$$E = S_{full} \cdot l_i \cdot \rho \cdot g \cdot \left(Y + \frac{4/3 \cdot R \cdot \sin^3(\delta 0)}{2 \cdot \delta 0 - \sin(2\delta 0)} \right) \quad (18)$$

Прирівнюючи (17) і (18), одночасно підставивши Y з другого рівняння (16) та S_{full} з (10) і виконавши спрощення, матимемо

$$\begin{aligned} & \left[\frac{1}{2} R^2 (2\delta_1 - \sin(2\delta_1)) + \frac{1}{2} \sqrt{R^2 - (Y_1 b - R \cdot \cos(\delta_1))^2} (Y_1 b - R \cdot \cos(\delta_1)) - \right. \\ & \left. - \frac{1}{2} R^2 \cdot \arctg \left(\frac{-Y_1 b + R \cdot \cos(\delta_1)}{\sqrt{R^2 - (-Y_1 b + R \cdot \cos(\delta_1))^2}} \right) - \sin(\delta_1) \cdot \cos(\delta_1) - \frac{\pi}{2} + \arccos(\cos(\delta_1)) - \right. \\ & \left. - \frac{2}{3} \left(\frac{Y_1 b}{a} \right)^{3/2} a \right] \times \left[Y_1 \cdot \sin(\alpha_0 + \delta_0 - \delta_1) + (Y_1 - R \cdot \cos(\delta_1)) \cdot \cos(\alpha_0 + \delta_0 - \delta_1) + \frac{4/3 \cdot R \cdot \sin^3(\delta_0)}{2 \cdot \delta_0 - \sin(2\delta_0)} \right] = \\ & = -\frac{2}{3} \cdot R^3 \cdot \sin^3(\delta_0) \cdot (\cos(\alpha_2) - 1) \end{aligned} \quad (19)$$

Як бачимо, єдиним невідомим параметром даного рівняння є δ_1 . Але, оскільки (19) є трансцендентним відносно δ_1 , то розв'язати рівняння у символьному вигляді не є можливим. З іншого боку знання δ_1 дуже важливе, так як визначає характер розподілу і руху суміші в поперечному перерізі.

Спробуємо встановити якісний характер зміни δ_1 , задаючись певними значеннями конструктивних та технологічних параметрів:

$$R = 1 \text{ м}; \omega = 0,5\omega_{кр} = 1,57 \text{ рад/с}; \delta_0 = 80^\circ; \alpha_0 = 35^\circ; l_i = 2 \text{ м}; \rho = 2400 \text{ кг/м}^3; g = 9,81 \text{ м/с}^2.$$

Для пошуку розв'язку рівняння (19) відносно δ_1 побудуємо його графік, виконавши перенесення вправо лівої частини рівняння (19), (тобто, $E_{min} - E$).

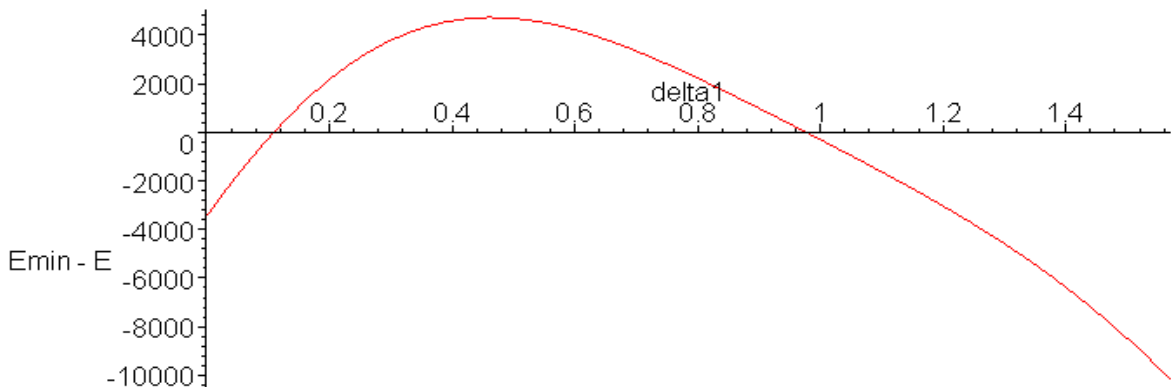


Рис. 5. Графік рівняння $E_{min} - E$ в залежності від значення кута δ_1

Знайдемо чисельне вирішення рівняння (19) на інтервалі від 0 до δ_0 . При цьому нас цікавить значення максимально близьке до δ_0 (як видно з рис. 5, існує ще один корінь δ_1 , який приблизно дорівнює 7° , але очевидно, що він не підходить). Маємо $\delta_1 = 0,976 \text{ рад} = 56^\circ$.

Таким чином, можна констатувати той факт, що в області найбільш вживаних значень частоти обертання ($\omega = 0,5\omega_{кр}$) центральний кут сегменту зменшується практично на 30%, а площа частини суміші, нерухомої відносно барабана, зменшується для прийнятих вище значень з $1,22 \text{ м}^2$ (рис. 2, а) до $0,763 \text{ м}^2$ (фігура ACBDF на рис. 1), тобто на 38%. Ці 38% від загальної частини суміші переводяться до рухомої частини, що скидається по параболічній траєкторії або зсувається по похилій площині вздовж межі розділу АСВ. Очевидно, що із збільшенням кутової швидкості кількість матеріалу, яка переводиться в рух, постійно зростає, а форма перерізу суміші, нерухомої по відношенню до барабана, змінюється від сегментної до краплеподібної. Для підтвердження цієї думки

побудуємо графік залежності кута δ_1 для різних значень кутової швидкості обертання барабана (рис. 6).

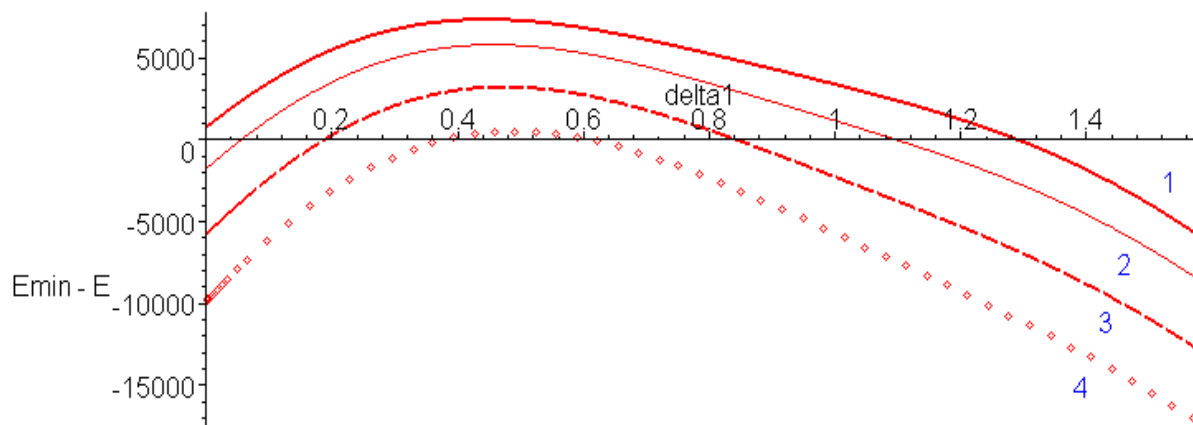


Рис. 6. Графік зміни центрального кута δ_1 сегменту при зміні кутової швидкості обертання барабана: 1 – $\omega = 0,1\omega_{кр}$; 2 – $\omega = 0,4\omega_{кр}$; 3 – $\omega = 0,6\omega_{кр}$; 4 – $\omega = 0,73\omega_{кр}$

Аналіз графіків на рис. 6 свідчить, що із збільшенням кутової швидкості величина δ_1 зменшується від δ_0 до найменшого значення, яке завжди більше нуля (для нашого випадку воно близьке до 0,5 рад).

Треба зазначити, що наведена методика дозволяє досить точно визначити як енергію, яка витрачається на перемішування, так і розподіл суміші в поперечному перерізі барабана. У випадку розгляду машин з нециліндричним робочим органом та сама процедура виконується в напрямку третьої координатної вісі, враховуючи при цьому кут нахилу барабана до горизонту. Виконуючи розрахунки, починаючи з вільного завантажувального отвору, вдається чітко визначити положення суміші в барабані та взаємовплив незалежних осьових потоків, що створюються як різними частинами барабана, так і внутрішніми змішувальними органами.

Література

1. Науменко Ю.В. Режимы движения сыпучего материала в горизонтальном вращающемся цилиндре // Изв. вузов. Горн. журн. – 1996. - №2. - С.105-110.
2. Першин В.Ф. Исследование, разработка и методика расчета режимных и геометрических параметров машин барабанного типа. – Автореферат дис. канд. техн. наук. – М., 1979.
3. Свиридов М.М. Исследование движения сыпучего материала на внутренних устройствах машин с вращающимися барабанами. – Автореферат дис. канд. техн. наук. – М., 1976.
4. Назаренко І.І. Машини для виробництва будівельних матеріалів. – К.: КНУБА, 1999. – 485 с.
5. Ярошинский Г.К. Влияние параметров гравитационного бетоносмесителя непрерывного действия на качество бетонной смеси// Исследование рабочих процессов строительных и дорожных машин.– Л.: ЛИСИ. – 1971. – в.67. С.34-38.
6. Семенченко В.З. Определение кинематических параметров потока бетонной смеси в барабане гравитационного бетоносмесителя// Тр. ВНИИСтройдормаш, 1987.