

## **ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОСМНОСТІ РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ ЗМІШУВАЧА ГІДРОПРИВІДНОГО ШТУКАТУРНОГО АГРЕГАТУ АШГ-4**

*Запропоновано та математично обґрунтовано методикау визначення потужності, котра витрачається на приготування розчинової суміші. Розглянуто закономірності зв'язку оптимальних параметрів експлуатації, режимів роботи та конструктивних особливостей комбінованого робочого органу гідропривідного штукатурного агрегату АШГ-4.*

**Ключові слова:** математична модель, АШГ-4, комбінований шнек, змішування.

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями.** Одним з головних завдань змішування будівельних сумішей є досягнення максимально можливої рівномірності розподілу компонентів, завантажених до змішувального бункера розчинозмішувача за мінімальних енергетичних витрат.

Найбільш розповсюдженими конструкціями робочих органів існуючих розчинозмішувачів є лопатеві, гвинтові, а також комбіновані лопатєво-гвинтові змішувачі, які забезпечують відносно переміщення часток компонентів розчинової суміші, здійснюючи обертовий рух у вертикальній чи горизонтальній площинах, та доводячи розчин до товарного стану.

При цьому існує залежність рівня потужності, яка витрачається на змішування, від режимів роботи робочих органів, а також конструктивних особливостей елементів обладнання [1].

**Огляд останніх джерел досліджень і публікацій.** Відповідно до держбюджетної науково-дослідницької теми №72/09 „Створення та впровадження у будівельне виробництво мобільного гідропривідного штукатурного агрегату” тривають наукові дослідження щодо створення ефективного обладнання з приготування штукатурних розчинів, яке б повністю відповідало вимогам сучасності [2, 3].

Так, в Полтавському національному технічному університеті імені Юрія Кондратюка у результаті проведення багаторічної науково-дослідницької роботи під керівництвом доктора технічних наук, професора Онищенка Олександра Григоровича вперше в Україні було створено та впроваджено у виробництво мобільні малогабаритні штукатурні установки (штукатурні агрегати), призначені для приготування, механізованого транспортування й нанесення штукатурних розчинів. До таких установок належить штукатурний гідравлічний агрегат АШГ-4 з комбінованим (шнеково-лопатєвим) типом робочого обладнання [4, 5].

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Однак існує необхідність у встановленні оптимальних параметрів та режимів роботи комбінованого змішувача, які створять найбільш ефективний процес змішування при найменших витратах електричної енергії.

**Постановка завдання.** Метою роботи є створення математичної моделі взаємодії комбінованого змішувача штукатурного агрегату АШГ-4 з перемішуваним

середовищем та визначення потужності, котра витрачається на приготування розчинової суміші.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Визначення потужності, котра витрачається на приготування розчинової суміші комбінованим шнеком в бункері змішувача, слід розглядати з точки зору здійснення приготування лопатками шнека, стрічкою змішувача, а також сумісної роботи лопаті та стрічки.

При визначення потужності, котра витрачається на здійснення робочих рухів лопатками шнека, слід враховувати той факт, що критерієм змішування розчинової суміші у бункері штукатурного агрегату є ефективність переміщення її часток одна відносно іншої. У випадку, коли змішування призводить до руху часток в різних напрямках, спостерігається покращення результату приготування розчинів.

Задля знаходження оптимального діапазону кута нахилу додаткових лопаток шнека візьмемо крайові умови його значень.

Позначимо кут нахилу лопаток –  $u$ .

а) При  $u = 0$  характер взаємодії часток з лопатками має вигляд (рисунок 1).

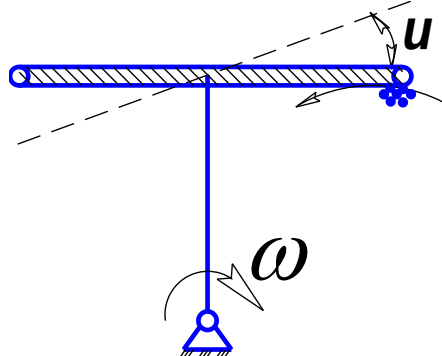


Рисунок 1 – Характер взаємодії часток розчину з лопатками про куті розвороту лопатки  $u = 0^{\circ}$ :  $\omega$  – кутова швидкість обертання шнека змішувача

Частинки розчину проковзують по поверхні лопатки. Тому процес перемішування практично не відбувається.

б) При  $u = 90^{\circ}$  характер взаємодії часток з лопатками має вигляд (рисунок 2).

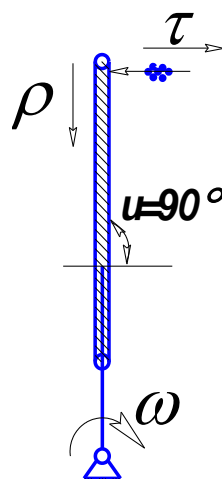


Рисунок 2 – Характер взаємодії часток розчину з лопатками про куті розвороту лопатки  $u = 90^{\circ}$ :

$\omega$  – кутова швидкість обертання шнека змішувача;  $\tau$ ,  $\rho$  – напрямки зон збудження, де відбувається переміщення часток розчину одна відносно іншої

Як бачимо з рисунку, зони збудження йдуть по контуру лопатки тільки в напрямку  $\tau$ .

в) При довільному куті  $u$  характер взаємодії часток з лопатками має вигляд (рисунок 3).

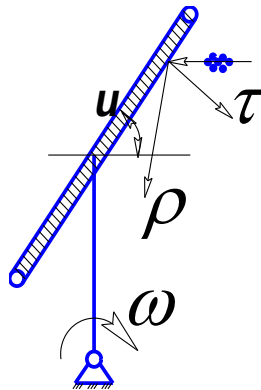


Рисунок 3 – Характер взаємодії часток розчину з лопатками про довільному куті розвороту лопатки  $u$ :

$\omega$  – кутова швидкість обертання шнека змішувача;  $\tau, \rho$  – напрямки зон збудження, де відбувається переміщення часток розчину одна відносно іншої

В цьому випадку частинка суміші відбивається від лопатки і переміщується у напрямку, котрий складається з двох складових: тангенціальної  $\tau$  та радіальної  $\rho$ .

Чисельним критерієм ефективності перемішування виступає потужність ротора поля збудження швидкості.

Запишемо  $rot \bar{v}$ .

$$rot \bar{v} = \begin{vmatrix} i & j & k \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ v_x & v_y & v_z \end{vmatrix}. \quad (1)$$

Проаналізуємо поле швидкостей, яке утворюється під дією лопатки (рисунок 4).

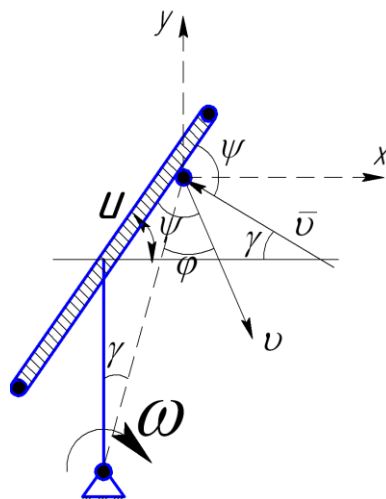


Рисунок 4 – Поле розподілу швидкостей:

$u$  – кут розвороту лопатки;  $\gamma$  – кут, який характеризує положення частинки суміші

На рисунку 4:

$$\psi = \gamma + \nu, \quad (2)$$

$$\cos \varphi = \sin(2\nu + \gamma). \quad (3)$$

Складові швидкості частинки, котра відбилася від лопатки знаходяться в залежностях:

$$v_\rho = \sin(2\nu + \gamma) \cdot l \left( \frac{\cos(\gamma + \nu)}{\cos \nu} \right) \omega \cdot k_{f\rho}, \quad (4)$$

$$v_\tau = \cos(2\nu + \gamma) \cdot l \left( \frac{\cos(\gamma + \nu)}{\cos \nu} \right) \omega \cdot k_{f\tau}. \quad (5)$$

Радіальна складова має екстремум по  $\nu$ . Знайдемо його:

$$\left[ \frac{(\sin(2\nu + \gamma))(\cos(\gamma + \nu))}{\cos \nu} \right]' = \frac{2 \cos(2\nu + \gamma) \cos(\gamma + \nu)}{\cos \nu} + \frac{\sin(2\nu + \gamma)(-\sin(\gamma + \nu))}{\cos \nu} + (\sin 2\nu + \gamma)(\cos(\gamma + \nu)) \frac{\sin \nu}{\cos^2 \nu} = 0. \quad (6)$$

При  $\gamma = 0$  рішення буде  $\nu = 45^\circ$  оптимальний кут нахилу буде:

$$45^\circ \leq \delta \leq \delta(\gamma_{\max}). \quad (7)$$

Підрахуємо поле швидкостей потоку, яке штовхає перед собою лопатка.

Поле швидкостей частинок розчину, які набігають на лопатку, має вигляд:

$$\bar{v} = (+\omega y, -\omega x, \bar{v}_n), \quad (8)$$

де  $\omega$  – кутова швидкість вала;

$(x, y)$  – координати частинок розчину в площині  $(x, y)$ .

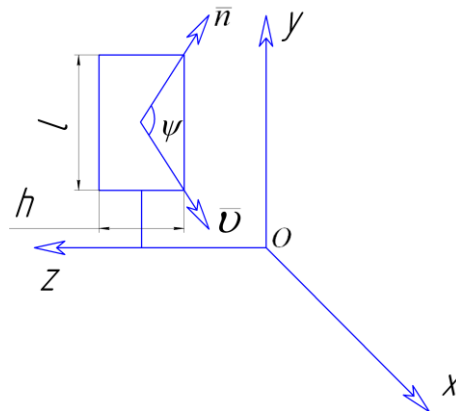


Рисунок 5 – Розподіл поля швидкостей частинок розчину, які набігають на лопатку:  
 $\bar{n}$  – нормаль до лопатки ( $\bar{n} \perp OZ$ )

Позначимо потік розчину, котрий збуджується лопатками через  $\Pi$ . Звідси запишемо:

$$\Pi = \int \int_S \bar{v} \cdot \bar{n} ds; \quad (9)$$

де  $S$  – поверхня лопатки.

Потік  $\Pi$  – це сума проєкцій поля  $\bar{v}$  через відповідні проєкції площадки  $S$  на координатні площини.

$$\Pi = \int_{S_{yz}} \bar{v}_x dy dz + \int_{S_{xz}} \bar{v}_y dx dz + \int_{S_{xy}} \bar{v}_z dx dy . \quad (10)$$

Так як  $S_{xy}$  є відрізком, то останній доданок виразу (10) дорівнює  $O$ .

$$\int_{S_{xy}} \bar{v}_z dx dy = 0. \quad (11)$$

Проекція поля  $\bar{v}$  через проекцію площадки  $S$  на координатну площину  $yz$  зображена на рисунку 6.

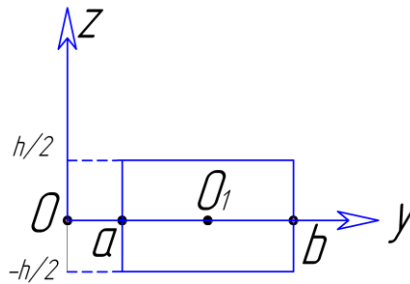


Рисунок 6 – Проекція поля  $\bar{v}$  через проекцію площадки  $S$  на координатну площину  $yz$ :  
 $OO_1 = l_1$  – ніжка лопатки;  $h$  – ширина лопатки

На цьому рисунку:

$$a = l_1 - \frac{l}{2} \cos \psi ; \quad (12)$$

$$b = l_1 + \frac{l}{2} \cos \psi ; \quad (13)$$

де  $l$  – висота лопатки;

$\psi$  – кут між нормаллю до лопатки та напрямком руху частинки розчину (рисунок 5).

Звідси одержуємо вираз:

$$\int_{S_{yz}} +\omega y dy dz = +\omega \int_{-h/2}^{h/2} dz \int_a^b y dy = +\omega h \cdot \frac{(l_1 + \frac{l}{2} \cos \psi)^2 - (l_1 - \frac{l}{2} \cos \psi)^2}{2} = +\omega h \cdot l_1 l \cos \psi . \quad (14)$$

Проекція поля  $\bar{v}$  через проекцію площадки  $S$  на координатну площину  $zx$  зображена на рисунку 7.

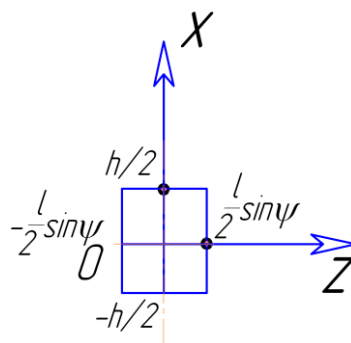


Рисунок 7 – Проекція поля  $\bar{v}$  через проекцію площадки  $S$  на координатну площину  $zx$   
 Аналізуючи подібним чином рисунок 7 одержимо:

$$\int_{S_{zx}} \omega x dx dz = \omega \int_{-h/2}^{h/2} dz \int_{-\frac{l}{2} \ln \psi}^{\frac{l}{2}} x dx = 0. \quad (15)$$

Зважаючи на результати чисельних спостережень, в узагальненому плані характер просування лопаткою розчину можна зобразити у вигляді, як показано на рисунку рисунку 8:

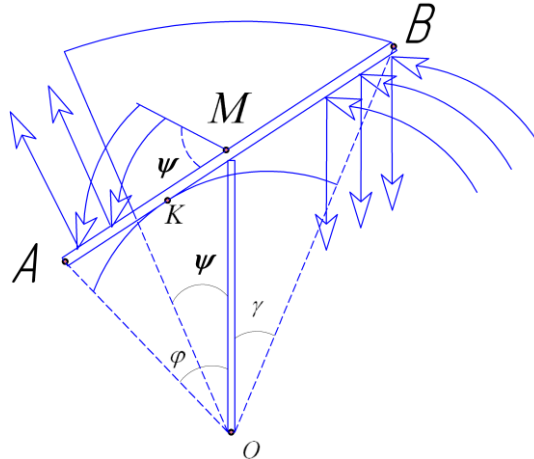


Рисунок 8 – Потік, котрий штовхає перед собою лопатка

Лопатка АВ буде штовхати перед собою потік, який складається з двох частин –  $KB \cup AK$  (рисунок 8).

$$\Pi(KB) = h \int_{OK}^{OB} v dz = h \int_{l_1 \cos \psi}^{\frac{l_1 \cos \psi - l}{\cos(\psi + \gamma)}} \omega z dz = h \omega \frac{l_1^2 \cos^2 \psi}{2} \left( \frac{1}{\cos^2(\psi + \gamma)} - 1 \right). \quad (16)$$

Перетворюючи, одержимо:

$$\Pi(AK) = h \int_{OK}^{OA} v dz = h \int_{l_1 \cos \psi}^{\frac{l_1 \cos \psi - l}{\cos(\varphi - \psi)}} \omega z dz = h \omega \frac{l_1^2 \cos^2 \psi}{2} \left( \frac{1}{\cos^2(\varphi - \psi)} - 1 \right). \quad (17)$$

Остаточно запишемо:

$$\Pi_{\text{ш}} = \frac{\omega h l_1^2 \cos^2 \psi \left( \frac{1}{\cos^2(\psi + \gamma)} + \frac{1}{\cos^2(\varphi - \psi)} - 2 \right)}{2}. \quad (18)$$

Як відомо, потужність, котра витрачається на перемішування часток розчину лопатками, витрачається в двох напрямках:

- на переміщення частинок розчину, котрі штовхає перед собою лопатка (1);
- на подолання сил тертя шарів розчину між собою (2).

Тобто енергія потоку за одиницю часу, або ж потужність, котра витрачається на створення лопаткою потоку розчину, визначатиметься виразом:

$$\begin{aligned} P_{\text{ш1}} &= \int (\rho v ds) \frac{v^2}{2} = \frac{\rho \omega^3 h}{2} \left[ \int_{l_1 \cos \psi}^{\frac{l_1 \cos \psi - l}{\cos(\psi + \gamma)}} z^3 dz + \int_{l_1 \cos \psi}^{\frac{l_1 \cos \psi - l}{\cos(\varphi - \psi)}} z^3 dz \right] = \\ &= \frac{\beta \rho h \omega^3 l_1^4 \cos^4 \psi}{8} \left[ \frac{1}{\cos^4(\psi + \gamma)} + \frac{1}{\cos^4(\varphi - \psi)} - 2 \right], \text{ Вт}; \end{aligned} \quad (19)$$

де  $\beta$  – відносний коефіцієнт швидкості переміщення часток розчину, котрий потребує експериментального визначення.

Перевіримо розмірність  $\frac{\kappa z \cdot M \cdot M^4}{M^3 c^3} = (\kappa z \cdot \frac{M}{c^2}) \frac{M}{c} = h \cdot \frac{M}{c} = \text{Вт}$ .

Енергія потоку за одиницю часу, котра витрачається на подолання сил тертя шарів розчину між собою визначатиметься виразом:

$$P_{\text{л2}} = \iint \nu \tau ds = (\tau_0 + \eta \omega) \omega z = (\tau_0 + \eta \omega) \omega h \left[ \int_{l_1 \cos \psi}^{l_1 \frac{\cos \psi}{\cos(\psi + \gamma)}} z dz + \int_{l_1 \cos \psi}^{l_1 \frac{\cos \psi}{\cos(\gamma - \psi)}} z dz \right] = \tag{20}$$

$$\frac{l_1 (\tau_0 + \eta \omega) \omega}{2} [l_1^2 \cos^2 \psi] \left[ \frac{1}{\cos^2(\psi + \gamma)} + \frac{1}{\cos^2(\gamma - \psi)} - 2 \right], \text{Вт}.$$

Перевіримо розмірність  $m \cdot \frac{\text{Па}}{c} \cdot m^2 = \text{Вт}$ .

Потужність, котра витрачається на перемішування часток розчину, буде визначатися як сума:

$$P_{\text{л}} = P_{\text{л1}} + P_{\text{л2}}, \text{Вт}.$$

При визначення потужності, котра витрачається на здійснення робочих рухів стрічки шнека змішувача, розглянемо її роботу.

Елементарна ділянка шнекової стрічки наведена на рисунку 9.

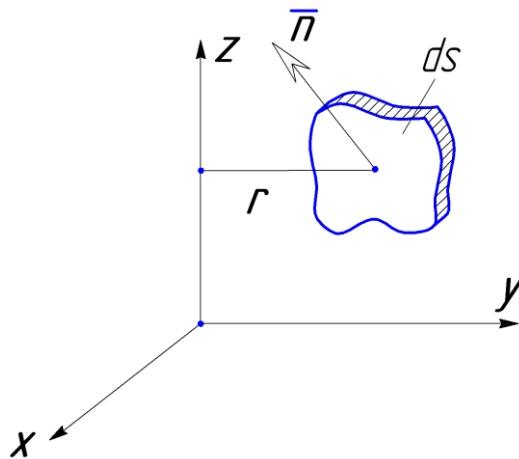


Рисунок 9 – Елементарна ділянка робочої поверхні шнека:

$\bar{n}$  – нормаль ( $\bar{n}(\cos \phi, 0, \sin \phi)$ );  $r$  – радіус обертання елементарної ділянки відносно поздовжньої вісі шнека

Запишемо векторні поля швидкостей  $\bar{v}(\omega r x, 0, -\omega r z)$ .

Тоді потік перед ділянкою стрічки буде дорівнювати:

$$\Pi = \iint_S \bar{v} \cdot \bar{n} ds = \iint_S (\omega r x \cos \phi - \omega r z \sin \phi) ds. \tag{22}$$

Значимо, що потужність, котра витрачається на перемішування часток розчину шнеком, витрачається в двох напрямках:

- на переміщення частинок розчину, котрі штовхає перед собою стрічка шнека (1);
- на подолання сил тертя шарів розчину між собою (2).

Тоді розрахунок потужності, котра витрачається на перемішування часток розчину шнеком, матиме наступний порядок.

Переходимо в циліндричну систему для підрахунку потужності:

$$P_{c1} = \rho \cdot \beta \int \int_S (\omega r x \cos \varphi - \omega r \sin \varphi) \frac{|v^2|}{2} ds =$$

$$= \frac{\rho \beta}{2} \int_{R_1}^{R_2} \omega^3 r^3 dz \int_0^{l_c} dz = \frac{\rho \beta}{2} \omega^3 \left( \frac{R_2^4}{4} - \frac{R_1^4}{4} \right) \cdot l_c, \quad (23)$$

де  $l_c$  – довжина стрічки в розгорнутому стані.

Остаточно одержимо:

$$P_{c1} = \frac{\rho \beta \omega^3}{8} (R_2^4 - R_1^4) \cdot l_c. \quad (24)$$

Перевіряємо розмірність:  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \frac{1}{\text{с}^3} \text{м}^4 \text{м} = \left( \frac{\text{кг}}{\text{с}^2} \frac{\text{м}}{\text{с}} \right) \frac{\text{м}}{\text{с}} = \text{м} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}} = \text{Вт}$

$$P_{c2} = \int \int (\tau_0 + \eta \frac{dv}{dn}) v ds = (\tau_0 + \eta \omega) \omega \cdot l_c \int_{R_1}^{R_2} r dr = \frac{(\tau_0 + \eta \omega) \omega l_c}{2} (R_2^2 - R_1^2). \quad (25)$$

Перевіряємо розмірність:  $\frac{\text{Па}}{\text{с}} \cdot \text{м} \cdot \text{м}^2 = \text{Вт}$ .

$$P_c = P_{c1} + P_{c2}, \text{ Вт}. \quad (26)$$

При визначення потужності, котра витрачається на сумісну роботу лопатей та стрічки шнека, необхідно обґрунтувати математично сумісну роботу вказаних елементів у змішувачі, так як, вочевидь, простим додаванням потужності, котра прикладається до цих робочих органів, її визначити неможливо. І лопаті і стрічка частково допомагають одна одній перемішувати потоки розчину у змішувачі, а це потребує математичної інтерпретації.

На рисунку 10 зображені елементарні ділянки стрічки та поверхні лопатки, а також поля швидкостей від них.

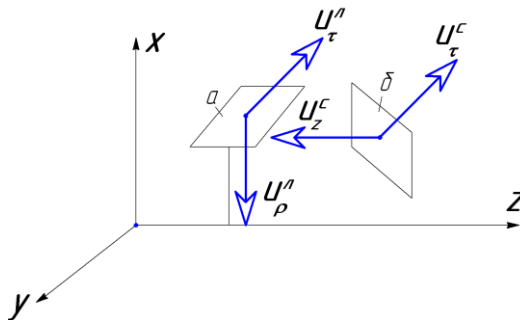


Рисунок 10 – Елементарні ділянки стрічки та поверхні лопатки, а також поля швидкостей від них:

$a$  – елементарна ділянка лопатки;  $b$  – елементарна ділянка стрічки

Поле швидкості від лопатки залежить від наступних складових:  $\bar{u}_a(u_\rho^a, u_\tau^a, 0)$ .

Поле швидкості від стрічки має наступний склад:  $\bar{u}_b(0, u_\tau^b, u_z^b)$ .

Загальна потужність на переміщення потоків розчину не буде дорівнювати  $P_a + P_b$ , а буде дещо меншою, так як по складовій  $u_\tau$  потоки розчину співпадають.

Якщо потужності розбити по компонентах полів швидкості, одержимо вирази:



$$\bar{P}_l = (P_l \cos \psi, P_l \sin \psi, 0); \quad (27)$$

$$\bar{P}_c = (0, P_c \cos \alpha, P_c \sin \alpha). \quad (28)$$

Повна потужність визначатиметься виразом:

$$\bar{P} = (P_l \cos \psi, P_{lc}, P_c \sin \alpha). \quad (29)$$

Ефект зменшення об'єднаної потужності повинен проявитися на компоненті  $P_{lc}$ .

Фактично потік в тангенціальному напрямку буде рухатись по циклу лопатка-стрічка-лопатка-стрічка і т.п. Тоді лопатка або стрічка буде зустрічати потік з ненульовою швидкістю, а з точки зору відносної швидкості це означає, що у виразах  $P_l \sin \psi$  та  $P_c \cos \alpha$  зменшиться величина  $\omega$ .

Тоді, для  $P_l \sin \psi$ :

$$\omega_l = \omega_0 \left( 1 - \frac{S_{lc}}{S_c} \right). \quad (30)$$

Для  $P_c \cos \alpha$ :

$$\omega_c = \omega_0 \left( 1 - \frac{S_{lc}}{S_l} \right). \quad (31)$$

Розподіл потужності по компонентах швидкості буде наступним:

$$\bar{P} = \left( P_l \cos \psi; P_l \sin \psi \left( 1 - \frac{S_{lc}}{S_c} \right) + P_c \cos \alpha \left( 1 - \frac{S_{lc}}{S_l} \right); P_c \sin \alpha \right). \quad (32)$$

Звідси фізична потужність буде визначатись виразом

$$P = \sqrt{n(P_l \cos \psi)^2 + \left( nP_l \sin \psi \left( 1 - \frac{S_{lc}}{S_c} \right) + P_c \cos \alpha \left( 1 - \frac{S_{lc}}{S_l} \right) \right)^2 + (P_c \sin \alpha)^2} =$$

$$= \sqrt{nP_l^2 + P_c^2 + nP_l^2 \sin^2 \psi \cdot \left( \frac{S_{lc}}{S_c} \right)^2 + P_c^2 \cos^2 \alpha \cdot \left( \frac{S_{lc}}{S_l} \right)^2 - 2nP_l^2 \sin^2 \psi \frac{S_{lc}}{S_c} -$$

$$- 2P_c^2 \cos^2 \alpha \frac{S_{lc}}{S_l} + 2nP_l P_c \sin \psi \cdot \cos \alpha \left( 1 - \frac{S_{lc}}{S_c} \right) \left( 1 - \frac{S_{lc}}{S_l} \right)}, \quad (33)$$

де  $n$  – кількість лопаток у змішувачі.

Зважаючи на те, що запис рівняння (33) у повному вигляді, з урахуванням усіх його складових, дає досить громіздкий вираз, пропонується для визначення цього параметра використовувати математичний пакет «Maple».

### Висновки

Користуючись запропонованою методикою визначення потужності, котра витрачається на сумісну роботу лопатей та стрічки шнека змішувача штукатурного агрегату АШГ-4, можемо одержувати її розрахункове значення залежно від різних параметрів експлуатації, що дасть можливість виявити оптимальні режими експлуатації установки.

### Література

1. *Механізація опоряджувальних робіт у будівництві* / О.Г. Онищенко, Б.Ф. Драченко, О.В. Головкін. – К.: Урожай, 1988. – 320 с.

2. Малогабаритна розчино змішувальна установка з гідравлічним приводом / О.Г. Онищенко, А.М. Матвієнко, В.В. Вірченко // Збірник наукових праць (Галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава: ПолтНТУ, 2009. – Вип. 23, Т.1. – С. 24-28.

3. Розчинозмішувальна установка УРЗ-04 / О.Г. Онищенко, С.В. Попов, В.У. Уст'янець // Збірник наукових праць (Галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава: ПолтНТУ, 2005. – Вип.15. – С. 3-7.

4. Дослідження енергоємності робочих процесів малогабаритних розчино змішувальних установок / О.Г. Онищенко, А.М. Матвієнко, В.В. Вірченко // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДУ, 2010. – Вип. 5/2010 (64) частина 1. – С. 121-124.

5. Приготування будівельних розчинових сумішей за допомогою ефективних змішувачів / В.В. Вірченко // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КНУ, 2011. – Випуск 1 (66), частина 1. – С. 71-74.

Надійшла до редакції 27.10.2012

© Б.О. Коробко, А.М. Матвієнко, В.В. Вірченко

**Б.О. Коробко, к.т.н., доц., А.М. Матвієнко, к.т.н., доц.  
В.В. Вірченко, асистент**

***Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка***

#### **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОЕМКОСТИ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ СМЕШИВАТЕЛЯ ГИДРОПРИВОДНОГО ШТУКАТУРНОГО АГРЕГАТА АШГ-4**

*Предложена и математически обоснована методика определения мощности, которая расходуется на приготовление растворной смеси. Рассмотрены закономерности связи оптимальных параметров эксплуатации, режимов работы и конструктивных особенностей комбинированного рабочего органа гидروприводного штукатурного агрегата АШГ-4.*

**Ключевые слова:** математическая модель, АШГ-4, комбинированный шнек, смешивание.

**B.O. Korobko, Ph.D., A.M. Matvienko, Ph.D., V.V. Virchenko, Assistant**

***Poltava National Technical University named after Yuri Kondratyuk***

#### **THEORETICAL RESEARCHES OF LABOR BODY WORK PROCESSES ENERGY CAPACITY OF HYDRAULIC PLASTERING MACHINE ASHG-4**

*Proposed and mathematically justified method of definition power, which spent to producing mixing solution. Optimal exploitation parameters, modes of work and constructive features of hydraulic plastering machine ASHG-4 combined labor body connection regularity considered.*

**Key words:** mathematical model, ASHG-4, combined screw, mixing.