

*О.Г. Онищенко, д. т. н., проф., І.А. Розозін, аспірант, С.Б. Бейгул, к.е.н., асист.
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка*

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПРИГОТУВАННЯ ШТУКАТУРНИХ РОЗЧИНІВ У РОЗЧИНОЗМІШУВАЧІ З ВЕРТИКАЛЬНИМ ШНЕКОВИМ РОБОЧИМ ОРГАНОМ

Розглядається питання визначення сил опору, що виникають при роботі розчинозмішувача з вертикальним шнековим робочим органом, а також запропонована методика встановлення споживаної потужності привода змішувача. З'ясовано вплив геометричних параметрів змішувача та реологічних властивостей будівельної розчинної суміші на величину споживаної потужності.

Ключові слова: розчинозмішувач, шнек, сили опору, споживана потужність.

Рассматривается вопрос определения сил сопротивления, которые возникают при работе растворосмесителя с вертикальным шнековым рабочим органом, а также предлагается методика определения потребляемой мощности привода смесителя. Определено влияние геометрических параметров смесителя и реологических свойств строительной растворной смеси на величину потребляемой мощности.

Ключевые слова: растворосмеситель, шнек, силы сопротивления, потребляемая мощность.

The definition question of resistance forces that arise at work of the mortar mixer with vertical screw working body is considered, and also the definition technique of power consumption of the mixer drive is offered. An influence of geometrical parameters of the mortar mixer and rheological properties of a mortar on the quantity of power consumption is found out.

Key words: mortar mixer, screw, resistance forces, power consumption.

Постановка проблеми у загальному вигляді. Проектування змішувачів примусової дії з вертикальним шнековим робочим органом потребує визначення потужності привода, необхідної для приготування будівельних розчинних сумішей. Для цього необхідно з'ясувати механізм взаємодії робочого органа змішувача з будівельною розчинною сумішшю та визначити сили опору, що виникають у процесі роботи. Це дасть змогу здійснювати раціональний вибір геометричних параметрів установки залежно від характеристик середовища, що перемішується.

Визначення споживаної приводом змішувача потужності є досить складним процесом і залежить від великої кількості факторів [1, 2, 3]. Це

конструктивні особливості установки та геометричні співвідношення між її елементами, режими роботи, ступінь заповнення бункера будівельною розчинною сумішшю, послідовність і порядок подачі в установку компонентів суміші та властивості середовища, що перемішується.

Аналіз останніх досліджень, де започатковано розв'язання проблеми. Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується стаття. Відомі такі методики розрахунку змішувачів примусової дії [1, 2, 6]: за допомогою безрозмірного коефіцієнта гідравлічного опору, за допомогою коефіцієнта питомого опору незворотного деформування одиниці об'єму суміші, за допомогою критеріальних рівнянь на основі теорії подібності. Також існує методика розрахунку потужності лопатевого змішувача з горизонтальним розташуванням вала шляхом визначення сил опору, що діють на одну занурену в будівельну розчинну суміш лопатку [3].

Але дані методики розроблялися переважно для розрахунку бетоно- або асфальтозмішувачів, тому їх використання для розрахунків розчинозмішувачів потребує детального аналізу та внесення змін з урахуванням особливостей їх роботи.

Більш близькою у даному випадку є методика розрахунку горизонтального шнекового розчинозмішувача [7], але його умови роботи суттєво відрізняються від вертикальних змішувачів.

Мета роботи. Метою статті є підвищення ефективності робочих процесів, що відбуваються у змішувачах примусової дії з вертикальним робочим органом, за рахунок вибору їх раціональних геометричних параметрів; зниження енерговитрат і металоємності даних установок.

Виклад основного матеріалу. Рух робочого органа змішувача у будівельній розчинній суміші відбувається з виникненням складних фізичних явищ [1, 2, 3]. Стрічка шнека має кут нахилу до горизонтальної площини і виконує переміщення суміші за напрямом свого обертання та у вертикальному напрямі, підіймаючи її по зовнішньому радіусу бункера у зоні дії робочого органа. Об'єм піднятої стрічкою шнека суміші заповнюється її масами, які переміщуються з внутрішньої центральної частини бункера до зовнішньої частини під стрічку, таким чином здійснюється радіальне переміщення. При роботі змішувача відбувається ковзання часток будівельної розчинної суміші по робочому органу, по стінках бункера й по його дну, зсув по внутрішній кромці стрічки шнека. Усе це створює циркуляцію мас суміші та її перемішування.

Аналіз фізичного процесу, котрий відбувається у змішувачі, показує, що основними складовими опору руху вертикального шнекового робочого органа в масі будівельної розчинної суміші будуть: тертя суміші по стрічці шнека та по стінках і дну бункера, зсув мас суміші по внутрішній кромці

стрічки шнека. Ці складові опору залежать від властивостей будівельної розчинної суміші, геометричних параметрів змішувача та його режиму роботи, ступеня заповнення бункера.

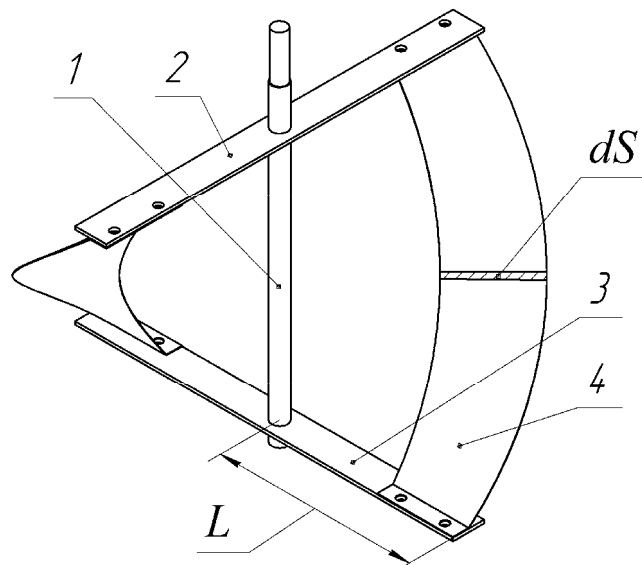


Рисунок 1 – Загальний вигляд вертикального шнекового робочого органу:
1 – вал; 2 – верхній кронштейн; 3 – нижній кронштейн; 4 – стрічка шнека

Знайдемо загальну силу опору рухові вертикального шнекового робочого органу розчинозмішувача. Вона буде складатися із сил опору, що діють на нижній кронштейн довжиною L , та сил опору, прикладених до елементарної ділянки dS стрічки шнека (рис. 1). Прийmemo, що на поверхні суміш усереднено розміщується у горизонтальній площині, а положення елементарної ділянки dS задається відстанню від дна бункера l .

Сили опору рухові нижнього кронштейна (рис. 2):

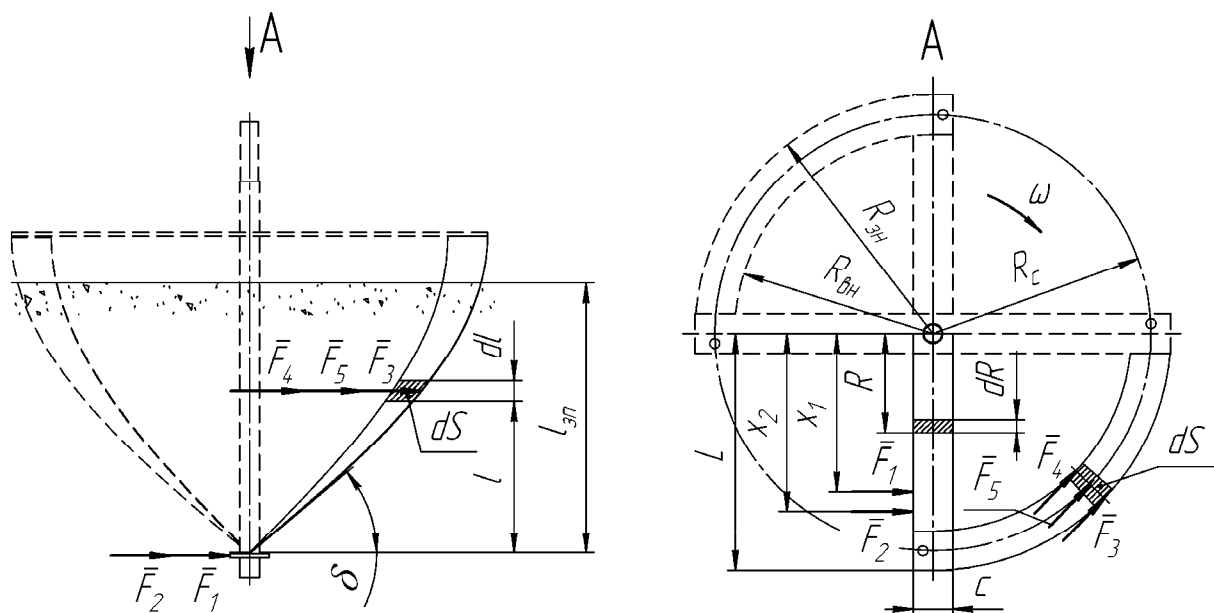


Рисунок 2 – Схема сил, що діють на робочий орган змішувача

1. Сила опору F_1 тертя будівельної розчинної суміші, яка переміщується нижнім кронштейном, по дну бункера внаслідок тиску суміші на дно від складової власної ваги G_1

$$F_1 = k_f \cdot G_1, \quad (1)$$

де k_f – коефіцієнт тертя будівельної розчинної суміші по дну бункера;
 G_1 – вага будівельної розчинної суміші, що переміщується нижнім кронштейном, Н.

2. Сила лобового опору F_2 нижнього кронштейна, яка виникає внаслідок його руху в будівельній розчинній суміші з лінійною швидкістю v_o [4],

$$F_2 = C_{Dc} \cdot \rho \cdot \frac{v_o^2}{2} \cdot R \cdot c, \quad (2)$$

де C_{Dc} – коефіцієнт повного лобового опору кронштейна;
 ρ – густина будівельної розчинної суміші, кг/м³;
 v_o – лінійна швидкість руху нижнього кронштейна у будівельній розчинній суміші, м/с;

c – розмір нижнього кронштейна у тангенційному напрямку, м;

R – розмір нижнього кронштейна у радіальному напрямку, м.

Для плоскої пластини (якою є кронштейн), що обтікається будівельною розчинною сумішшю у поздовжньому напрямку, коефіцієнт повного лобового опору C_{Dc} становить

$$C_{Dc} = 2 \cdot C_f, \quad (3)$$

де C_f – коефіцієнт опору тертя, який в умовах роботи розчинозмішувача [1,4] буде дорівнювати

$$C_f = \frac{1,328}{\sqrt{Re_l}} + \frac{4,12}{Re_l}, \quad (4)$$

де Re_l – число Рейнольдса.

Тоді силу лобового опору F_2 після підстановки значення Re_l у формулу (4) можна записати у такому вигляді:

$$F_2 = R \cdot \left(1,328 \cdot \sqrt{\rho \cdot c \cdot \mu \cdot v_o^3} + 4,12 \cdot \mu \cdot v_o \right), \quad (5)$$

де μ – динамічна в'язкість будівельної розчинної суміші, Па·с.

Значення лінійної швидкості руху v_o кронштейна в будівельній розчинній суміші на різних його ділянках буде різним і залежатиме від радіуса обертання, тому формулу (5) слід записати, виразивши лінійну швидкість як

$$v_o = \omega \cdot R, \quad (6)$$

де ω – кутова швидкість обертання робочого органа, рад/с;

R – радіус обертання, на якому визначається лінійна швидкість v_o , м.

Тоді

$$F_2 = 1,328 \cdot \sqrt{\rho \cdot c \cdot \mu \cdot \omega^3 \cdot R^5} + 4,12 \cdot \mu \cdot \omega \cdot R^2. \quad (7)$$

Один кінець кронштейна знаходиться на осі обертання $R = 0$, а інший – на відстані, котра дорівнює її довжині $R = R_{зн}$. Тоді опір руху робочого органа змішувача можна знайти, проінтегрувавши вираз (7) по радіусу обертання R (рис. 2). Таким чином, у результаті отримуємо момент сил опору M_2 , що прикладений до нижнього кронштейна і створюється силою лобового опору F_2 .

$$M_2 = \int_0^{R_{зн}} \left(1,328 \cdot \sqrt{\rho \cdot c \cdot \mu \cdot \omega^3 \cdot R^5} + 4,12 \cdot \mu \cdot \omega \cdot R^2 \right) \cdot dR, \quad (8)$$

де $R_{зн}$ – максимальний радіус обертання кронштейна, що дорівнює його довжині, м.

Провівши інтегрування, одержимо вираз моменту сили лобового опору M_2 у такому вигляді:

$$M_2 = 0,3794 \cdot \sqrt{\rho \cdot c \cdot \mu \cdot \omega^3 \cdot R_{зн}^7} + 1,373 \cdot \mu \cdot \omega \cdot R_{зн}^3. \quad (9)$$

Сили опору рухові елементарної ділянки dS стрічки шнека:

3. Сила опору F_3 тертя будівельної розчинної суміші по стінці бункера внаслідок дії відцентрової сили інерції маси суміші, яка розташована перед ділянкою dS ,

$$F_3 = k_f \cdot G_2 \cdot \frac{\omega^2 \cdot R_c}{g}, \quad (10)$$

де G_2 – вага будівельної розчинної суміші, що переміщується елементарною ділянкою dS , Н;

ω – кутова швидкість обертання робочого органа, об/с;

g – прискорення вільного падіння, м/с².

R_c – радіус до центра ваги об'єму суміші, яка переміщується елементарною ділянкою dS , може бути визначений як

$$R_c = \frac{R_{зн} - R_{вн}}{2}, \quad (11)$$

де $R_{зн}$ – радіус до зовнішнього краю стрічки шнека, він збігається з максимальним радіусом обертання кронштейна, м;

$R_{вн}$ – радіус до внутрішнього краю стрічки шнека, м.

4. Сила опору F_4 зсуванню будівельної розчинної суміші, що переміщується ділянкою dS відносно суміші, котра знаходиться з боку внутрішньої сторони ділянки dS ,

$$F_4 = \Delta \cdot k_\tau, \quad (12)$$

де Δ – площа зсування будівельної розчинної суміші внутрішньою стороною елементарної ділянки dS , м²;

k_τ – коефіцієнт опору, який характеризує в'язкі властивості будівельної розчинної суміші, Па.

5. Сила опору тертя F_5 будівельної розчинної суміші по ділянці dS внаслідок тиску власної ваги суміші, що захоплюється ділянкою dS (рис. 3, а),

$$F_5 = k_f \cdot G_2 \cdot \cos^2 \delta, \quad (13)$$

де δ – кут нахилу ділянки dS до площини обертання, $^\circ$.

Робота, яка витрачається на переміщення нижнього кронштейна в суміші, визначиться з такого виразу:

$$A_{KP} = (F_1 \cdot x_1 + M_2) \cdot (\varphi_2 - \varphi_1) = \\ = \left(k_f \cdot G_1 \cdot x_1 + 0,3794 \cdot \sqrt{\rho \cdot c \cdot \mu \cdot \omega^3 \cdot R_{3H}^7} + 1,373 \cdot \mu \cdot \omega \cdot R_{3H}^3 \right) \cdot (\varphi_2 - \varphi_1), \quad (14)$$

де x_1 – радіус прикладання до нижнього кронштейна рівнодійної від сили F_1 , м.

Робота, котра витрачається на переміщення елементарної ділянки dS стрічки робочого органа у масі будівельної розчинної суміші,

$$A_{СТР} = (F_3 \cdot R_c + F_4 \cdot R_{6H} + F_5 \cdot R_c) \cdot (\varphi_2 - \varphi_1) = \\ = \left(k_f \cdot G_2 \cdot \frac{\omega^2 \cdot R_c^2}{g} + \Delta \cdot k_\tau \cdot R_{6H} + k_f \cdot G_2 \cdot \cos^2 \delta \cdot R_c \right) \cdot (\varphi_2 - \varphi_1). \quad (15)$$

Потужність, необхідну для руху робочого органа змішувача у будівельній розчинній суміші, знайдемо, підставивши у вирази (14) та (15) замість G_1 і G_2 силу ваги маси матеріалу, що переміщується за одиницю часу відповідно нижньою пластиною та елементарною ділянкою dS стрічки шнека, G'_1 і G'_2 , а замість Δ – площу зсуву Δ' по внутрішній грані стрічки шнека, що при цьому утворюється, за ту ж саму одиницю часу.

Знайдемо значення маси будівельної розчинної суміші G'_1 та G'_2 , що переміщується робочим органом при його повороті від кута φ_1 до кута φ_2 за одиницю часу, і площу зсуву Δ' за ту ж саму одиницю часу.

Вагу будівельної розчинної суміші G'_1 визначимо як добуток прискорення вільного падіння g , густини розчину ρ та елементарного об'єму dV_1 , який переміщується пластиною при повороті робочого органа від кута φ_1 до кута φ_2 .

$$G'_1 = g \cdot \rho \cdot dV_1. \quad (16)$$

Розглянемо рисунок 3, б. Елементарний об'єм dV_1 , що утворюється за одиницю часу при переміщенні робочого органа від кута φ_1 до кута φ_2 , можна знайти як добуток площі кругового сектора OAB S_{OAB} , котрий вирізається нижньою пластиною за цю ж одиницю часу, та товщини кронштейна h . Тоді отримаємо

$$dV_1 = h \cdot R_{3H}^2 \cdot \frac{\omega}{2}. \quad (17)$$

Відповідно G'_1 в такому випадку буде становити

$$G'_1 = g \cdot \rho \cdot h \cdot R_{3H}^2 \cdot \frac{\omega}{2}. \quad (18)$$

Вагу будівельної розчинної суміші G'_2 , що переміщується елементарною ділянкою dS , визначимо аналогічно до G'_1 . Елементарний об'єм dV_2 у цьому випадку дорівнюватиме

$$dV_2 = dl \cdot (R_{зн}^2 - R_{вн}^2) \cdot \frac{\omega}{2}; \quad (19)$$

$$G'_2 = g \cdot \rho \cdot dl \cdot (R_{зн}^2 - R_{вн}^2) \cdot \frac{\omega}{2}, \quad (20)$$

де $R_{зн}$ – зовнішній радіус стрічки шнека, м;
 $R_{вн}$ – внутрішній радіус стрічки шнека, м;
 dl – висота елементарної ділянки dS , м.

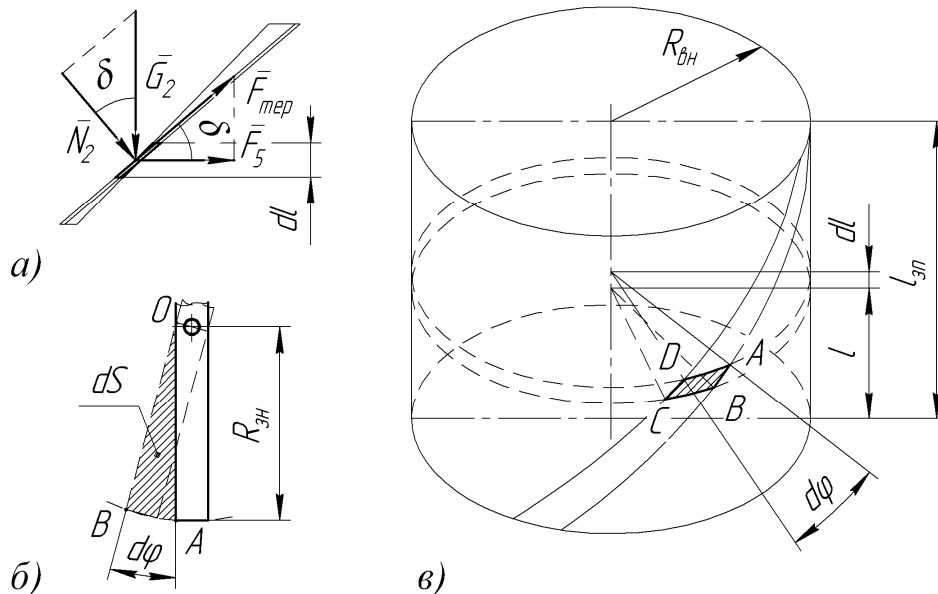


Рисунок 3 – Схеми до визначення: а) сили опору F_5 ; б) ваги суміші, що захоплюється нижньою пластиною; в) площі зсування Δ'

Площа зсування Δ' будівельної розчинної суміші внутрішньою стороною елементарної ділянки dS за одиницю часу визначається як площа циліндричної поверхні ABCD (рис. 3, в), котра при цьому вирізається, і становить

$$\Delta' = dl \cdot R_{вн} \cdot \frac{\omega}{2}. \quad (21)$$

У результаті, підставивши у формули (14) та (15) замість значень G_1 , G_2 і Δ значення G'_1 , G'_2 та Δ' , отримаємо вирази для розрахунку потужності:

$$P_{KP} = \left(0,5 \cdot k_f \cdot g \cdot \rho \cdot h \cdot x_1 + 0,3794 \cdot \sqrt{\rho \cdot c \cdot \mu \cdot \omega \cdot R_{зн}^3} + 1,373 \cdot \mu \cdot R_{зн} \right) \cdot R_{зн}^2 \cdot \omega^2; \quad (22)$$

$$P_{СТР} = \left[k_f \cdot \rho \cdot R_c \cdot (R_{зн}^2 - R_{вн}^2) \cdot (\omega^2 \cdot R_c + g \cdot \cos^2 \delta) + k_\tau \cdot R_{вн}^2 \right] \cdot \frac{\omega}{2} \cdot dl. \quad (23)$$

Загальна потужність вертикального шнекового розчинозмішувача може бути розрахована за формулою

$$P = z_{KP} \cdot P_{KP} + z_{СТР} \cdot P_{СТР} , \quad (24)$$

де z_{KP} і $z_{СТР}$ – відповідно кількість пластин та шнекових стрічок, занурених у будівельну розчинну суміш.

Ми приймаємо, що бункер змішувача заповнений на висоту $l_{зн}$, тоді у формулі (23) замість величини dl можна підставити значення $l_{зн}$. З урахуванням цього вираз (24) буде мати вигляд

$$P = z_{KP} \cdot \left(0,5 \cdot k_f \cdot g \cdot \rho \cdot h \cdot x_1 + \right. \\ \left. + 0,3794 \cdot \sqrt{\rho \cdot c \cdot \mu \cdot \omega \cdot R_{зн}^3} + 1,373 \cdot \mu \cdot R_{зн} \right) \cdot R_{зн}^2 \cdot \omega^2 + \\ + z_{СТР} \cdot \left[k_f \cdot \rho \cdot R_c \cdot \left(R_{зн}^2 - R_{вн}^2 \right) \cdot \left(\omega^2 \cdot R_c + g \cdot \cos^2 \delta \right) + k_\tau \cdot R_{вн}^2 \right] \cdot \frac{\omega}{2} \cdot l_{зн} . \quad (25)$$

Аналізуючи залежність (25), робимо висновок, що для визначення потужності з фізичних властивостей будівельної розчинної суміші нам необхідно мати величини коефіцієнта тертя k_f суміші по стрічці та бункеру й питомого опору зсуву k_τ . Ці значення залежать від умов перемішування, тому вони можуть бути одержані тільки експериментальним шляхом.

Дослідження процесу приготування будівельної розчинної суміші здійснювалося за допомогою експериментальної штукатурно-змішувальної установки з вертикальним шнеком, яка розроблена ПолтНТУ. Вона має такі основні геометричні параметри: внутрішній радіус шнекової стрічки $R_{вн} = 0,3$ м, зовнішній радіус шнекової стрічки $R_{зн} = 0,5$ м, товщина нижнього кронштейна $h = 0,01$ м, розмір нижнього кронштейна у тангенційному напрямку $c = 0,1$ м, кут нахилу стрічки шнека до горизонтальної площини $\delta = 40^\circ$, кількість кронштейнів, занурених у розчин, $z_{KP} = 1$, кількість стрічок $z_{СТР} = 2$, кутова швидкість обертання робочого органа $\omega = 3$ рад/с, висота заповнення бункера будівельною розчинною сумішшю $l_{зн} = 0,5$ м.

Здійснювався процес перемішування вапняно-піщаної розчинної суміші марки П12 за ДСТУ БВ.2.7-23-95 рухомістю 8 см, густиною $\rho = 2100$ кг/м³ із динамічною в'язкістю $\mu = 30,5$ Па·с [8].

Вираз (25) показує залежність споживаної потужності від значень коефіцієнта тертя k_f і коефіцієнта опору зсуву k_τ , оскільки всі інші параметри відомі та розглянуті вище. Підставивши числові значення цих коефіцієнтів до залежності (25), можемо розрахувати величину потужності. У літературі [1, 2] зустрічаються такі значення: $k_f = 0,4-0,6$; $k_\tau = 400-600$ МПа. Використання цих даних дало змогу з'ясувати, що потужність буде знаходитись у діапазоні від 0,86 до 1,425 кВт. Такі значення відповідають експериментальним даним, оскільки потужність з урахуванням втрат у приводі приблизно становить 0,8–1,3 кВт.

Отже, залежність (25) дозволяє визначати потужність привода вертикального шнекового змішувача, якщо відомі реологічні характеристики будівельної розчинної суміші. Крім того, на основі даних про коефіцієнт тертя k_f та коефіцієнт опору зсуву k_τ суміші, що перемішуватиметься, можна підбирати геометричні параметри змішувача.

На рисунку 4 показано графік залежності споживаної змішувачем потужності від рухомості будівельної розчинної суміші, що в ньому готувалася, для різних значень кута нахилу стрічки шнека до горизонтальної площини δ . На цьому рисунку криві побудовані за теоретичною залежністю (25), а точки проставлені за результатами експериментальних даних.

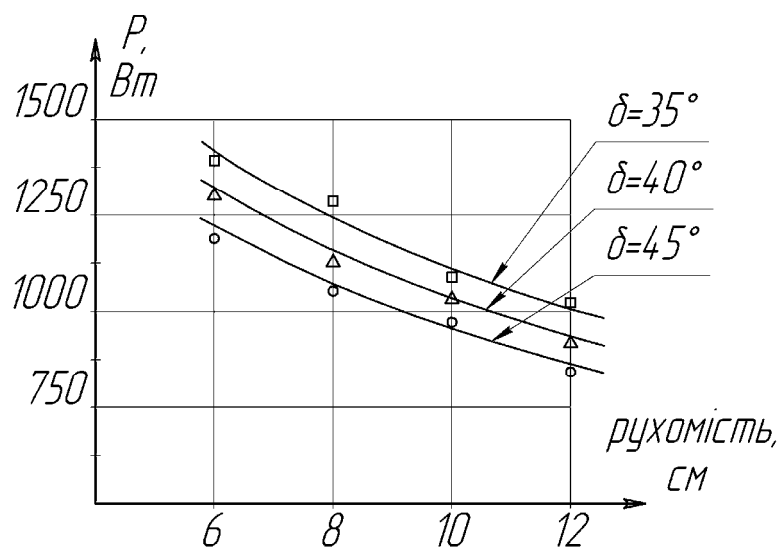


Рисунок 4 – Графік залежності споживаної потужності змішувача від рухомості будівельної розчинної суміші

Як видно з графіка (рис. 4), для приготування сумішей зниженої рухомості з метою зменшення споживаної потужності необхідно використовувати робочий орган із більшим кутом нахилу стрічки δ .

Висновки та перспективи подальших досліджень. Запропонована методика розрахунку споживаної потужності розчинозмішувача з вертикальним шнековим робочим органом базується на визначенні впливу сил опору, котрі діють на робочий орган під час процесу змішування, та геометричних параметрів установки. Це дозволить використовувати одержані залежності для знаходження раціональних розмірів робочого органа й бункера установки, кутової швидкості обертання для досягнення зниження споживаної потужності та підвищення якості приготованої будівельної розчинної суміші. Для проведення більш точного розрахунку потужності привода необхідно дослідити робочий процес розчинозмішувача з урахуванням взаємодії частинок будівельної розчинної суміші між собою.

ЛІТЕРАТУРА

1. Назаренко І.І. *Машини для виробництва будівельних матеріалів: підручник / І.І. Назаренко.* – К.: КЕУБА, 1999. – 488 с.
2. Сівко В.Й. *Механічне устаткування підприємств будівельних виробів: підручник / В.Й. Сівко.* – К.: ІСДО, 1994. – 359 с.
3. Севров К.П. *Установки для приготовления асфальтобетонных и битумоминеральных смесей / К.П. Севров, Л.П. Камчатнов.* – М.: Машиностроение, 1971. – 128 с.
4. Дж. Дейли. *Механика жидкости / Дж. Дейли, Д. Харлеман; пер. с англ. В.И. Буркеева, В.И. Квона, В.В. Орлова и др.* – М.: Энергия, 1971. – 480 с.
5. Лойцянский Л.Г. *Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский.* – М.: Наука, 1973. – 847 с.
6. Королев К.М. *Методика расчета лотковых смесителей / К.М. Королев // Строительные и дорожные машины.* – 1985. – №1. – С. 14–16.
7. Онищенко О.Г. *Розрахунок потужності та визначення опорів, що виникають при роботі стрічкового шнекового розчинозмішувача / О.Г. Онищенко, К.М. Ващенко // Вісник КДПУ: зб. наук. праць.* – Кременчук: КДПУ, 2006. – Вип. 1(36). – С. 58–63.
8. Коробко Б.О. *Дослідження робочих процесів розчинонасоса з комбінованим законом руху проточного плунжера: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.05.02 / Б.О. Коробко.* – Полтава, 2002. – 20 с.