

ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНОГО БАЛАНСУ ТА КРИТЕРІЇВ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ СИСТЕМИ «БАРАБАН ЗМІШУВАЧА-БЕТОННА СУМІШ»

Іван Назаренко, Микола Клименко

*Київський національний університет будівництва і архітектури,
03680, Повітрофлотський просп., 31, Київ, Україна, klymenko.2012@gmail.com*

EVALUATION OF THE ENERGY BALANCE AND WORKFLOW CRITERIA OF THE "DRUM MIXER-CONCRETE MIXTURE" SYSTEM

Ivan Nazarenko, Mykola Klymenko

*Kyiv National University of Construction and Architecture,
03680, Povitroflotsky av., 31, Kyiv, Ukraine, klymenko.2012@gmail.com*

АНОТАЦІЯ. Розглянуто процес перемішування будівельних сумішей в барабані гравітаційного бетонозмішувача з точки зору енергетичного балансу системи «барабан змішувача-бетонна суміш» на умовах дискретної та континуальної моделі бетонної суміші. Запропоновані критерії робочого процесу перемішування та критерії подібності процесів перемішування бетонних сумішей, що ґрунтуються на передумовах одночасного протікання процесів диспергування, масопереносу та фізико-хімічних перетворень.

Ключові слова: перемішування, барабан змішувача, енергетичний баланс, енергія перемішування, критерії робочого процесу.

АНОТАЦИЯ. Рассмотрен процесс перемешивания строительных смесей в барабане гравитационного бетоносмесителя с точки зрения энергетического баланса системы «смесительный барабан-бетонная смесь» на условиях дискретной и континуальной модели бетонной смеси. Предложены критерии рабочего процесса перемешивания и критерии подобия процессов перемешивания бетонных смесей, основанных на условии одновременного протекания процессов диспергирования, массопереноса и физико-химических превращений.

Ключевые слова: перемешивание, смесительный барабан, энергетический баланс, энергия перемешивания, критерии рабочего процесса.

ABSTRACT. Purpose. The purpose of this work is to describe mixing process of mortars in concrete mixer drums in terms of energy balance of "drum mixer-concrete mixture" system as discrete and continuum models. **Methodology/approach.** Researches in this work are of analytical character. **Findings.** Using of these studies allows to improve mixing process by taking into account workflow criteria proposed. Mixing processes similarity criteria based on assumptions simultaneous processes of dispersion, mass transfer, physical and chemical transformations are researched. **Research limitations/implications.** The results received can be used for further improvement of mixing process and for now do not consider mortal behavior. **Originality/value.** The work has scientific and practical interest for concrete drum mixer designers.

Key words: mixing, mixer drum, energy balance, mixing energy, workflow criteria.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Теоретичні дослідження, що описують процес перемішування в гравітаційних бетонозмішувачах, базуються переважно на розгляді робочого процесу з попередньою оцінкою ступеня впливу на ефективність перемішування геометрії барабана та визначення параметрів гравітаційних змішувачів: форми барабана, співвідношення діаметрів і довжин відповідних частин барабана, наявності і розміщення лопатей, частота обертання барабана та продуктивність змішувача.

Отримані характеристики і параметри робочого процесу відкривають можливість для розрахунку зусиль і потужності, досконалішого зв'язування конструктивних особливостей сучасних гравітаційних змішувачів.

Проте такий підхід вимагає прийняття певних припущень до досліджень щодо прийнятого уявлення про процес руху суміші в барабані. Для повного сприймання процесу перемішування послідовно розглядається модель середовища, що на першому етапі зводиться до точки, а потім до в'язко-пластичної суміші. На першому етапі визначаються можливі режими роботи, а

на другому – енергетика системи. При обертанні барабана з визначеною частотою суміш лопатями і під дією сил тертя по внутрішній поверхні барабана піднімається на деяку висоту, а потім завдяки гравітаційним силам падає униз. Цей процес повторюється кілька разів і тому вихідні компоненти, перемішуючись, утворюють однорідну суміш. Степінь участі лопатей і внутрішніх стінок барабана у процесі перемішування визначається не тільки їхніми параметрами, а й властивостями бетонної суміші. Визначена форма барабана і встановлення лопатей дозволяють не тільки забезпечити наявність в елементарному об'ємі вихідних компонентів у необхідній пропорції за мінімальний час, а й розширити можливості використання циклічних гравітаційних бетонозмішувачів.

Енергетичний баланс складної системи, до яких відноситься також і бетонна суміш, розглядається багатьма дослідниками [1, 11] на умовах дискретної та континуальної моделі, а основна ідея визначення критеріїв подібності процесів перемішування бетонних сумішей ґрунтується на передумовах, що цей процес супроводжується одночасним протіканням процесів диспергування, масопереносу та фізико-хімічних перетворень.

ОГЛЯД ПУБЛІКАЦІЙ

При розгляді руху суміші в барабані гравітаційних бетонозмішувачів вважається [7, 9, 10], що геометричні характеристики барабана мають бути визначені за умови максимального підйому суміші внутрішньою поверхнею барабана із лопатями зі збільшеним коефіцієнтом циклічності. Проте такий підхід не враховує характеру взаємодії компонентів системи «барабан змішувача-бетонна суміш». В роботах [1, 5, 6] зроблена спроба перенесення певних властивостей середовища на досліджувану модель за допомогою використання критерію Рейнольдса та критерію Фруда.

Своєрідним доповненням до згаданих параметрів можуть бути використані деякі критерії, застосовані в роботі Ю.О. Верігіна

[5] для оцінки процесів перемішування складних середовищ.

МЕТА РОБОТИ

Мета роботи полягає в обґрунтуванні методів розгляду системи «барабан змішувача-бетонна суміш» через оцінку енергетичного балансу та критеріїв робочого процесу. Встановлення основних параметрів, які є складовими загального виразу балансу енергії, що відображає процес перемішування, а також використання підходу визначення критеріїв на основі загального критерію термодинамічної подібності, який відображає процес утворення суміші на основі загальних законів зміни її стану незалежно від структури системи, що розглядається.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Розгляд балансу енергії за дискретною моделлю зводиться до наступного. Прийнято, що внутрішня енергія хаотичного руху частинок суміші генерується не тільки за рахунок дисипації середнього руху, а і за рахунок поперечних сил руху частинок вздовж барабана в межах виділеного об'єму. Ці сили в теорії руху дисперсних систем прийнято називати силами Магнуса як такі, що діють у поперечному напрямку при обтіканні заповнювачів бетонної суміші. Окрім генерації в системі відбувається також і зменшення внутрішньої енергії за рахунок переходу в теплову енергію внаслідок непружного тертя компонентів бетонної суміші між собою. Енергія руху в приведеному об'ємі V розглядається як доданок кінетичної E_k і внутрішньої E_v енергій:

$$E_k = \frac{1}{2} \int_V \rho V^2 dV ;$$

$$E_v = \frac{1}{2} \int_V \rho \bar{E} dV ,$$
(1)

де \bar{E} – внутрішня енергія одиниці об'єму.

Баланс повної енергії складається із роботи зовнішніх і внутрішніх сил та енергії, підведеної до системи:

$$\frac{d(E_k + E_g)}{dt} = \int_V (FV + \rho gh + E_m + E_d) dV, \quad (2)$$

де F – сила, що діє в системі «частинка – цементне тісто»; E_m – енергія Магнуса; E_d – дисипативна складова енергії, яка в загальному випадку враховує також і ступінь диспергування при руйнуванні структурних елементів.

Енергія робочої поверхні змішувача створює напружено-деформований стан бетонної суміші з перенесенням елементарних об'ємів суміші з одного стаціонарного стану в інший, утворенням зсуву і площини ковзання по поверхням розділу фаз в порушеній структурі суміші і на внутрішній поверхні барабана. Тобто виникають масообмінні процеси, які викликають дисипацію енергії, в тому числі і процеси, пов'язані з хімічними реакціями системи «вода-цемент» та молекулярно-кінетичними ефектами при диспергуванні структурних елементів.

З урахуванням масових сил системи «поверхня барабана-бетонна суміш», які є визначальними для оцінки параметрів робочого органа, загальний баланс енергії (2) базується на рівняннях суцільного середовища, яке рухається під впливом поверхні барабана.

Рух суцільного середовища описується математичною моделлю

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla \sigma + \vec{f}, \quad (3)$$

де $\frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \nabla) \vec{V}$ – повна похідна у часі t ; $\vec{V} = \{V_r, V_\phi, V_z\}$ – вектор швидкості елементарного об'єму суміші; V_r, V_ϕ, V_z – радіальна, тангенціальна і осьова компоненти вектора швидкості потоку в напрямках r, ϕ і z (рис. 1); ρ – густина суміші; ∇ – диференціальний оператор Гамільтона; σ –

тензор напружень; \vec{f} – вектор сили, віднесений до одиниці маси.

Для стаціонарного руху, що в першому наближенні відповідає руху бетонної суміші, можна прийняти

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = 0, \quad (4)$$

а модель (3) представляється диференціальним рівнянням Нав'є-Стокса.

За граничні умови приймаються:

- непроникність стінки при $r = R, V_r = 0$;

- ступінь спільного руху системи «стінка-суміш» (прилипання суміші до стінок) при $r = R, V_\phi = 0; V_z = 0$.

Тут V_r, V_ϕ, V_z – радіальна, тангенціальна і осьова складові швидкості потоку; r – радіус елементарного об'єму суміші; R – радіус барабана змішувача.

Розподілення гідростатичного тиску p суміші на стінку при $r = R, p = f_p(r, \phi, z)$.

Виділяючи за головну фізичну суть явища прийнятий ламінарний характер руху, кутову швидкість елементарного об'єму потоку можна записати у вигляді

$$\omega_0 = \frac{1}{2R} \left(\frac{\partial}{\partial r} (rV_\phi) - \frac{\partial V_r}{\partial \phi} \right). \quad (5)$$

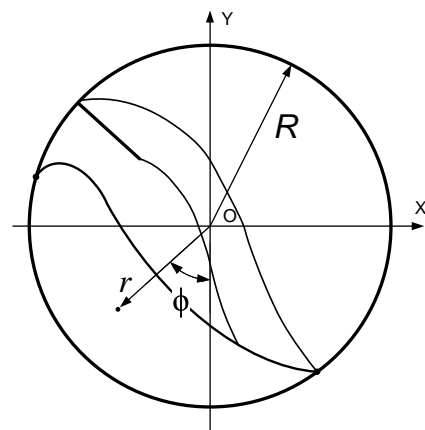


Рис. 1. Розрахункова схема моделі руху суцільного середовища

Fig. 1. Calculated scheme for continuum motion model

Зазвичай для опису руху в'язкого середовища, яким є бетонна суміш, модель (3)

представляється системою диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса [3, 6, 10], рішення якої зводиться до визначення швидкості руху рідини та тиску. Оскільки ця процедура розв'язання рівнянь відома [3, 11], і, наприклад, є вирішення для систем, подібних за формою змішувача, в роботі досліджуються зведені безрозмірні складові рівняння руху, визначені на основі класичної теорії розмірностей для двовимірної системи координат:

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{V_r}{R\omega}; & K_2 &= \frac{V_\phi}{R\omega}; \\ K_3 &= \frac{r}{R}; & K_4 &= \frac{(p - p_0)}{\mu\omega}; \\ K_5 &= \frac{R\omega^2}{g}; & K_6 &= \frac{\rho\omega R}{\mu}, \end{aligned} \quad (6)$$

де r, ϕ – радіальна і кутова координати (рис.1); V_r, V_ϕ – радіальна і кутова складові швидкості; ω – кутова швидкість; p, p_0 – тиск в суміші і атмосферний відповідно; μ – коефіцієнт в'язкості.

Доповненням до наведених параметрів можуть бути використані деякі критерії, застосовані в роботі Ю.О. Верігіна для оцінки процесів перемішування та диспергування [5]:

$$\begin{aligned} k_{n1} &= \frac{F}{\rho V^2}; \\ k_{n2} &= \frac{gl}{V^2}; \\ k_{n3} &= \frac{F_i}{l^2 E}, \end{aligned} \quad (7)$$

де l – характерний розмір перерізу мікрооб'єму; F – загальне питоме зусилля на стінці барабана; F_i – поточне значення зусилля.

Критерій (7) отриманий на основі критерію подібності Покровського Г.Н. і Федорова І.С., який використовується в роботі Баловнева В.І. при моделювання процесів дослідження ґрунтів [1]

$$\frac{TdS}{dt} - \left(\frac{\partial u}{\partial t}\right) d\left(\frac{1}{\rho}\right) = idem, \quad (8)$$

де TdS – енергія (ентропія), що підводиться робочим органом; dE – загальна енергія системи.

Рівняння балансу повної енергії можна представити з позиції розгляду суцільного середовища зі складовими його напружено-деформованого стану:

$$dE = dE_k + dE_n + dE_{np}, \quad (9)$$

де dE_k, dE_n, dE_{np} – відповідно кінетична, потенційна і пружна енергія деформування.

Розглядаючи енергію E_{np} в межах пружної деформації у відповідності до залежності $\sigma = E\varepsilon$, де E – модуль пружності, а ε – відносна деформація, вираз для визначення енергії можна представити у вигляді [5]

$$dE_{np} = 0,5\sigma^2 \Delta V / E, \quad (10)$$

де ΔV – елементарний об'єм суміші.

Інші складові енергетичного балансу досліджуваної системи оцінюються шляхом визначення критеріїв подібності та їхніх параметрів.

Застосування критеріїв (6) розширює уявлення про процес утворення бетонної суміші. Аналіз складових цих критеріїв вказує, що за узагальнений критерій можна прийняти співвідношення критерію K_6 (критерій Рейнольдса) та критерію K_5 (критерій Фруда)

$$K_{p.\phi.} = \rho g R / \mu \omega, \quad (11)$$

який за фізичною сутністю визначає співвідношення масових сил і сил тертя.

Для з'ясування впливу критерію (11) на процес перемішування розглянемо модель повороту сегменту суміші (рис. 2), поверхня якого буде підніматися за умови, коли кут підйому $\delta > \phi$ (ϕ – кут тертя).

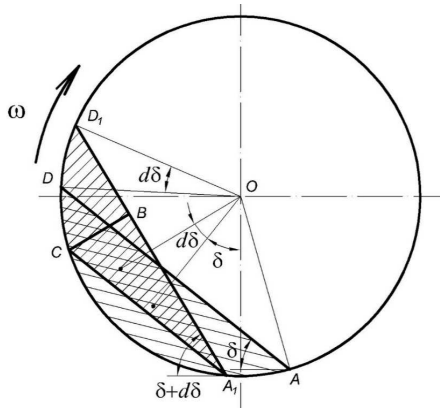


Рис. 2. Модель суміші як суцільного середовища

Fig. 3. Mixture model as continuum

Тоді за повороту барабана на кут $d\delta$ барабан піднімає частину суміші, яка змінює своє положення з площини AD в нове положення A_1D_1 з наступним зсуванням у вихідне положення, здійснюючи таким чином перемішування суміші.

Утворений клин A_1D_1C має площу перерізу

$$dS = 0,5A_1D_1 \cdot CB = 0,5AD \cdot CB, \quad (12)$$

де $AD = D_{cep} \sin \delta$. Здійснивши тригонометричні перетворення $\sin \delta = d\delta$ і $\cos \delta = 1$, отримаємо

$$\begin{aligned} dS &= 0,5D_{cep} \sin \delta \times \\ &\times D_{cep} \sin \delta d\delta = \\ &= 0,5D_{cep}^2 \sin^2 \delta d\delta. \end{aligned} \quad (13)$$

Оскільки поворот барабана, а отже і процес зсування суміші і, як наслідок, перемішування здійснюється безперервно, то при повороті барабана за час dt відбувається поворот на кут $d\delta$, а в одиницю часу площа суміші, що зсувається становитиме

$$\begin{aligned} S' &= \frac{dS}{dt} = \\ &= 0,5D_{cep}^2 \sin^2 \delta \frac{d\delta}{dt} = \\ &= 0,5D_{cep}^2 \omega \sin^2 \delta \end{aligned} \quad (14)$$

за умови, що $d\delta/dt = \omega$.

Оскільки площа сегменту, що займає суміш в барабані, становить $S' = 0,5D_{cep}^2(2\delta - \sin 2\delta)$, то відношення площі суміші, що повертається S' , до вихідної площі буде визначати інтенсивність перемішування

$$I = \frac{S'}{S} = \frac{4\omega \sin^2 \delta}{2\delta - \sin 2\delta}. \quad (15)$$

Інтенсивність суттєво залежить від частоти обертання барабана, яка, в свою чергу, виходячи з максимального підйому суміші, визначається за залежністю [2, 7]

$$\omega = \left(\frac{2,1 \dots 2,4}{\sqrt{D_{max}}} \right), \quad (16)$$

де D_{max} – діаметр найбільшої циліндричної частини бетонозмішувача.

Показник D_{max}/L , що раніше застосовувався для аналізу конструкцій змішувачів, не відображає впливу зміни форми конічних частин без зміни загальної довжини барабана L .

У зв'язку із наявністю конічних частин барабана та запропонованого зведеного коефіцієнта форми барабана, формула (16) для визначення частоти обертання барабана пропонується у вигляді

$$\omega = \left(\frac{k_\omega}{\sqrt{D_{cep}}} \right), \quad (17)$$

де коефіцієнт k_ω залежить від коефіцієнта, що враховує форму барабана. Його значення коливається в межах $k_\omega = (1,5 \dots 1,8)$.

Введення поняття «форми барабана» потребує більш детального розгляду як щодо процесу руху суміші в барабані, так і визначення такого важливого параметра цього процесу як частота обертання барабана. Адже при однаковій частоті обертання для барабанів різних діаметрів (через наявність конічних або сферичних частин) будемо мати різні значення лінійних швидкостей в різних частинах барабана. Очевидно, варто ввести в теорію гравітаційних змішувачів з конічними частинами барабанів поняття

«зведена частота» обертання барабана, яка не може бути розрахована за звичайним підходом до розгляду процесу за умов врахування виключно ваги та відцентрової сили для циліндричної частини барабана [2, 4]. Аналіз запропонованого коефіцієнта, що враховує форму барабана, свідчить про те, що його значення суттєво впливають на вибір параметрів процесу. Очевидно, формула коефіцієнта форми барабана у вигляді залежності (1) потребує подальших уточнень в частині стабілізації форми барабана, виходячи з самого поняття зведеного значення $D_{зв}$. Цілком очевидно, що необхідно акцентувати увагу на часі перемішування, і його визначення має бути предметом спеціальних досліджень. Встановлена довготривалість перемішування в межах 2...5 хвилин має значну розбіжність. Традиційне уявлення про кількість рухів суміші в гравітаційних барабанах має бути доповнене трансформацією процесів перемішування і переміщення на основі спеціальних технологічних досліджень з визначення напружено-деформованого стану під дією складних просторових сил навантаження.

У першому наближенні час перемішування і час складного руху суміші можна визначити за залежністю

$$t = \frac{D_{зв} \cdot S_{зв}}{K_{бар} \cdot \bar{V}_{зв}}, \quad (18)$$

де $D_{зв}$ – зведений діаметр барабана; $S_{зв}$ – зведена площа перерізу барабана; $\bar{V}_{зв}$ – об'єм суміші, що перемішується і переміщується всередині барабана за одиницю часу.

Розрахунки за формулою (18) дають значення, що на 17% менші значень згаданих в літературних джерелах [4, 8, 9].

ВИСНОВКИ

1. Обґрунтовано застосування методу оцінки системи «барабан змішувача-бетонна суміш» через енергетичний баланс системи та запропоновані критерії робочого процесу.

2. Отримані у роботі результати можуть бути використані у подальшому для уточ-

нення та вдосконалення методів існуючих інженерних розрахунків барабаних апаратів та ступеня їх взаємодії з оброблюваним середовищем.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Баловнев В.И.* Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин: учеб. пособие для вузов / В. И. Баловнев. - 2-е изд., перераб. - М.: Машиностроение, 1994. - 432 с.
2. *Бауман В.А. и др.* Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций. – М.: Машиностроение, 1981. – 324с.
3. *Бориц И.М., Вознесенский В.А., Мухин В.З.* Процессы и аппараты в технологии строительных материалов. – К.: Вища школа. Головное изд-во, 1981. – 296 с.
4. *Борщевский А.А., Ильин А.С.* Механическое оборудование для производства строительных материалов и изделий / А.А. Борщевский, А.С. Ильин. - М. : Высш. шк., 1987. - 367 с.
5. *Веригин Ю.А.* Термодинамический анализ процесса смесеобразования бетонов и других дисперсных систем // Тез.докл. Всесоюзн. конф. «Фундаментальные исследования и новые технологии в строительном материаловедении». – Белгород: БТИСМ, 1989. – ч.6. – С.72-73.
6. *Демуцький В.П.* Моделі неklasичних середовищ: Нац. акад. наук. Укр., Харк. держ. ун-т, Технол. Центр. – Х.:ХФТЦ, 1994. – 72с.
7. *Емельянова И.А., Анищенко А.И.* Определение минимальной частоты вращения корпуса бетоносмесителя гравитационно-принудительного // Механизация строительства. 2012. – №1. – С. 2 – 5.
8. *Морозов М.К.* Механическое оборудование заводов сборного железобетона. – К.: Вища школа, 1986. – 311 с.
9. *Новиков А.А.* Интенсивность смешивания бетонных смесей в барабанных смесителях непрерывного действия // Строительные и дорожные машины. - 1978. - №2. – С.23-24.
10. *Сівко В.Й.* Питання теорії сумішей // Труды научн.-техн. конф. «Прогрессивные технологии и машины для производства строительных материалов, изделий и конструкций». – Полтава, 1996. – С.153-157.
11. *Серебренников А.А. и др.* Интенсификация смешивания в гравитационном бетоносмесителе // Строительные и дорожные машины. - 2000. - №12. С. 34-35.

REFERENCES

1. *Balovnev V.I., 1994.* Modelirovanie protsessov vzaimodeystviya so sredoy rabochnih organov dorozhno-stroitelnyh mashin: ucheb. posobie dlya vuzov [Modeling of the processes for interaction with the environment of working bodies of road and constructional machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 432.
2. *Bauman V.A. and others, 1981.* Mehanicheskoe oborudovanie predpriyatiy stroitelnyh materialov, izdeliy i konstruktsiy [Mechanical equipment of construction materials and products companies]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 324.
3. *Borsch I.M., Voznesenskiy V.A., Muhin V.Z., 1981.* Protsessyi i apparaty v tehnologii stroitelnyh materialov [Processes and devices in the technology of building materials]. Kyiv, Vischa shkola Publ., 296.
4. *Borshevskiy A.A., Ilin A.S., 1987.* Mehanicheskoe oborudovanie dlya proizvodstva stroitelnyh materialov i izdeliy [Mechanical equipment for the production of constructional materials and products]. Moscow, Vyssh. Shkola Publ., 367.
5. *Verigin Yu.A., 1989.* Termodinamicheskii analiz protsessa smeseobrazovaniya betonov i drugih dispersnyh sistem [Thermodynamic analysis of the process of mixing concrete and other dispersed systems]. Tez.dokl. Vsesoyuzn. konf. «Fundamentalnyie issledovaniya i novyye tehnologii v stroitelnom materialovedenii» [Abstracts "Fundamental research and of new technologies in building materials"]. Belgorod, BTISM Publ., Vol.6, 72-73.
6. *Demutskiy V.P., 1994.* Modeli neklasichnih sredovisch [Models nonclassical environments]. National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv state university, HFTTs Publ., 72.
7. *Emelyanova I.A., Anischenko A.I., 2012.* Opredelenie minimalnoy chastoty vrascheniya korpusa betonosmesitelya gravitatsionno-prinuditelnogo [Determination of the minimum speed of the mixer housing compulsory]. Mehanizatsiya stroitelstva [Mechanization of the construction], No.1, 2-5.
8. *Morozov M.K., 1986.* Mehanicheskoe oborudovanie zavodov sbornogo zhelezobetona [Mechanical equipment of factories of precast concrete]. Kiyv, Vischa shkola Publ., 311.
9. *Novikov A.A., 1978.* Intensivnost smeshivaniya betonnyih smesey v barabannyih smesitelyah nepreryivnogo deystviya [The intensity of mixing concrete mixes drum continuous mixers]. Stroitelnyie i dorozhnyie mashiny [Constructional and road machines], No.2, 23-24.
10. *Sivko V.Y., 1996.* Pitannya teorii sumishey [Problems in the theory of mixtures]. Trudyi nauchn.-tehn. konf. «Progressivnyie tehnologii i mashiny dlya proizvodstva stroyaterialov, izdeliy i konstruktsiy» [Advanced technologies and machines for production of building materials, components and structures]. Poltava, 153-157.
11. *Serebrenikov A.A. and others, 2000.* Intensifikatsiya smeshivaniya v gravitatsionnom betonosmesitele [The intensification of mixing in the gravity mixer]. Stroitelnyie i dorozhnyie mashiny [Building and road machines], No.12, 34-35.

