

## ПАРАМЕТРИ І РЕЖИМИ РОБОТИ ВІБРОПРИСТРОЮ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ГОРИЗОНТАЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ

Андрій Заприво́да

Київський національний університет будівництва і архітектури,  
Повітрофлотський просп., 31, Київ, Україна, e-mail: zapryvoda@yahoo.com

## PARAMETERS AND MODES OF FORMATION VIBRATION DEVICE FOR HORIZONTAL SURFACES

Andriy Zapryvoda

Kyiv National University of Construction and Architecture,  
31, Povitroflotsky Prospect, Kyiv, Ukraine, e-mail: zapryvoda@yahoo.com

**АНОТАЦІЯ.** Метою роботи було проведення аналізу існуючих методів визначення основних параметрів вібропристрою. Здійснювалось це на основі розгляду спільного руху "вібромашина – середовище" за корпускулярною та континуальною моделями. Досліджено вплив основних параметрів на зміну тиску в контактній зоні як ключового параметра при оцінці впливу опору середовища на коливання вібропристрою. Отримані критерії для оцінки ефективності процесу ущільнення бетонної суміші у відривному та безвідривному режимах роботи вібропристрою. Це є аналітичною передумовою для розробки інженерної методики розрахунку машин подібного класу.

**Ключові слова:** вібромашина, ущільнення, бетонна суміш, реологічні властивості, корпускулярна модель, континуальна модель, робочий процес.

**АННОТАЦИЯ.** Целью работы было проведение анализа существующих методов определения основных параметров виброустройства. Осуществлялось это на основе рассмотрения совместного движения "вибромашина – среда" по корпускулярной и континуальной моделям. Исследовано влияние основных параметров на смену давления в контактной зоне как ключевого параметра при оценке сопротивления среды на колебания виброустройства. Получены критерии для оценки эффективности процесса уплотнения бетонной смеси в отрывном и безотрывном режимах работы виброустройства. Это является аналитической предпосылкой для разработки инженерной методики расчета машин подобного класса.

**Ключевые слова:** вибромашина, уплотнение, бетонная смесь, реологические свойства, корпускулярная модель, континуальная модель, рабочий процесс.

**ABSTRACT. Purpose.** The purpose of work was realization of analysis of existent methods of determination of basic parameters of vibrodevice. **Methodology/approach.** It was carried out on the basis of consideration of general motion a "vibromachine – environment" corpuscular and continuum models. **Findings.** Influence of basic parameters is investigational on changing of pressure in a contact area as a key parameter at the estimation of resistance of environment on the vibrations of vibrodevice. **limitations/implications.** Criteria are got for the estimation of efficiency of process of compression of concrete mixture in the that can be torn off and can not be torn off modes of operations of vibrodevice. **Originality/value.** It is analytical precondition for development of engineering method of calculation of machines of similar class.

**Key words:** vibration, compaction, concrete mix, rheological properties, corpuscular model, continuum model, the working process.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

З розвитком монолітного будівництва широкого застосування набула потреба в формуванні горизонтальних поверхонь значних розмірів у плані як в самій будівлі, так і при улаштуванні підземних гаражів, складів тощо. Технологією передбачено використання віброустановок із значною довжиною віброрейок ( $l = 3, 6, 12$  м) для розподілення та ущільнення бетонних жорстких сумішей та спеціалі-

зованих машин для згладжування поверхонь.

Домінуюче значення у досягненні як продуктивності, так і якості суміші належить процесу укладання та ущільнення суміші, що визначаються вибраними параметрами вібрації і їх реальним забезпеченням. Тому актуальним є вдосконалення конструктивних та технологічних параметрів, що обумовлюють стабілізацією режиму роботи віброустановки.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Ущільнення суміші поверхневими машинами відоме з 30-х років минулого століття в основному при виконанні бетонних робіт. Не акцентуючи уваги на конструктивних особливостях машин, що виходить за рамки цієї роботи, відмітимо ряд робіт, в яких розглядався підхід та методи визначення параметрів поверхневого ущільнення будівельних сумішей [1 – 3]. В роботі [4] наведені залежності для визначення основних параметрів вібратора:

$$C = \omega_{\text{рез}}^2 \sqrt{m^2 - \left(\frac{m_0 r_0}{A}\right)^2}; \quad (1)$$

$$b = \sqrt{2C \left( m - \frac{C}{\omega_{\text{рез}}^2} \right)}; \quad (2)$$

$$b = \text{tg} \varphi \left( \frac{C}{\omega} - \omega m \right)$$

$$\text{tg} \varphi = \sqrt{\frac{(m_0 r_0)^2 \omega^4}{(C - \omega^2 m)^2 A^2}} - 1, \quad (3)$$

де  $C$ ,  $b$  – коефіцієнти пружності і дисипації бетонної суміші відповідно;  $\omega$ ,  $\omega_{\text{рез}}$  – частота змушуючої сили і резонансна частота відповідно;  $m$  – маса вібратора;  $m_0 r_0$  – статичний момент маси дебалансів;  $A$  – амплітуда коливань вібратора;  $\varphi$  – фазовий кут.

Залежності (1) – (3) отримані із рішення рівняння руху вібратора як системи із одним ступенем свободи, що знаходиться в контакт з бетонною сумішшю. У формулах (1) – (3) бетонна суміш врахована коефіцієнтами пружності  $C$  і дисипації  $b$  за виключенням масового впливу суміші. Коефіцієнт пружності визначається із умови ізотермічного стиснення повітря, тобто приймалася гіпотеза «повітряної» природи зв'язку між напругою і деформацією в бетонній суміші [4]:

$$C = \frac{S(p_0 + p_{\text{ст}})^2}{h_0 \varepsilon p_0}, \quad (4)$$

де  $S$  – площа вібратора, що контактує із бетонною сумішшю;  $p_0$ ,  $p_{\text{ст}}$  – атмосфер-

ний і статичний тиск на суміш;  $h_0$  – висота бетонної суміші;  $\varepsilon$  – коефіцієнт порожнин в суміші, що дорівнює відношенню зведеної висоти повітряних порожнин до повної висоти суміші.

Залежності (1) – (4) наведені тому, що «повітряна» гіпотеза є домінуючою в теорії віброформування бетону. Саме із цих залежностей були визначені параметри [4], які головним чином є основними параметрами поверхневого ущільнення суміші (рис.1).

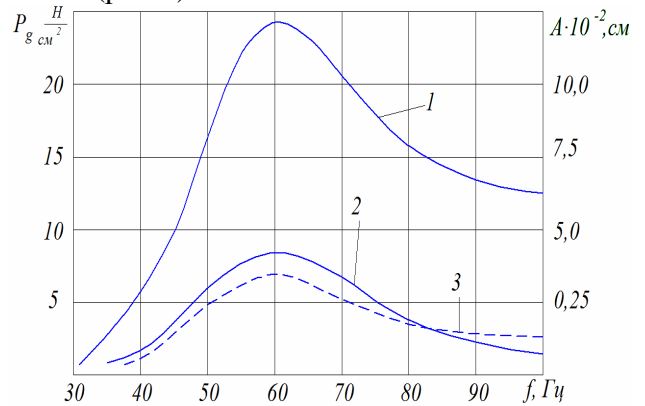


Рис.1. Значення  $p_g$  для висоти  $h_0 = 20$  см,  $\varepsilon = 0,0125$ ;  $S = 1125$  см<sup>2</sup>;  $m = 0,5$  кг: 1- амплітуда коливань; 2, 3 – криві тиску  $p_g$ , експериментальна і теоретична відповідно

Fig.1. Value  $p_g$  for height  $h_0 = 20$  cm,  $\varepsilon = 0,0125$ ;  $S = 1125$  cm<sup>2</sup>;  $m = 0,5$  kg: 1- amplitude; 2, 3 - pressure curves  $p_g$ , respectively experimental and theoretical

При визначенні динамічного тиску  $P_g$  не враховувалися в'язко-пластичні властивості суміші. Також приймалося, що модуль пружності не залежить від деформації:

$$P_g = CA / S. \quad (5)$$

Граничне значення амплітуди коливань вібратора для реалізації безвідривного режиму пропонується визначати за залежністю

$$A_{\text{гр}} = h_0 \varepsilon p_{\text{ст}} / (p_0 + p_{\text{ст}}). \quad (6)$$

Не піддаючи сумніву експериментальної частини роботи [4], варто зауважити, що амплітуда коливань  $A$  в резонансі (рис. 1) перевищує значення  $A > 1,0$  мм, за якої можливий відрив вібратора, а в той же час залежність (6) враховує лише статичну складову процесу і відсутня

інерційна складова суміші в загальній системі «вібратор-суміш».

### МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є визначення параметрів та режимів вібропристрою для формування горизонтальних поверхонь на основі врахування реологічних властивостей оброблювального середовища.

Для досягнення означеної мети сформульовані задачі дослідження, які передбачають оцінку існуючих досліджень на основі корпускулярної та континуальної моделі із наступним визначенням числових значень параметрів робочого процесу.

### ВИКЛАД ОСНОВНОГО ЗМІСТУ ДОСЛІДЖЕННЯ

Аналіз формул (4) – (6) засвідчує їх визначення із умов статички, що справедливо в певних межах. Очевидно, що під час ущільнення степінь осідання суміші, як і висота стовпа, зменшується, а щільність збільшується. Тоді початкова умова (6) буде змінюватися. В таких випадках порушується залежність  $a < g$  ( $a$  – прискорення вібратора) і може виникнути відривний режим як негативне явище в умовах поверхневого навантаження [4]. Підхід, зазначений і розвинутий в роботі [4], розширив уявлення про фізику процесу ущільнення і, безумовно, є корисним для подальшого розвитку даної технології.

Поряд із корпускулярною теорією процесу ущільнення поверхневими вібропристроями застосовувалась континуальна модель [3, 5, 6]. Можливість відривних коливань вібратора визначається [5] значеннями активних і реактивних компонентів суміші, які залежать від реологічних та акустичних параметрів: щільності, пористості, швидкості звуку в суміші та модуля пружності. Щільність бетонної суміші є величиною відомою ( $\rho=1700 \dots 2400 \text{ кг/м}^3$ ), де нижня межа відповідає початку ущільнення, а верхня – кінцю ущільнення. Швидкість розпо-

всюдження поздовжніх пружних хвиль визначається за формулою [7]

$$c = \sqrt{E/\rho}, \quad (7)$$

де  $E$  – модуль пружності.

Швидкість розповсюдження хвиль за даними літературних джерел коливаються в доволі широких межах від 14 до 150 м/с. В роботі [8] приводяться числові значення швидкості розповсюдження хвиль в межах 50...100 м/с. В той же час в роботі [9] наведені значення швидкості в межах 30...40 м/с. Цікавою є залежність (рис. 2) швидкості розповсюдження хвиль і акустичного опору  $Z$  від модуля пружності бетонної суміші [10].

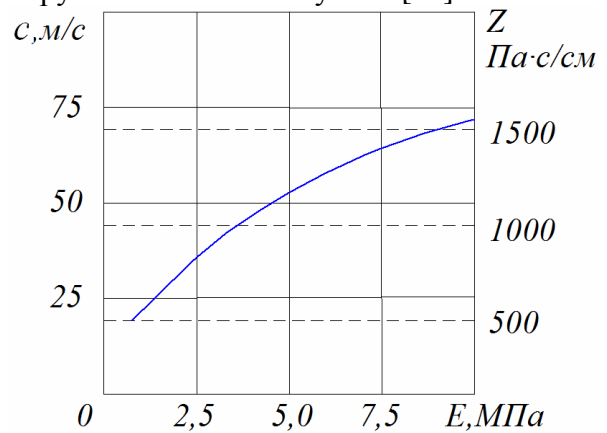


Рис. 2. Залежність швидкості розповсюдження хвиль і акустичного опору від модуля пружності бетонної суміші

Fig. 2. Dependence of wave propagation and acoustic impedance modulus of elasticity of concrete

Питомий акустичний опір бетонної суміші визначався за відомою із акустики [11] формулою

$$Z = \sqrt{E\rho} = \rho c . \quad (8)$$

Варто зазначити, що числові значення питомого опору знаходяться між відповідними показниками для повітря і води та на один порядок менші акустичного опору води.

Очевидно, що значна різниця в числових значеннях швидкості розповсюдження хвиль обумовлена складністю точного визначення модуля пружності так як бетонна суміш є складною дисперсною системою, що складається із різних за своєю природою складових: заповнювача, піску, цементу, води і повітря. Всі ці складові

мають різні модулі пружності: заповнювач ( $E=0,2 \cdot 10^4 \dots 5,0 \cdot 10^4$  МПа), цементний клінкер ( $E=2 \cdot 10^4$  МПа), об'ємний модуль пружності води ( $E=2 \cdot 10^3$  МПа), повітря ( $E=0,146$  МПа) [10]. Разом з тим модуль пружності бетонної суміші має значно менші значення ( $E=0,025 \dots 0,075$  МПа). Наявність і вплив повітря на модуль пружності бетонної суміші мають значно менше значення, і ця обставина повинна бути врахована у виборі математичної моделі і, відповідно, при визначенні параметрів віброустановки та її конструкції. Зв'язок модуля пружності бетонної суміші з пористістю (рис. 3) є підтвердженням цієї тези [1, 4].

Ще одна залежність між параметрами має вплив на визначення режимів роботи віброустановки. Це вплив частоти коливань на швидкість розповсюдження та довжину хвиль (рис. 4). В першому випадку така залежність впливає на вибір моделі, а в другому – на режим роботи установки (резонансний або зарезонансний). Якщо взяти до уваги, що довжина хвилі  $\lambda = cf$ , то виникає питання щодо співвідношення швидкості і частоти. Як витікає із графіка, із збільшенням частоти зростає і швидкість, що вступає в протиріччя з відомою формулою визначення довжини хвилі. Однак при ущільненні бетонних сумішей при формуванні горизонтальних поверхонь мають місце незначні за величиною висота стовпа суміші, частота, як правило, є незмінною; важливо також мати числові значення параметрів  $f$  і  $c$ . Область зміни значень швидкостей розповсюдження хвиль по лінії зміни частоти коливань дає можливість вважати, що в межах сталих параметрів коливань необхідні параметри практично не змінюються.

Якщо розглянуті параметри визначають процес руху віброустановки, то енергетичні характеристики в значній мірі залежать від в'язкості конкретного складу бетонної суміші. Крім цього, в'язкість як проявлення процесу зсувних деформацій є визначальним параметром початкового процесу зміни стану бетонної суміші у напрямку її ущільнення. Саме тому визначенню в'язкості присвячена значна

низка робіт з теорії вібраційної технології ущільнення будівельних сумішей [1- 11]. Виявлено, що в'язкість залежить від напруг зсуву і швидкості деформації, причому ця залежність є як лінійною, так і нелінійною.

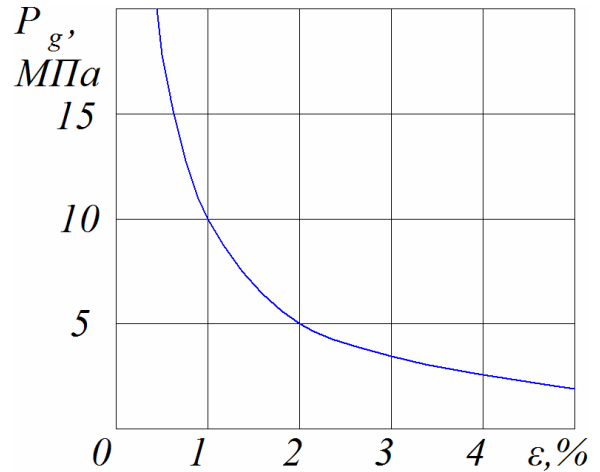


Рис. 3. Залежність динамічного модуля пружності бетонної суміші  $p_g$  від пористості  $\epsilon$

Fig. 3. The dependence of the dynamic modulus of elasticity of concrete mixture  $p_g$  porosity  $\epsilon$

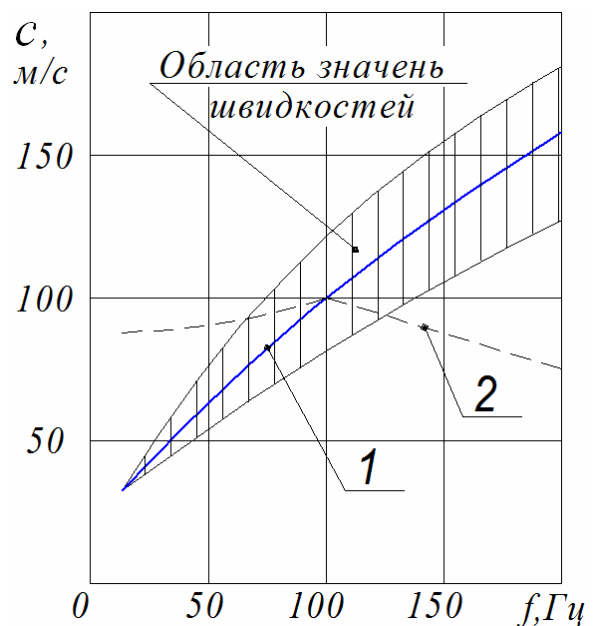


Рис.4. Вплив частоти коливань вібратора на швидкість розповсюдження (1) і довжину (2) хвиль

Fig.4. Effect of vibration frequency of the vibrator on the rate spread (1) and length (2) waves

В'язкість суміші характеризується коефіцієнтом в'язкості  $\eta$  який визначає

залежність між градієнтом швидкості  $dv/dx$  і дотичною напругою  $\tau$

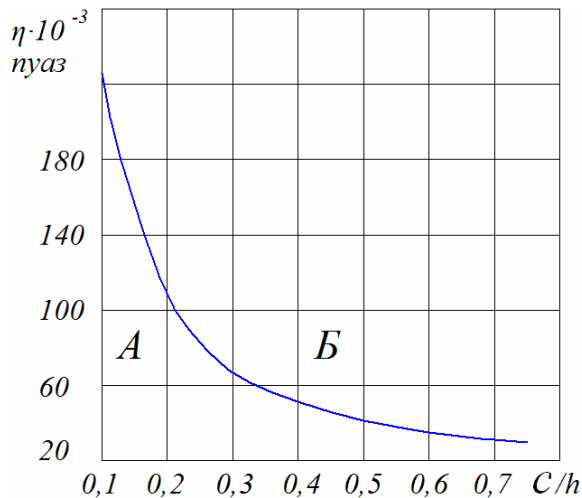
$$\tau_0 = \eta (dv / dx) . \quad (9)$$

Визначення в'язкості базуються на тому, що сила внутрішнього тертя дорівнює за величиною, але зворотна за напрямом силі, що діє зовні, пропорційна площі шару, до якого прикладена ця сила, і градієнту швидкості руху частинок матеріалу. За межами граничної напруги зсуву відбувається процес швидкого збільшення рухомості бетонної суміші, яка втрачає статичну стійкість, здійснюється переукладання заповнювачів і суміш переходить в новий, більш компактний стан, а наявне повітря певним чином вилучається або стискується.

У відповідності до моделі Бінгама для переміщення вібропристрою рівняння (9) має такий вид:

$$\tau = \tau_0 + \eta (dv / dx) . \quad (10)$$

де  $\tau$  - дотична напруга в шарі суміші при переміщенні вібропристрою.



**Рис.5.** Графік граничних градієнтів швидкості: А – область ущільнення без порушення суцільності шару; Б – з розривами

**Fig.5.** Schedule boundary gradients rate: A - seal region without discontinuity layer; B - with breaks

В роботі [12] наведено графік (рис.5), який засвідчує, що граничний градієнт швидкості із збільшенням товщини виробу має зменшуватися. Пропонується наступна залежність граничних швидкостей формування від в'язкості  $\eta$  бетонної су-

міші в процесі її ущільнення і висоти шару суміші  $h$  :

$$v = \frac{k_1 k_2 h}{\eta} , \quad (11)$$

де  $k_1, k_2$  - коефіцієнти, що враховують склад суміші і армування відповідно.

Таким чином, можна визначити наступні параметри поверхневої віброустановки (для зручності представимо в безрозмірному вигляді):

$$\begin{aligned} k_y &= \rho / \rho_0; \\ n_g &= fl / v; \\ k_F &= F_0 / mg; \\ k_p &= p / \rho_0 h; \\ k_n &= e / h; \\ \bar{X} &= m_0 r_0 / mh, \end{aligned} \quad (12)$$

де  $k_y$  - коефіцієнт ущільнення,  $n_g$  - число вібрацій на елементарній ділянці поверхні суміші,  $k_F$  - коефіцієнт вібрації,  $k_p$  - коефіцієнт тиску,  $k_n$  - коефіцієнт відносного переміщення,  $\bar{X}$  - відносна амплітуда коливань;  $\rho, \rho_0$  - кінцева і початкова щільності;  $f, l, v$  - частота коливань вібратора, довжина поверхні в напрямку переміщення вібропристрою і швидкість переміщення вібропристрою відповідно;  $F_0, mg$  - амплітуда змушуючої сили і сили ваги вібропристрою;  $p, h$  - тиск на суміш і її висота;  $m_0 r$  - статичний момент маси дебалансів;  $m$  - маса вібропристрою.

Для розрахунку параметрів вібропристрою необхідно знати числові значення відповідних параметрів, серед яких найбільш важливими є частота коливань і швидкість переміщення віброоргана.

## ВИСНОВКИ

1. Визначені основні параметри робочого процесу вібропристрою, які дають можливість сформулювати алгоритм і методику інженерного розрахунку вібропристрою.
2. Виявлено вплив реологічних характеристик на параметри руху вібропристрою.
3. Встановлені основні безрозмірні параметри для оцінки ефективності процесу ущільнення бетонної суміші.

ЛІТЕРАТУРА

1. Руденко И.Ф. Формование изделий поверхностными виброштампами / И.Ф.Руденко. М.: Стройиздат, 1972. – 165 с.
2. Савинов О.А. Теория и методы вибрационного формования железобетонных изделий / О.А. Савинов, Е.В. Лавринович. – Л.: Стройиздат, 1972. – 153 с.
3. Гарнець В.М. Прогресивні бетоноформуючі агрегати та комплекси / В.М. Гарнець. – К.: Будівельник, 1991. – 144 с.
4. Руденко И.Ф. Упругие и неупругие силы сопротивления бетонной смеси колебаниям / И.Ф. Руденко. В сб. «Технология виброформования железобетонных изделий» - М.: Стройиздат, 1970. – С.10-33.
5. Чубук Ю.Ф. Вибрационные машины для уплотнения бетонных смесей / Ю.Ф. Чубук, И.И. Назаренко, В.Н. Гарнец. – К.: Вища школа, 1985. – 168 с.
6. Маслов А.Г. Вибрационные машины и процессы в дорожном строительстве / А.Г. Маслов, В.М. Пономарёв. – К.: Будівельник, 1985. – 128 с.
7. Назаренко І.І. Вібраційні машини і процеси будівельної індустрії: Навчальний посібник / І.І. Назаренко. – К.:КНУБА, 2007. – 230 с.
8. Файтельсон Л.А. Вертикальное формование сборных железобетонных конструкций методом вибропоршня / Л.А. Файтельсон, П.П. Линартс, И.П. Бриедис. В сб. трудов НИИЖБ, вып.33. М.: Стройиздат, 1964. С.293 – 333.
9. Осмаков С.А. Виброударные формовочные машины / С.А. Осмаков, Ф.Г. Брауде. – Л.: Стройиздат, 1976. – 128 с.
10. Миклашевский Е.П. Глубинное вибрирование бетонной смеси / Е.П. Миклашевский. – М.: Стройиздат, 1981. – 176 с.
11. Горелик Г.С. Колебания и волны. / Г.С. Горелик. – М.: Наука, 1959. – 245 с.
12. Руденко И.Ф. О вязкости вибрируемой бетонной смеси. В сб. Технология виброформования железобетонных изделий / И.Ф. Руденко, Е.З. Аксельрод, С.А. Селиванова и др. М.: Стройиздат, 1970. – С.34 – 66.
2. Savinova O.A., Lavrynovych E.V., 1972. Teoriya i metody vibratsyonnoho formovaniya zhelezobetonnyh izdeliy [Theory and methods of concrete oscillation formation of products]. Leningrad, Stroiizdat Publ., 153. – (in Russian)
3. Garnets V.M., 1991. Progresyvni betonoformuyuchi agregaty ta kompleksi [Progressive to form a concrete units and systems]. Kyiv, Builder Publ., 144. – (in Ukrainian)
4. Rudenko I.F., 1970. Upruhye i neuprugye sily soprotivleniya betonnoy smesi kolebaniyam [Resilient and not resilient forces of resistance cjncrete mixture fluctuations]. In Sat. "Technology of concrete vybroformovanyya of products" – Moscow, Stroiizdat Publ.,10-33.
5. Chubuk Y.F., Nazarenko I.I., Garnets V.N., 1985. Vibratsyonnye mashyny i protsesy v dorozhnom stroitelstve [Oscillation machines for compression of concrete mixture]. Kyiv, High School Publ., 168. – (in Russian)
6. Maslov A.G., Ponomariov V.M., 1985. Vybratsyonnye machyny i protsesy budivelnoi industrii [Oscillation machines and processes in the road building]. Kyiv, Builder Publ., 128. – (in Russian)
7. Nazarenko I.I., 2007. Vibratsiyny mashyny I protsesy budivelnoi industrii: navchalnyy posibnyk [Vibrating machines and processes of the construction industry: Textbook]. Kyiv, KNUCA, 230. – (in Ukrainian)
8. Faitelson L.A., Linarts P.P., Briedis I.P., 1964. Vertikalnoe formovaniye sbornyh zhelezobetonnyh konstruksyy metodom vibroporshnya [Vertical formation of combined ferroconcrete designs by a vibropiston method]. NIIZhB works, Vol. 33. Moscow, Stroyizdat, 293 - 333.
9. Osmakov S.A., Braude F.G., 1976. Vibroudarnye formovochnye mashyny [Vibro-molding machines]. Leningrad, Stroyizdat Publ., 128. – (in Russian)
10. Miklashevskii E.P., 1981. Glubinnoe vibrirovaniye betonnoy smesi [Deep vibration of concrete]. Moscow, Stroyizdat, 176. – (in Russian)
11. Gorelik G.S., 1959. Kolebaniya i volny [Oscillations and waves]. Moscow, Nauka Publ., 245. – (in Russian)
12. Rudenko I.F., Axelrod E.Z., Selivanov S.A., 1970. O vyazkosti betonnoy smesi [About viscosity between vibrating concrete] In Proc. Technology vibromolding concrete products. Moscow, Stroyizdat, 34-66.

REFERENCES

1. Rudenko I.F., 1972. Formovanie izdeliy poverhnostnymi vibroshtampami [Molding of products superficial Vibrating stamps]. Moscow, Stroiizdat, 165. – (in Russian)