

УДК 69.00.25

ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ МОДЕЛІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ УЩІЛЬНЕННЯ БУДІВЕЛЬНОЇ СУМІШІ

*I.I. Назаренко, А.Т. Свідерський**

*Київський національний університет будівництва і архітектури,
03680, Повітрофлотський просп., 31, Київ, Україна, tolyasv@ukr.net*

АНОТАЦІЯ. Розглянута модель технологічного процесу ущільнення будівельної суміші з урахуванням закономірності руху робочого органу. Розраховані динамічні параметри машини, визначені з урахуванням бетонної суміші. Встановлено, що виробництво якісних підлог можливе при амплітудах коливань вібратора, які перевищують розрахункові в 1,5-2 рази.

Ключові слова: вібратор, технологічний процес ущільнення, коефіцієнт динамічності, гетерогена рідина, параметри вібратора, в'язкість бетонної суміші

ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА УПЛОТНЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ СМЕСИ

*И.И. Назаренко, А.Т. Свидерский**

*Киевский национальный университет строительства и архитектуры,
03680, Воздухофлотский просп., 31, Киев, Украина, tolyasv@ukr.net*

АННОТАЦИЯ. Рассмотрена модель технологического процесса уплотнения строительной смеси с учетом закономерности движения рабочего органа. Рассчитаны динамические параметры машины, определенные с учетом бетонной смеси. Установлено, что производство качественных полов возможно при амплитудах колебаний вибратора, превышающих расчетные в 1,5-2 раза.

Ключевые слова: вибратор, технологический процесс уплотнения, коэффициент динамичности, гетерогенная жидкость, параметры вибратора, вязкость бетонной смеси

ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ МОДЕЛІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ УЩІЛЬНЕННЯ БУДІВЕЛЬНОЇ СУМІШІ

*I.I. Nazarenko, A.T. Svidersky**

*Kyiv National University of Construction and Architecture
03680, Povitroflotsky av.31, Kyiv, Ukraine, tolyasv@ukr.net*

ABSTRACT. The model of the technological process of compaction of construction mixture is considered, taking into account the regularity of movement of the working body. Dynamic parameters of the machine are calculated, determined considering the concrete mix. It was established that the production of qualitative floors is possible with amplitudes of oscillations of the vibrator, which exceed 1.5-2 times the calculated.

Keywords: vibrator, technological process of compaction, dynamic coefficient, heterogeneous fluid, vibrator parameters, viscosity of concrete mix

Постановка проблеми. Зазвичай, при визначенні динамічних параметрів власне вібраторів для ущільнення бетонних сумішей їх моделюють системами, в яких маса, пружність і опір враховуються окремо [1-3]. Такі моделі цілком виправдані при вивченні руху вібраторів, оскільки їх робочий орган є твердим тілом. Всі точки робочого органу при цьому переміщуються у фазі з однаковою амплітудою коливань. Тому поточне значення переміщення робочих органів вібраторів (у горизонтальному і вертикальному напрямках) залежить від єдиної змінної часу, а їх рух описується системою звичайних диференціальних рівнянь. Однак в рух приводиться не тільки робочий орган, а й сама будівельна суміш, яка під впливом вібрації ущільнюється.



Аналіз останніх досліджень та публікацій. Проведені дослідження на віброплощині [10], а також поверхневої і глибинної вібромашин показують, що бетонна суміш робить істотний вплив не тільки на величину, а й на сам характер зміни амплітуди переміщення робочого органу. Результати дослідів дозволяють сформулювати такі висновки. По-перше, бетонна суміш робить помітний вплив на характер зміни і величину амплітуди переміщення робочого органу вібромашини. По-друге, спроба врахувати цей вплив простим підсумовуванням коливних мас машини і бетонної суміші (так звана модель бетонної суміші як системи зі зосередженими параметрами) призводить при певних значеннях висот стовпа бетонної суміші (або протяжності по горизонталі формованого ареалу бетонної суміші) до значних помилок при розрахунках. Тепер вже модель бетонної суміші як системи зі зосередженими параметрами не спрацьовує [6-8]. Отже, отримані раніше залежності для визначення динамічних параметрів вібромашин [1-8] виявляються непридатними для інженерних розрахунків подібних систем (в умовах взаємодії їх робочих органів з бетонною сумішшю). Щоб внести відповідні корективи в подібні залежності, слід встановити математичну модель бетонної суміші як системи з розподіленими параметрами і визначити характеристики останньої.

Вперше професор Шмигальський В.Н. [9] звернув увагу на те, що бетонну суміш слід представляти як систему з розподіленими параметрами. Тоді її інерційні, пружні і дисипативні властивості розподілені по всьому об'єму бетонної суміші, а не зосереджені у вигляді маси, пружини (жорсткості) і демпфера (типова модель власне вібромашини). Кожен елементарний шар бетонної суміші замінюють в рамках такої моделі (з розподіленими параметрами) на мініатюрну масу, пов'язану з іншою такою ж масою, пружиною і демпфером (у вертикальному напрямку, тобто вглиб бетонної суміші). Фактично кожен шар бетонної суміші тепер представляє собою систему з одним ступенем свободи руху (у вертикальному напрямку). В результаті можна прийти до системи з нескінченним числом ступенів свободи (у вказаному напрямку), тобто до системи з розподіленими параметрами [4, 5]. Процес руху такої моделі бетонної суміші зводиться до наступного фізичного механізму. Робочий орган вібромашини є джерелом енергії для бетонної суміші, а шар її в контактній з робочим органом зоні втягується таким чином в коливально-хвильовий процес і передає енергію коливань подальшим верствам бетонної суміші, розташованим в її глибині. Однак існує ще один механізм (і ступінь свободи руху для елементарного шару бетонної суміші)-у горизонтальному напрямку. Енергія від шару до шару бетонної суміші може передаватися внаслідок тертя контактуючих між собою сусідніх шарів бетонної суміші. При цьому в бетонній суміші поряд з поетапним стисненням і розтягненням шарів (у вертикальному напрямку) виникають т.зв. зсувні переміщення і деформації. Процес залучення шарів бетонної суміші в коливання (поздовжні або зсувні) відбуватиметься не миттєво, а з запізненням по відношенню до попередніх верств бетонної суміші внаслідок їх інертності. Поступово всі верстви бетонної суміші (якщо загасання або дисипація в бетонній суміші невеликі), обмежені геометричними контурами ущільнюваного середовища (жорсткими кордонами форми, стінками опалубки і т.п.), перейдуть в коливання (з тією чи іншою поляризацією), а потім коливання почне поширюватися за обсягом суміші в обох зазначених напрямках, тобто виникне хвильовий процес.

Мета роботи. Отже, динамічні параметри машини повинні бути визначені з урахуванням бетонної суміші. Завдання роботи полягає в тому, щоб відшукати закономірності руху робочого органу, що взаємодіє з бетонною сумішшю, так як, зрештою, фактичні технологічні параметри визначають ефективність процесу ущільнення бетонної суміші.

Викладення основного матеріалу дослідження. По суті, технологічний процес ущільнення бетонної суміші зводиться (особливо при влаштуванні підлог) до руху шарів останньої, як в'язкої нестисливої рідини [11], а коливально-хвильові процеси в цій рідині обумовлені гармонійними коливаннями плоскої безмежної стінки (модель робочого органу віброформуванняльної машини для ущільнення бетонної підлоги) у своїй площині.

Розглянемо основні особливості та характеристики такої моделі технологічного процесу ущільнення бетонної суміші при влаштуванні підлог.

Нехай необмежена плоска поверхня (площина $xу$) стикається з заспокоюною в цілому нестисливою в'язкою рідиною (бетонною сумішшю), і нехай ця поверхня здійснює гармонійні (горизонтальні) коливання в своїй площині з частотою ω в напрямку $у$. Питається, який при цьому виникає в рідині ($z > 0$) рух, якщо рідина (бетонна суміш) в цілому спочиває? Використовуючи граничні умови, згідно з якими швидкість рідини (бетонної суміші) у поверхні збігається зі швидкістю поверхні (тобто робочого органу вібрмашини) $v = v_y = v_0 \cdot \exp(-i \cdot \omega \cdot t)$, умова нестискуваності рідини (бетонної суміші) $div \vec{v} = 0$ і геометрію завдання, неважко показати, що в розглянутому випадку $(\vec{v} \cdot \nabla)\vec{v} = 0$, $p = const$ (де p -тиск в бетонній суміші) і рівняння руху Нав'є-Стокса зводиться до лінійного одновимірного рівняння типу рівняння теплопровідності:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\eta}{\rho} \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}. \quad (1)$$

Тут η -коефіцієнт динамічної в'язкості бетонної суміші, ρ -її щільність. Відшукаючи періодичне рішення (1) у вигляді $v = v_0 \cdot \exp[-i \cdot (\omega \cdot t - k_B \cdot z)]$, де k_B -хвильове число, знайдемо, використовуючи граничні умови при $z = 0$,

$$i \cdot \omega = \frac{\eta}{\rho} \cdot k_B^2 = \tilde{v} \cdot k_B^2, i = \sqrt{-1}, \tilde{v} = \frac{\eta}{\rho} \quad (2)$$

Звідси, оскільки $\sqrt{i} = \pm(1 + i)/\sqrt{2}$, отримуємо:

$$k_B = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda_B} = \sqrt{\frac{i \cdot \omega \cdot \rho}{\eta}} = \pm \frac{(i+1)}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{\omega \cdot \rho}{\eta}}. \quad (3)$$

Тоді,

$$v = v_0 \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega \cdot \rho}{2 \cdot \eta}} \cdot z\right) \cdot \exp\left(-i \cdot \left(\omega \cdot t - \sqrt{\frac{\omega \cdot \rho}{2 \cdot \eta}} \cdot z\right)\right). \quad (4)$$

Тут у уявної частини k_B узятий знак «+», інакше швидкість при $z > 0$ в бетонній суміші зростала б.

Отриманий результат показує, що в в'язкій нестисливій рідині (бетонній суміші) в своїй площині пластина що коливається (робочий орган вібрмашини, контактує з ущільнюваною бетонною сумішшю) випромінює поперечні хвилі з хвильовим числом k_B , які прийнято називати в'язкими або зсувними хвилями, іноді хвилями Стокса.

Ці хвилі поширюються зі швидкістю:

$$c_B = \sqrt{2 \cdot \eta \cdot \omega / \rho} \quad (5)$$

і мають довжину:

$$\frac{\lambda_B}{2 \cdot \pi} = \sqrt{\frac{2 \cdot \eta}{\omega \cdot \rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \tilde{v}}{\omega}}. \quad (6)$$

Коефіцієнт загасання в'язкої хвилі α_B , згідно (6), має значення:

$$\alpha_B = \sqrt{\frac{\omega \cdot \rho}{2 \cdot \eta}}. \quad (7)$$

В'язка хвиля практично затухає на відстані, рівному довжині хвилі; в деякому тонкому граничному шарі, товщина якого близько λ_B , вона все ж поширюється.

Розглянемо далі більш детально коефіцієнт динамічної в'язкості бетонної суміші. В умовах текучості віброваної бетонної суміші останню можна моделювати як нестисливої в'язке тіло, основною реологічною характеристикою якого є коефіцієнт вібров'язкості [6, 11].



Розвиток технології віброформування бетонних сумішей при влаштуванні підлог, створення відповідних формувальних машин вимагає крім якісної оцінки реологічних властивостей віброваної бетонної суміші та її кількісної оцінки, тобто слід визначити вібров'язкість бетонної суміші залежно від режимів вібрування, тиску, складів бетону і т.п.

При цьому слід врахувати обмеження, наведені нижче.

Бетонна суміш є гетерогенної рідиною, до складу якої входять наступні компоненти: а) розчин (квазінеперервна рідина); б) тверда фаза (великий заповнювач). Безумовно, характер перебігу гетерогенної бетонної суміші різко відрізняється від характеру перебігу бетонної суміші в рамках моделі однорідної рідини. При віброформуванні бетонної суміші поступальне переміщення її великого заповнювача в шарі буде утруднено внаслідок наявності тертя сусідніх шарів суміші, що приводить в кінцевому підсумку і до обертання частинок (в шарі) навколо своєї осі. Така фізична картина руху частинок шару дозволяє стверджувати, що поле швидкостей потоку істотно спотворюється, втрачає свій ламінарний характер і стає турбулентним. Кількісна оцінка (міра) відхилення типу перебігу бетонної суміші (від ламінарного до турбулентного) залежить від великої кількості різноманітних факторів, як-то: 1) концентрації великого заповнювача; 2) геометричних факторів потоку; 3) наявності/відсутності областей звуження або викривлення траєкторії руху потоку віброваної бетонної суміші. При цьому слід враховувати так звані об'ємний і гідродинамічний фактори, багато в чому визначають власне величину вібров'язкості бетонної суміші η [6, 11].

Вібров'язкість бетонної суміші по товщині формованого шару (підлоги), безумовно, змінна. Це зумовлено насамперед анізотропією коливань, загасанням їх у міру віддалення від поверхні (джерела вібрації-поверхневого вібратора).

Потужність, споживана одиницею об'єму віброваної бетонної суміші залежить від цілого ряду параметрів, а саме: 1) умов контакту вібратора з бетонною сумішшю; 2) параметрів власне вібратора.

Оскільки між вібратором і формованою бетонною сумішшю існує досить складний характер взаємодії (у ряді випадків носить характер відривних коливань), то неможливо встановити детермінований (чітко визначений) зв'язок (або взаємозв'язок) між характеристиками коливань вібратора і бетонної суміші. У рамках т.зв. умовної, середньої, ефективної вібров'язкості [6] виробничі умови при влаштуванні підлог найбільш адекватно враховуються разом з характером перебігу суміші, власне геометрією виробу, характером контакту вібратора з бетонною сумішшю, величиною чинного статичного тиску. Зазвичай середню, ефективну в'язкість η бетонної суміші можна застосовувати для вирішення завдань формозміни суміші при влаштуванні підлог. Кількісна оцінка вібров'язкості дається на основі законів руху в'язких гомогенних середовищ. Основи теорії механізму в'язкості бетонної суміші були закладені в роботах [6, 11]. Якщо провести аналогію між процесом зниження в'язкості рідини за рахунок теплового розширення і в'язкості бетонної суміші за рахунок розширення в результаті коливань складових частинок останньої, то залежності вібров'язкості від режимів вібрування практично зводяться до двох наступних [6]:

$$\eta = \eta_0 + \frac{\beta}{U}; \quad (8)$$

$$\eta = \eta_0 \cdot \exp(\beta/U). \quad (9)$$

Тут U -критерій інтенсивності вібрування бетонної суміші, β, β' -коефіцієнти тиксотропії, η_0 -в'язкість бетонної суміші за відсутності вібрацій. Формули (1.8) і (1.9) дають практично однаковий результат, як показано в [11].

Для вибору U -критерію при поверхневому віброформуванні бетонної суміші у справжній роботі використовується наступна сукупність робочих параметрів вібратора і суміші:

$$U = \frac{A^* \cdot \omega^3}{h}, \quad (10)$$

де A^* - амплітуда безвідривних коливань вібратора, зчепленого з бетонною сумішшю, ω - кругова частота його коливань, h - товщина віброформованої бетонної суміші.

Для A^* в [6] отримана формула:

$$A^* = \frac{A_l + \tilde{A}}{2} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{h \cdot \varepsilon \cdot P_{st}}{P_0 + P_{st}} + \tilde{A} \right), \quad (11)$$

де A_l - амплітуда руху вібратора щодо його середнього положення вгору в контакті з бетонною сумішшю, \tilde{A} - при русі останнього вниз, ε - пористість бетонної суміші, P_{st} , P_0 - статичний тиск вібратора на бетонну суміш і атмосферний тиски, відповідно.

Слід зазначити, що вираз для ε досить умовним, тому що не враховано швидкість розвантаження бетонної суміші та її зчеплення власне з вібратором.

Для знаходження коефіцієнта ε (коефіцієнта порожнеч) слід скористатися динамічним методом, розвиненим в [6], відповідно до якого необхідно знайти жорсткість бетонної суміші, як підстави, використовуючи резонансну частоту ($\omega_{рез}$) коливань шару бетонної суміші товщиною h :

$$\omega_{резn} = \left(n + \frac{1}{2} \right) \cdot \frac{\pi}{h} \cdot \sqrt{\frac{(P_0 + P_{st}) \cdot (P_0 + P_{st} + h \cdot \rho \cdot g) \cdot g}{P_0 \cdot h \cdot \varepsilon}}, \quad (12)$$

де $n \in N$, $g = 9.8 \text{ м/с}^2$, $\pi = 3.14$. Тоді з (12) ε легко отримати:

$$\varepsilon = \frac{\left(n + \frac{1}{2} \right)^2 \cdot \pi^2 \cdot (P_0 + P_{st}) \cdot (P_0 + P_{st} + h \cdot \rho \cdot g) \cdot g}{h^3 \cdot P_0 \cdot \omega_{резn}^2}. \quad (13)$$

В (12) і (13) ρ - щільність бетонної суміші.

При визначенні $\omega_{резn}$ та ε за формулами (12) і (13), відповідно, використана гіпотеза [6] про те, що пружні властивості бетонної суміші в основному визначаються при вібрації останньої защемленим в ній повітрям, яке з'єднується в єдину систему каналів, що утворилися в результаті розриву суцільності бетонної суміші між частинками [6, 11].

«Повітряна природа» зв'язків між деформацією і напругою віброваної бетонної суміші підтверджена експериментально в [12]. Слід зазначити, що повітря, яке міститься в бетонній суміші, володіє найбільшою піддатливістю до деформування в порівнянні з іншими компонентами бетонної суміші, а в межах малих деформацій останньої, які спостерігаються при коливаннях, можна застосовувати для виведення (12), (13) звичайний лінійний закон Гука.

Якщо амплітуда коливань вібратора перевищує A_l , можливе виникнення ефекту підсосу повітря, що супроводжується відривом вібратора від бетонної суміші. Використовуючи уявлення про пружні властивості бетонних сумішей, що мають «повітряну природу», зазначену вище, можна встановити критерій, що дозволяє реалізувати в процесі ущільнення умову безвідривного руху:

$$A_l \leq \delta = h \cdot \varepsilon \cdot \left(1 - \frac{P_0}{P_0 + P_{st}} \right), \quad (14)$$

де δ - пружна осадка обмежувача коливань вібратора під дією ваги останнього.

Необхідно відзначити наступне: відрив вібратора від бетонної суміші призводить до виникнення розрідження і підсосу повітря в простір під вібратором. Негативною стороною цього процесу буде утворення каверн і раковин в процесі влаштування підлог. При цьому умова (14) є необхідною для безвідривних коливань вібратора і формованої бетонної суміші, але не достатньою. Бетонній суміші також притаманні інерційні складові опору руху. Тому необхідно порівнювати швидкість руху вібратора і розвантаження бетонної суміші. Якщо частота власних коливань стовпа (шару) бетонної суміші $\omega_{резn}$ нижче частоти вимушених коливань самого вібратора ω_v ($\omega_{резn} < \omega_v$), то при русі вгору вібратор випереджатиме розвантаження бетонної суміші, що призводить до відриву вібратора навіть при амплітудах, менших A_l .



Якщо врахувати адгезійне та вакуумне зчеплення вібратора з бетонною сумішшю, то і при амплітудах коливань вібратора, які перевищують розрахункові в 1,5-2 рази, можливе якісне виробництво підлог, які мають хорошу поверхню (мінімальна кількість каверн і раковин).

У табл. 1 наведені значення A^* і A_l для різних h і типових значень $\varepsilon = 0,0025 \dots 0,035$; $P_{st} = 10000 \dots 30000$ Па, $A = 0,0001 \dots 0,0003$ для бетонних сумішей з великим заповнювачем 1:1,6:2,85 при $V/\Omega = 0,4$ ($\eta = \eta_0 = 4000 \frac{\text{кг}}{\text{м}\cdot\text{с}}, \alpha = 36,5 \frac{\text{кг}}{\text{м}\cdot\text{с}^4}$) і для бетонних сумішей з дрібним заповнювачем 1:2,65:(0,35-0,4) при $V/\Omega = 0,35$ ($\eta = \eta_0 = 46000 \frac{\text{кг}}{\text{м}\cdot\text{с}}, \alpha = 5600 \frac{\text{кг}}{\text{м}\cdot\text{с}^4}$).

Табл. 1. Залежність амплітуди безвідривних коливань (A^*) і її граничного значення (A_l) від висоти стовпа бетонної суміші (h)

$h, \text{м}$	$A^*, \text{м}$	$A_l, \text{м}$
0,10	$6,24 \cdot 10^{-5} \dots 2,01 \cdot 10^{-4}$	$2,48 \cdot 10^{-5} \dots 1,02 \cdot 10^{-4}$
0,15	$6,86 \cdot 10^{-5} \dots 2,26 \cdot 10^{-4}$	$3,71 \cdot 10^{-5} \dots 1,53 \cdot 10^{-4}$
0,20	$7,48 \cdot 10^{-5} \dots 2,52 \cdot 10^{-4}$	$4,95 \cdot 10^{-5} \dots 2,04 \cdot 10^{-4}$

У табл. 2 для сумішей того ж складу і типових значень ε, P_{st}, A (приведених вище) визначені значення критерію інтенсивності коливань U для різних значень h і частот коливань вібратора ($f = \frac{\omega}{2\pi}$).

Табл. 2. Залежність критерію (U) інтенсивності коливань від частоти (f) коливань вібратора і висоти стовпа бетонної суміші (h)

$f, \text{Гц}$	$h, \text{м}$	$U, \text{с}^{-3}$
25	0,10	2418...7789
	0,15	1772...5851
	0,20	1449...4882
30	0,10	9902...31905
	0,15	7256...23967
	0,20	5934...19998
40	0,10	19341...62314
	0,15	14173...46810
	0,20	11589...39059

Висновки.

1. Потужність, споживана одиницею об'єму віброваної бетонної суміші залежить від цілого ряду параметрів, а саме: 1) умов контакту вібратора з бетонною сумішшю; 2) параметрів власне вібратора.
2. Динамічні параметри машини повинні бути визначені з урахуванням бетонної суміші.
3. При амплітудах коливань вібратора, які перевищують розрахункові в 1,5-2 рази, можливе якісне виробництво підлог, які мають хорошу поверхню

Література

1. Бауман В.А., Быховский И.И. Вибрационные машины и процессы в строительстве. – М.: Высшая школа, 1977. – 255с.
2. Вибрационные машины в строительстве и производстве строительных материалов: Справочник/ Под ред. Баумана В.А., Быховского И.И., Гольдштейна Б.Г. – М.: Машиностроение, 1970. – 548с.
3. Гольдштейн Б.Г., Петрунькин Л.П. Глубинные вибраторы для уплотнения бетона. – М.: Машиностроение, 1966. – 172с.

4. Гусев Б.В., Деминов А.Д., Крюков Б.И., Литвин Л.М., Логвиненко Е.А. Ударно-вибрационная технология уплотнения бетонных смесей. – М.: Стройиздат, 1982. — 152с.
5. Расчет параметров и выбор режимов работы установок продольногоризонтального вибрирования для изготовления железобетонных изделий. – К.: НИИСП Госстроя УССР, 1968.-31с.
6. Руденко И.Ф. Формование изделий поверхностными виброустройствами. – М.: Стройиздат, 1972. – 104с.
7. Руководство по технологии формования железобетонных изделий. – М.: Стройиздат, 1977. – 95с.
8. Савинов О.А., Лавринович Е.В. Теория и методы вибрационного формования железобетонных изделий. – М.; Л.: Стройиздат, 1972. – 152с.
9. Шмигальский В.Н. Формование изделий на виброплощадках. – М.: Стройиздат, 1968. – 104с.
10. Чубук Ю.Ф., Назаренко И.И., Гарнец В.Н. Вибрационные машины для уплотнения бетонных смесей. – К.: Вища школа. Головное изд-во, 1985. – 168с.
11. Десов А.Е. Вибрированный бетон. – М.: Госстройиздат, 1956.
12. Никитин А.Д. Закономерности в развитии обратимых и необратимых процессов движения составных частей сжимаемых бетонных смесей//Труды ЛИСИ, Л. –1963. –Вып. 42. –С.15-28.

REFERENCE

1. Bauman, V.A., Bykhovskiy, I.I. (1977). *Vibratsionnyye mashiny i protsessy v stroitel'stve [Vibration machines and processes in construction]*. Moscow: Vysshaya shkola. – (in Russian).
2. Bauman, V.A., Bykhovskog, I.I., Gol'dshteyn, B.G. (1970). *Vibratsionnyye mashiny v stroitel'stve i proizvodstve stroitel'nykh materialov Spravochnik [Vibration machines in the construction and production of building materials: Handbook]*. Moscow: Mashinostroyeniye. – (in Russian).
3. Gol'dshteyn, B.G., Petrun'kin, L.P. (1966). *Glubinnyye vibratory dlya uplotneniya betona [Deep vibrators for compacting concrete]*. Moscow, Mashinostroyeniye. – (in Russian).
4. Gusev, B.V., Deminov A.D., Kryukov, B.I., Litvin, L.M., Logvinenko, Ye.A. (1982). *Udarno-vibratsionnaya tekhnologiya uplotneniya betonnykh smesey [Shock-vibration technology of compacting concrete mixes]*. Moscow: Stroyizdat. – (in Russian).
5. *Raschet parametrov i vybor rezhimov raboty ustanovok prodol'nogorizontalnogo vibrirovaniya dlya izgotovleniya zhelezobetonnykh izdeliy [Calculation of parameters and selection of operating modes for longitudinal horizontally vibrating installations for the manufacture of reinforced concrete products]*. (1968). Kyiv: NIISP Gosstroya USSR. – (in Russian).
6. Rudenko, I.F. (1972). *Formovaniye izdeliy poverkhnostnymi vibroustroystvami [Shaping of products by surface vibro-devices]*. Moscow: Stroyizdat. – (in Russian).
7. *Rukovodstvo po tekhnologii formovaniya zhelezobetonnykh izdeliy [Guide to the technology of molding of reinforced concrete products]*. (1977). Moscow: Stroyizdat. – (in Russian).
8. Savinov, O.A., Lavrinovich, Ye.V. (1972). *Teoriya i metody vibratsionnogo formovaniya zhelezobetonnykh izdeliy [Theory and methods of vibrational molding of reinforced-concrete products]*. Moscow-Leningrad: Stroyizdat. – (in Russian).
9. Shmigal'skiy, V.N. (1968). *Formovaniye izdeliy na vibroploshchadkakh [Molding of products on vibrating platforms]*. Moscow: Stroyizdat. – (in Russian).
10. Chubuk, YU.F., Nazarenko, I.I., Garnets, V.N. (1985). *Vibratsionnyye mashiny dlya uplotneniya betonnykh smesey [Vibrating machines for compacting concrete mixtures]*. Kyiv: Vishcha shkola. Golovnoye izd-vo. – (in Russian).
11. Desov, A.Ye. (1956). *Vibrirovannyi beton [Vibrated concrete]*. Moscow: Gosstroyizdat. – (in Russian).
12. Nikitin, A.D. (1963). *Zakonomernosti v razvitii obratimyykh i neobratimyykh protsessov dvizheniya sostavnykh chastei szhimayemykh betonnykh smesey [Regularities in the development of reversible and irreversible processes of motion of constituent parts of compressible concrete mixtures]*. Proc. of LISI, 42, 15-28. – (in Russian).