

УДК 666.97.033.16

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВИБРАЦИОННОГО УПЛОТНЕНИЯ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ****Жанар Батсайхан**Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского  
ул. Первомайская, 20, м. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: kmt0.43@gmail.com

Описан механизм уплотнения под действием внешних вибрационных сил, при которых в бетонной смеси возникает переменное напряженно деформированное состояние, происходит разрушение первоначальных структурных связей и ослабляются связи между ее отдельными элементами, осуществляются конечные перемещения минеральных частиц с образованием более плотной упаковки. В качестве основного фактора, определяющего характер протекания процесса уплотнения, предложено использовать произведение напряжения на скорость вибрационного воздействия, представляющего мощность вибрационного воздействия на уплотняемую среду. Приведены аналитические выражения, позволяющие определить нарастание плотности бетонной смеси в функции времени в зависимости от вида вибрационной нагрузки и мощности подводимого вибрационного воздействия на уплотняемую среду. Приведены теоретические и экспериментальные значения удельной работы, обеспечивающей требуемое уплотнение до значений, требуемых технологическими нормами в зависимости от консистенции бетонной смеси при вертикальных и горизонтально направленных колебаниях.

**Ключевые слова:** теория уплотнения, бетонная смесь, плотность, мощность.

**ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВІБРАЦІЙНОГО УЩІЛЬНЕННЯ БЕТОННИХ СУМІШЕЙ****Жанар Батсайхан**Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, 39600, м. Кременчук, Україна. E-mail: kmt0.43@gmail.com

Описано механізм ущільнення під дією зовнішніх вібраційних сил, при яких в бетонній суміші виникає змінна напружено деформований стан, відбувається руйнування первинних структурних зв'язків і послаблюються зв'язки між її окремими елементами, здійснюються кінцеві переміщення мінеральних частинок з утворенням більш щільної упаковки. В якості основного фактора, що визначає характер протікання процесу ущільнення, запропоновано використовувати твір напруги на швидкість вібраційного впливу, що представляє потужність вібраційного впливу на ущільнюване середовище. Наведено аналітичні вирази, що дозволяють визначити наростання щільності бетонної суміші в функції часу в залежності від виду вібраційного навантаження та потужності підводиться вібраційного впливу на ущільнюване середовище. Наведено теоретичні та експериментальні значення питомої роботи, що забезпечує необхідну ущільнення до значень, необхідних технологічними нормами залежно від консистенції бетонної суміші при вертикальних і горизонтально направлених коливаннях.

**Ключові слова:** теорія ущільнення, бетонна суміш, щільність, потужність.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РОБОТЫ.** Для создания вибрационных машин необходимо достаточно точно определить их основные параметры, при которых обеспечивается необходимый малоэнергоемкий и эффективный режим вибрационного воздействия на уплотняемую среду в зависимости от физико-механических характеристик смеси, технологических и динамических процессов, протекающих при формировании структуры уплотняемой среды, конфигурации изделия, вида, направления и зоны вибрационного воздействия. К основным параметрам вибрационных машин относятся их масса, масса вибрационного рабочего органа и площадь его взаимодействия с уплотняемой средой, частота, амплитуда или размах вынужденных колебаний вибрационного рабочего органа, совершающего гармонические супергармонические или виброимпульсные колебания, частота собственных колебаний вибрационной машины, геометрические и кинематические параметры вибрационной машины, скорость перемещения вибрационного рабочего органа или продолжительность вибрационного воздействия на уплотняемую среду, защита обслуживающего персонала и окружающей среды от вредного влияния шума и вибрации при работе. Определение приведенных параметров должно происходить с учетом физико-механических свойств бетонной смеси, ее консистенции, размера и конфигурации изделия,

места, направления и зоны приложения вибрационного возмущения (глубинное или поверхностное вибрирование, наружное вибрирование вертикально и горизонтально направленными колебаниями, объемное вибрирование и вибрирование одночастотными и поличастотными колебаниями), требуемых прочностных показателей готового изделия, качества его поверхностей, а также требуемых показателей эффективности, энергоемкости, продолжительности вибрационного воздействия и прочности свежесформованного изделия.

Установление качественных и количественных зависимостей между названными требованиями и определяемыми параметрами вибрационной машины возможно на основе теории вибрационного уплотнения бетонных смесей, которая должна быть сформулирована в ясной и непротиворечивой форме, выражена математическими зависимостями и экспериментально подтверждена.

Существующая основная гипотеза вибрационного уплотнения связана с представлением о переходе бетонной смеси в разжиженное (тиксотропное) состояние под действием вибрации [1–3]. Объясняется, что в результате тиксотропии значительно снижаются силы вязкого сопротивления и наблюдается процесс сближения частиц, в основном под действием сил тяжести, хотя не исключается и действие динамических сил.

Для оценки эффективности вибрационного процесса уплотнения рядом авторов предлагалось использовать такие параметры, как произведение амплитуды колебаний  $A$  на угловую частоту колебаний  $\omega$ , а также ускорение  $A\omega^2$  или произведение скорости на ускорение, т.е.  $A^2\omega^3$  [4–6]. Эти показатели не могут дать надежной оценки эффективности уплотнения бетонных смесей, поскольку не учитывают ряд важных параметров: направление и вид вибрационного воздействия, геометрические размеры формуемого изделия и физико-механические характеристики бетонной смеси.

В уточненной теории, которая детально представлена в работах [7–10], описан механизм распространения упругопластических волн деформаций и разрушения структурных связей в бетонной среде, пластическое её течение и вытеснение из структуры смеси воздуха и образования плотной структуры под действием вибрации. Дается обоснование эффективности формования бетонных изделий из жестких и пластичных бетонных смесей на основе возникающих в бетонной среде напряжений, разрушающих структурные связи с определенной частотой вибрационного воздействия. Приводятся обоснованные аналитические зависимости для выбора основных параметров уплотняющих вибрационных машин, механизмов и рабочих органов. Однако представленная теория не в полной мере учитывает энергетический аспект вибрационного процесса уплотнения бетонных смесей, не раскрывает действие упругих, диссипативных, инерционных сил, сил неупругого сопротивления и требует дальнейшего уточнения.

Цель работы – создание теоретических основ вибрационного процесса уплотнения, позволяющих оценить эффективность и выбрать рациональные режимы вибрационного воздействия на бетонную смесь исходя из минимальной затраты энергии на процесс ее уплотнения.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Бетонная смесь представляет собой сложную многокомпонентную систему, состоящую из заполнителя (песка и щебня), вяжущего и воды, а также новообразований, возникающих при воздействии вяжущего с водой и зернами заполнителя, и вовлеченного воздуха. В жестких смесях объем воздуха достигает 20 – 25%, а в пластичных смесях до 10 – 15%. Вследствие взаимодействия сил поверхностного натяжения между жидкой фазой и частицами твердой фазы эта система приобретает связность и может рассматриваться как единое физическое тело.

Под воздействием внешних вибрационных сил в смеси возникает переменное напряженно деформированное состояние, происходит разрушение первоначальных структурных связей и ослабляются связи между ее отдельными элементами, осуществляются конечные перемещения минеральных частиц с образованием более плотной упаковки.

Поскольку напряжения  $\sigma$ , возникающие в уплотняемом слое при вибрационном воздействии, являются одним из основных факторов, влияющих на разрушение структурных связей и процесс уп-

лотнения, а также на поведение динамической системы «бетонная среда – вибрационная машина», логично предположить, что в качестве основного фактора, определяющего характер протекания процесса уплотнения, можно использовать произведение напряжения на скорость вибрационного воздействия, т.е.

$$P = \sigma V, \quad (1)$$

где  $P$  – мощность вибрационного воздействия рабочего органа вибрационной машины на уплотняемую среду;  $\sigma$  – нормальные напряжения, возникающие в уплотняемой среде при вибрационном уплотнении;  $V$  – амплитуда скорости вибрационного воздействия.

При гармонических колебаниях, когда амплитуда скорости вибрационного воздействия равна  $V = A\omega$ , мощность вибрационного воздействия рабочего органа вибрационной машины на уплотняемую среду определится из следующего выражения:

$$P = \sigma A \omega, \quad (2)$$

где  $A$  – амплитуда деформирования уплотняемой среды;  $\omega$  – угловая частота колебаний.

При этом удельная работа вибрационного процесса уплотнения определится из следующего выражения:

$$W = \sigma A \omega t_v, \quad (3)$$

где  $t_v$  – продолжительность вибрационного уплотнения.

Величину прироста плотности бетонной смеси от начального значения  $\rho_0$  до некоторого значения  $\rho$  в результате вибрационного воздействия можно найти из следующего эмпирического закона:

$$\Delta\rho_i = \zeta W^n, \quad (4)$$

где  $\Delta\rho_i$  – величина прироста плотности бетонной смеси в результате пластической деформации;  $\zeta$  и  $n$  – эмпирические коэффициенты, характеризующие упругопластическую деформацию при динамическом нагружении в виде вибрационного воздействия.

На основании выражения (4) определим текущее значение плотности  $\rho$ , которое достигается в результате затраченной удельной работы вибрационного процесса уплотнения  $W$ , т.е.

$$\rho = \rho_0 + \Delta\rho_i = \rho_0 + \zeta W^n, \quad (5)$$

где  $\rho_0$  – плотность бетонной смеси, которая подвергается вибрационному уплотнению (начальная плотность);  $\rho$  – достигнутая плотность бетонной смеси в результате приложенной работе вибрационного уплотнения.

Аналогичным образом определим необходимую, требуемую технологическими нормами плотность бетона, уплотненного вибрационным воздействием:

$$\rho_k = \rho_0 + \Delta\rho = \rho_0 + \zeta W_k^n, \quad (6)$$

где  $\rho_k$  – плотность бетонной смеси, соответствующая 100% уплотнению, требуемую технологическими нормами;  $\Delta\rho$  – величина прироста плотности бетонной смеси от начального  $\rho_0$  до конечного  $\rho_k$  значений плотности;  $W_k$  – удельная работа уплотнения бетонной смеси от начального  $\rho_0$  до конечного  $\rho_k$  значений плотности.

На основании выражений (5) и (6), получим следующее соотношение:

$$\frac{\rho - \rho_0}{\rho_k - \rho_0} = \left( \frac{W}{W_k} \right)^n, \quad (7)$$

откуда с учетом зависимости (3) получим формулу для определения плотности бетона в зависимости от затраченной работы на вибрационный процесс уплотнения бетонной смеси, т.е.

$$\rho = \rho_0 + \chi \left( \frac{\sigma A \omega t_v}{W_k} \right)^n, \quad (8)$$

где  $\chi$  – разность между стандартным  $\rho_k$  и начальным  $\rho_0$  значениями плотности, принимаемая в зависимости от жесткости бетонной смеси,

$$\chi = \rho_k - \rho_0. \quad (9)$$

Значение коэффициента  $n$ , приведенного в выражении (9), существенно зависит от жесткости бетонной смеси и может быть определено из следующей зависимости:

$$n = \Lambda G^\nu, \quad (10)$$

Таблица 1 – Значения удельной работы  $W_k$  в зависимости от консистенции бетонной смеси при вертикально направленном вибрационном воздействии

Консистенция цементобетонной смеси, с (см)	5...7 (3,5...4,0 см)	30	60	90	120
Значения удельной работы $W_k$ , КПа·м $\left( \frac{\text{кг}}{\text{см}^2} \cdot \text{см} \right)^*$	56 (54,8)	111,5 (109,2)	180,5 (176,9)	254 (248,9)	321,3 (314,8)

\* В скобках приведены значения удельной работы  $W_k$  в технической системе единиц.

При вибрационном воздействии на бетонную смесь вибрационной нагрузкой, действующей в горизонтальной плоскости, значения удельной работы  $W_k$  (табл. 3) уменьшаются в сравнении со значениями удельной работы  $W_k$  при вертикально направленных колебаниях, но также существенно зависят от консистенции бетонной смеси.

При одновременном воздействии на бетонную смесь нормальными напряжениями  $\sigma_n$  (например, в вертикальном направлении) и касательными напряжениями  $\tau$  (в горизонтальной плоскости) и, учитывая их неоднозначность воздействия на эффектив-

ность процесса уплотнения и разрушение структурных связей в бетонной смеси, определяется эквивалентное значение мощности вибрационного воздействия с учетом гипотезы энергии формоизменения,

$$P_{ekv} = \omega \sqrt{\sigma_n^2 A_n^2 + 3\tau^2 A_t^2}, \quad (12)$$

которое затем подставляется в формулу (11), т.е.

$$\rho = \rho_0 + \chi \left( \frac{P_{ekv} t_v}{W_k} \right)^{\Lambda G^\nu}, \quad (13)$$

где  $\Lambda$  и  $\nu$  – эмпирические коэффициенты,  $\Lambda=0,046$ ;  $\nu=0,25$ ;  $G$  – жесткость бетонной смеси по Скрамтаеву.  
Тогда, на основании выражения (10), зависимость (8) для определения текущего значения плотности бетонной смеси в зависимости от удельной затраченной работы преобразуется к следующему виду:

$$\rho = \rho_0 + \chi \left( \frac{\sigma A \omega t_v}{W_k} \right)^{\Lambda G^\nu}. \quad (11)$$

В табл. 1 приведены значения удельной работы  $W_k$ , которую необходимо затратить для достижения 100% уплотнения бетонных смесей, требуемого технологическими нормами, в зависимости от консистенции смеси при вертикально направленном вибрационном воздействии. Данные получены для стандартной бетонной смеси с водоцементным отношением В/Ц=0,41 – 0,51 со следующим содержанием минеральных компонентов и воды (кг на 1 м<sup>3</sup> бетона): гранитный щебень фракции 5...20 мм – 1200; песок с модулем крупности  $M_{kp}=1,7...2$  мм – 635; портландцемент М400 – 400; вода – 165...205 л. При этом консистенция бетонной смеси изменялась путем дозирования определенного количества воды согласно табл. 2. С увеличением жесткости бетонной смеси удельная работа  $W_k$ , которую необходимо затратить для полного уплотнения, возрастает достаточно существенно. Также в зависимости от консистенции изменяются начальная  $\rho_0$  и конечная  $\rho_k$  плотности бетонной смеси [9].

где  $P_{ekv}$  – эквивалентное значение мощности виб-  
рационного воздействия;  $A_n$  – амплитуда деформи-  
рования уплотняемой среды в нормальном направ-

лении;  $A_t$  – амплитуда деформирования уплотняе-  
мой среды в тангенциальном направлении.

Таблица 2 – Расход воды, а также значения начальной  $\rho_0$  и конечной  $\rho_k$  плотности бетонной  
в зависимости от консистенции\* (жесткости или подвижности) бетонной смеси

Консистенция бетонной смеси, с (см)	110...120	80...90	50...60	25...30	5...7 (3,5...4,0 см)
Расход воды, л/м <sup>3</sup>	165	172	180	187	205
Начальная плотность бетон- ной смеси $\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	1,85	1,89	1,95	2,015	2,095
Конечная плотность бетон- ной смеси $\rho_k$ (полное уп- лотнение), г/см <sup>3</sup>	2,42	2,42	2,41	2,405	2,4

\*Консистенция цементобетонной смеси, т.е. ее подвижность или жесткость, определялась стандартным методом в соответствии с ДСТУ Б.В.2.7– 114– 2002 (ГОСТ 10181 – 2000) «Будівельні матеріали. Суміші бетонні. Методи випробувань»

Таблица 3 – Значения удельной работы  $W_k$  в зависимости от консистенции бетонной смеси  
при горизонтально направленных колебаниях

Консистенция цементобетонной смеси, с (см)	5...7 (3,5...4,0 см)	30	60	90	120
Значения удельной работы $W_k$ , КПа·м $\left( \frac{\text{к}\text{г}}{\text{см}^2} \cdot \text{см} \right)$	31,4 (30,8)	64,4 (63,1)	103,1 (100,9)	147,6 (144,6)	186,8 (183,1)

В случае поличастотного вибрационного воздей-  
ствия на уплотняемую среду эквивалентное значе-  
ние мощности вибрационного воздействия опреде-  
ляется из следующего выражения:

$$P_{ekv} = \sqrt{P_{nsm}^2 + 3P_{ism}^2}, \quad (14)$$

где  $P_{nsm}$  – эквивалентное значение мощности виб-  
рационного воздействия в нормальном направлении,

$$P_{nsm} = \sum_{i=1}^n \sigma_i A_{ni} \omega_{ni}; \quad (15)$$

где  $P_{ism}$  – эквивалентное значение мощности виб-  
рационного воздействия в тангенциальном направ-  
лении,

$$P_{ism} = \sum_{i=1}^n \tau_i A_{ti} \omega_{ti}; \quad (16)$$

где  $\sigma_i$ ,  $\tau_i$  – нормальные и касательные напряже-  
ния соответственно при угловых скоростях вынуж-  
денных колебаний  $\omega_{ni}$  и  $\omega_{ti}$ ;  $A_{ni}$ ,  $A_{ti}$  – ампли-  
туды вынужденных колебаний вибрационных воз-  
действий соответственно при угловых скоростях  
вынужденных колебаний  $\omega_{ni}$  и  $\omega_{ti}$ .

В случае вибрационного воздействия на уплот-  
няемую смесь одновременно нормальными в гори-  
зонтальном направлении и касательными в верти-  
кальной плоскости используются те же самые урав-  
нения для определения эквивалентной мощности.

Значения удельной работы  $W_k$  в зависимости от  
консистенции бетонной смеси может быть опреде-  
лены из следующих однотипных зависимостей со-  
ответственно при вертикально направленных и го-  
ризонтальных колебаниях:

– при вертикально направленных колебаниях,

$$W_k = W_{0v}(1 + K_v G); \quad (17)$$

– при горизонтально направленных колебаниях,

$$W_k = W_{0g}(1 + K_g G). \quad (18)$$

Здесь  $W_{0v}$ ,  $W_{0g}$  – значения удельной работы  
при условном значении жесткости бетонной смеси,

равной  $W_{0v} = 37,8$  КПа·м  $\left( 37,04 \frac{\text{к}\text{г}}{\text{см}^2} \cdot \text{см} \right)$ ;

$W_{0g} = 23,2$  КПа·м  $\left( 22,74 \frac{\text{к}\text{г}}{\text{см}^2} \cdot \text{см} \right)$ ;

$K_v$ ,  $K_g$  – коэффициенты пропорциональности,  
 $K_v = 0,0624$ ;  $K_g = 0,0588$ .

На рис. 1 приведено сравнение теоретических и  
экспериментальных данных значения удельной ра-  
боты  $W_k$ , полученных при различных значениях  
консистенции (жесткости) бетонной смеси при го-  
ризонтально направленных и вертикальных колеба-  
ниях.

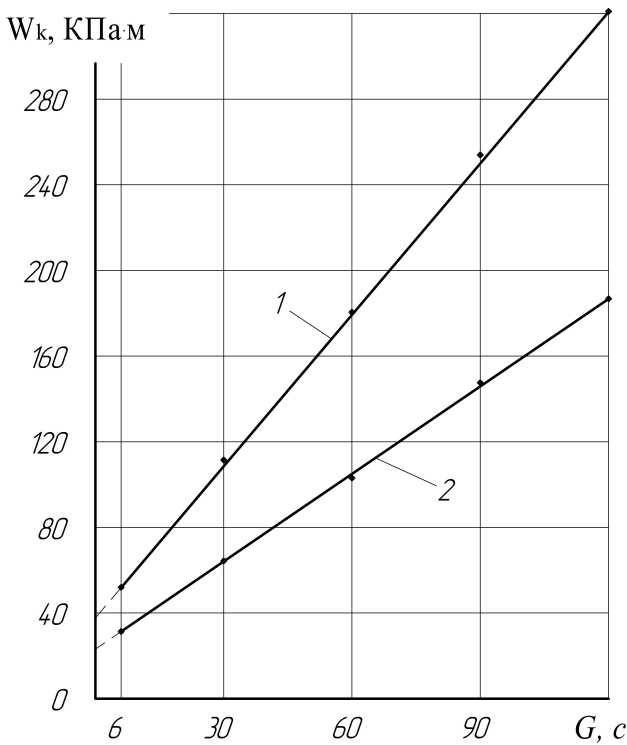


Рисунок 1 – Изменение значений удельной работы  $W_k$  в зависимости от консистенции бетонной смеси при вертикальном (1) и горизонтальном (2) вибрационном воздействии на уплотняемую бетонную среду: 1, 2 – теоретические зависимости; ■ – экспериментальные данные.

Используя выражения (11) и (13), определим коэффициент уплотнения  $k_y$  бетонной смеси в зависимости от затраченной удельной работы уплотнения:

$$k_y = \frac{\rho_0}{\rho_k} + \frac{\chi}{\rho_k} \left( \frac{\sigma A \omega t_v}{W_k} \right)^{\Lambda G^v}; \quad (19)$$

$$k_y = \frac{\rho_0}{\rho_k} + \frac{\chi}{\rho_k} \left( \frac{P_{ekv} t_v}{W_k} \right)^{\Lambda G^v}. \quad (20)$$

На основании выражений (19) и (20) определим время  $t_v$ , необходимое для достижения определенного коэффициента уплотнения бетонной смеси в зависимости от затраченной удельной работы уплотнения и физико-механических характеристик смеси:

$$t_v = \frac{W_k}{\sigma A \omega} \left( \frac{k_y \rho_k - \rho_0}{\chi} \right)^{\frac{1}{\Lambda G^v}}; \quad (21)$$

$$t_v = \frac{W_k}{P_{ekv}} \left( \frac{k_y \rho_k - \rho_0}{\chi} \right)^{\frac{1}{\Lambda G^v}}. \quad (22)$$

Время, необходимое для достижения стандартных значений плотности бетона  $\rho_k$  определится из следующих выражений:

$$t_v = \frac{W_k}{\sigma A \omega}; \quad (23)$$

$$t_v = \frac{W_k}{P_{ekv}}. \quad (24)$$

Используя выражения (21) и (22), определим необходимую скорость перемещения поверхностного уплотнителя  $V$  относительно уплотняемой поверхности в зависимости от затраченной удельной работы уплотнения для достижения определенного значения коэффициента уплотнения  $k_y$  бетонной смеси, физико-механических характеристик уплотняемой среды и длины виброплиты  $l_0$ :

$$V = \frac{\sigma A \omega l_0}{W_k} \left( \frac{k_y \rho_k - \rho_0}{\chi} \right)^{-\frac{1}{\Lambda G^v}}; \quad (25)$$

$$V = \frac{P_{ekv} l_0}{W_k} \left( \frac{k_y \rho_k - \rho_0}{\chi} \right)^{-\frac{1}{\Lambda G^v}}. \quad (26)$$

**ВЫВОДЫ.** Таким образом, уточнена существующая и предложена более общая энергетическая гипотеза процесса вибрационного уплотнения бетонных смесей, применимая для описания вибрационного процесса уплотнения и обработки бетонных сред различными вибрационными механизмами, рабочими органами и машинами. Получены аналитические зависимости, позволяющие определить закон нарастания плотности уплотняемой среды и продолжительность вибрационного воздействия в зависимости от величины и вида удельной работы уплотнения, оценить эффективность вибрационного процесса уплотнения и обработки, а также установить рациональные режимы вибрационного воздействия на уплотняемую среду и определить основные параметры вибрационных машин различного технологического назначения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Kakuta S., Kojima T. (1990), "Rheology of Fresh Concrete under Vibration", *Rheology of Fresh Cement and Concrete, Proceedings of the International Conference, P. F. G. Banfill, ed., University of Liverpool, UK, Mar. 16-29, Chapman and Hall, London*, pp. 339-342.
2. P. F. G. Banfill, et al. (2011), "Rheology and vibration of fresh concrete: Predicting the radius of action of poker vibrators from wave propagation," *Cement and Concrete Research*, vol. 41, no. 9, pp. 932-941.
3. Hu C., Larrard F. (1996), "The Rheology of Fresh High-Performance Concrete," *Cement and Concrete Research*, V. 26, No. 2, pp. 283-294.
4. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Основы Бетонovedения. – Санкт-Петербург: Aleksey Savinih, 2006. – 692 с.

5. Гусев Б.В. Бетон и железобетон. Справочник. М.: Стройиздат, 1998. – 250 с.

6. Блехман И.И. Вибрационная техника. – М.: Физматлит, 1994. – 400 с.

7. Маслов А.Г., Иткин А.Ф. Теоретические основы вибрационного уплотнения цементобетонных смесей. //Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету, Вип. 5/2004 (28). – Кременчук, 2004. – С. 45–49.

8. Иткин А.Ф. Вибрационные машины для формования бетонных изделий. – К.: «МП Леся». – 2009. – 152 с.

9. Маслов А.Г., Иткин А.Ф., Саленко Ю.С. Вибрационные машины для приготовления и уплотнения бетонных смесей. – Кременчук: ЧП Щербатых А.В. – 2014. – 324 с.

10. Маслов А.Г., Саленко Ю.С. Вибрационные машины и процессы в дорожно-строительном производстве. – Кременчук: ПП Щербатых О.В. – 2014. – 262 с.

## THEORETICAL FOUNDATIONS OF THE VIBRATION COMPACTION OF CONCRETE MIXTURES

**Janar Batsaikhan**

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University  
vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: kmto@mail.ru

**Purpose.** To consider the theoretical foundations of the vibration compaction process, allowing to estimate efficiency and to choose rational modes of vibration effects on the concrete mixture on the basis of the minimum energy cost of the process seal. **Methodology.** Described seal mechanism under the action of external vibrating forces, that in the concrete mix and an alternating stress-strain state, is the destruction of initial structural linkages and weaken the connections between its separate elements, are the final movement of mineral particles with formation of a more dense packing. As the main factor determining the character of the densification process course, it has been proposed to use the product of voltage and the speed of vibration exposure, representing the power of vibration exposure to the sealed environment. **Results.** The analytical expressions to determine the increase of concrete density in function of time depending on the kind of vibration and power input vibration exposure to the sealed environment have been found out. The theoretical and experimental values of specific work of providing the required seal to the values required technological norms depending on the consistency of the concrete mix in vertical and horizontal directional vibrations have been defined. **Originality.** As the main factor determining the character of the densification process course, it has been proposed to use the product of voltage and the speed of vibration exposure, representing the power of vibration exposure to the sealed environment. **Practical value.** The proposed theory of vibration compaction process, will allow to estimate efficiency and to choose rational modes of vibration effects on the concrete mixture on the basis of the minimum energy cost of the process seal, which will allow to create highly effective energy saving vibrating machines of various technological purposes.

**Key words:** theory of compaction, concrete mix, density, power.

### REFERENCES

1. Kakuta, S., Kojima, T. (1990), "Rheology of Fresh Concrete under Vibration", *Rheology of Fresh Cement and Concrete, Proceedings of the International Conference, P. F. G. Banfill, ed., University of Liverpool, UK, Mar. 16-29, Chapman and Hall, London*, pp. 339-342.

2. Banfill, P. F. G. *et al.* (2011), "Rheology and vibration of fresh concrete: Predicting the radius of action of poker vibrators from wave propagation." *Cement and Concrete Research*, vol. 41, no. 9, pp. 932-941.

3. Hu, C., Larrard, F. (1996), "The Rheology of Fresh High-Performance Concrete," *Cement and Concrete Research*, V. 26, No. 2, pp. 283-294.

4. Dvorkin, L.I., Dvorkin, O.L. (2006), *Osnovy Betonovedeniya* [The Basics Of Concrete Sciences], "Aleksy Savinich", Saint Petersburg, Russia.

5. Gusev, B.V. (1988), *Beton i zhelezobeton. Spravochnik* [Concrete and reinforced concrete], "Strojizdat", Moscow, Russia.

6. Blekhman, I.I. (1994), *Vibracionnaya tekhnika* [Vibrating equipment], "Fizmatlit", Moscow, Russia.

7. Maslov, A.G., Itkin, A.F. (2004), "Theoretical foundations of the vibration compaction of concrete mix", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi State Polytechnic University, vol. (28)*, pp. 45–49.

8. Itkin, A.F. (2009), *Vybratsyonnye mashyny dlya formovanyya betonnykh izdelyy* [Vibrating machines forming of the concrete products], "Les MP", Kyiv, Ukraine

9. Maslov, A.G., Itkin, A.F., Salenko, Y.S. (2014), *Vibratsionnyie mashyny dlya prigotovleniya i uplotneniya betonnyih smesey* [Vibrating machines for the preparation and compaction of concrete mixes], PP Cherbattyh, Kremenchuk, Ukraine.

10. Maslov, A.G., Salenko, Y.S. (2014), *Vibratsionnyie mashyny i protsessy v dorozhno-stroitelnom proizvodstve: monografiya* [Vibrating machines and processes in road construction industry: monograph], PP Cherbattyh, Kremenchuk, Ukraine.

Стаття надійшла 11.12.2017.