

УДК 666.97.033.16

В.Т. КРАВЧУК

Киевский национальный университет строительства и архитектуры

І.Н. СИВАК, Ю.В. ЧОВНІЮК

Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА ПРОЦЕССА ВИБРАЦИОННОГО УПЛОТНЕНИЯ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

Описан механизм уплотнения под действием внешних вибрационных сил, при которых в бетонной смеси возникает переменное напряжённо-деформированное состояние, происходит разрушение первоначальных структурных связей и ослабляются связи между её 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 удельную (на единицу площади поверхности) 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, установленных технологическими нормами в зависимости от консистенции бетонной смеси при вертикальных и горизонтально направленных колебаниях.

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

В.Т. КРАВЧУК

Київський національний університет будівництва і архітектури

І.М. СИВАК, Ю.В. ЧОВНІЮК

Національний університет біоресурсів і природокористування України

КОНЦЕПТУАЛЬНІ ОСНОВИ МОДЕЛЮВАННЯ І АНАЛІЗУ ПРОЦЕСУ ВІБРАЦІЙНОГО УЩІЛЬНЕННЯ БЕТОННИХ СУМІШЕЙ

Описаний механізм ущільнення під дією зовнішніх вібраційних сил, при яких в бетонній суміші виникає змінний 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. У якості основного фактора, що визначає характер протікання процесу ущільнення, запропоновано використовувати добуток напруги на швидкість вібраційного впливу, що представляє питому (на одиницю площі поверхні) потужність вібраційного впливу на ущільнюване середовище. Наведені аналітичні вирази, що дозволяють визначити наростання щільності бетонної суміші як функції часу і у залежності від виду вібраційного навантаження та потужності, що підводиться шляхом вібраційного впливу на ущільнюване середовище. Наведені теоретичні та експериментальні значення питомої роботи, що забезпечує необхідне ущільнення суміші до значень, встановлених технологічними нормами у залежності від консистенції бетонної суміші при вертикально і горизонтально направлених коливаннях.

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

V.T. KRAVCHYUK

Kyiv National University of Construction and Architecture

I.N. SIVAK, Y.V. CHOVNYUK

National University of Bioresources and Life Sciences of Ukraine

CONCEPTUAL FOUNDATIONS OF MODELLING AND ANALYSIS OF THE VIBRATION COMPACTION OF CONCRETE MIXTURES

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 per square unit 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 by 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 speed of vibration exposure, representing the power of vibration exposure to the sealed environment. **Practical value.** The proposed theory of vibration compaction process, will one 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.

Keywords: theory of compaction, concrete mix, density, power.

Постановка проблемы

Для создания вибрационных машин необходимо достаточно точно определить их основные параметры, при которых обеспечивается необходимый малозергоёмкий 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, суб- или супергармонические, а также, возможно, виброимпульсные колебания, частота собственных свободных 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 учётом физико-механических свойств бетонной смеси, её консистенции, размера и конфигурации изделия, места, направления и зоны приложения вибрационного возмущения (глубинное или поверхностное вибрирование, наружное вибрирование вертикально и горизонтально направленными колебаниями, объёмное вибрирование и вибрирование одночастотными и поличастотными колебаниями), требуемых прочностных показателей готового изделия, качества его поверхности, а также требуемых показателей эффективности, энергоёмкости, продолжительности вибрационного воздействия и прочности свежееотформованного 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.

Анализ последних исследований и публикаций

Существующая основная гипотеза вибрационного уплотнения связана с представлением о переходе бетонной смеси в разжиженное (тиксотропное) состояние под действием вибрации [1–3]. Авторы указанных работ объясняют, 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 ω , а также ускорение $A\omega^2$ или произведение скорости на ускорение, т.е. $A^2\omega^3$ [4–6]. Эти показатели не могут дать надёжной 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 уточнённой теории, которая детально представлена в работах [7–10], описан механизм распространения упругопластических волн деформаций и разрушения структурных связей в бетонной среде, пластическое её течение, вытеснение из структуры смеси воздуха и образование плотной структуры под действием вибрации. Дается обоснование эффективности формирования бетонных изделий из жёстких и пластичных бетонных смесей на основе возникающих в бетонной среде напряжений, разрушающих структурные связи с определённой 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.

Автор [11] сделал попытку использования в расчётах энергетических затрат на уплотнение бетонных смесей вибрационным воздействием т.н. вектора Пойнтинга, являющегося произведением напряжения, возникающего в бетонной смеси при её уплотнении на скорость движения этой смеси. По физической размерности этот критерий можно определить как удельную (на единицу площади формуемого вибрацией изделия) мощность, необходимую для уплотнения слоя бетонной смеси. Однако результаты, приведенные в цитируемой работе, справедливы лишь для расчёта энергоэффективности процессов уплотнения бетонных смесей небольшой толщины, когда последняя может быть представленной, как система со сосредоточенными параметрами. В практике формования изделий из цементобетонных смесей встречаются и изделия, которые имеют внушительную толщину (ширину) и не могут интерпретироваться, как системы с дискретными физическими свойствами, поскольку в них развиваются волновые процессы, свидетельствующие о том, что для таких случаев бетонную смесь следует рассматривать как систему с распределёнными параметрами. Именно этому аспекту процесса уплотнения бетонных смесей (в рамках использования критерия Пойнтинга) и посвящена данная работа.

Цель исследования

Цель работы – создание (концептуальных) теоретических основ для моделирования и анализа взаимодействия бетонных смесей с вибрационной формой в процессах их уплотнения, позволяющих оценить эффективность и выбрать рациональные режимы вибрационного воздействия на бетонные смеси, исходя из минимальных затрат энергии на процесс их уплотнения.

Изложение основного материала исследования

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 зёрнами заполнителя, и вовлечённого воздуха. В жёстких смесях объём воздуха достигает 20...25%, а в пластичных смесях до 10...15%. Вследствие взаимодействия сил поверхностного натяжения между жидкой фазой и частицами твёрдой фазы эта система приобретает связность и может рассматриваться как единое физическое тело.

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

Поскольку напряжения σ , возникающие в уплотняемом слое при вибрационном воздействии, являются одним из основных факторов, влияющих на разрушение структурных связей и процесс уплотнения, 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.н. вектор/критерий Пойнтинга), т.е.:

$$\tilde{P} = \sigma \cdot V, \quad (1)$$

где \tilde{P} – удельная (на единицу площади поверхности бетонной смеси) мощность вибрационного воздействия рабочего органа вибрационной машины на уплотняемую среду; σ – нормальное напряжение, возникающее в уплотняемой среде при вибрационном уплотнении; V – амплитуда скорости вибрационного воздействия.

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

$$\tilde{P} = \sigma A \omega = E \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \cdot A \cdot \omega, \quad (2)$$

где A – амплитуда деформирования уплотняемой среды, ω – угловая частота колебаний, E – динамический модуль упругости бетонной смеси в процессе её уплотнения, $\frac{\partial u}{\partial x}$ – деформация элемента

бетонной смеси, x – пространственная координата, вдоль которой действует направленная внешняя вибрационная сила, $u(x, t)$ – смещение в слое бетонной смеси, являющееся функцией координаты x (одномерная постановка задачи) и времени t . Поскольку $u(x, t)$ принимается гармонической функцией в задачах уплотнения бетонных смесей, тогда эта величина пропорциональна $\exp[i(\omega \cdot t - k \cdot x)]$, где $i^2 = -1$, k – волновой вектор волны, распространяющейся внутри этой бетонной смеси. (Считаем, что решение соответствующей начально-краевой задачи для бетонной смеси можно разыскивать в пространстве функций комплексного аргумента ввиду линейности такой задачи).

Тогда выражение (2) принимает такой окончательный вид:

$$\tilde{P} = E \cdot A^2 \cdot k \cdot \omega. \quad (3)$$

Следует отметить, что в уплотняемой бетонной смеси существует дисперсионное соотношение, которое связывает k с ω , т.е. $k = f(\omega)$. Это дисперсионное соотношение (для случаев формирования достаточно больших по толщине или по ширине изделий из бетонной смеси) можно получить, исходя из конкретных граничных условий динамической задачи. Поэтому выражение (3) можно представить и таким образом:

$$\tilde{P} = E \cdot A^2 \cdot f(\omega) \cdot \omega. \quad (4)$$

Именно эти обстоятельства не учитываются в работе [11]!

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

$$W = E \cdot A^2 \cdot k \cdot \omega \cdot t_y, \quad (5)$$

где t_y – продолжительность вибрационного уплотнения.

Величину прироста плотности бетонной смеси от начального значения ρ_0 до некоторого значения ρ в результате вибрационного воздействия можно найти из следующего эмпирического закона [11]:

$$\Delta\rho_i = \zeta \cdot W^n, \quad (6)$$

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

На основании выражения (6) определим текущее значение плотности ρ , которое достигается в результате затраченной удельной (на единицу поверхности бетонной смеси) работы вибрационного процесса уплотнения W , т.е.:

$$\rho = \rho_0 + \Delta\rho_i = \rho_0 + \zeta \cdot W^n, \quad (7)$$

где ρ_0 – плотность бетонной смеси, которая подвергается вибрационному уплотнению (начальная плотность смеси); ρ – достигнутая плотность бетонной смеси в результате приложенной работы вибрационного уплотнения.

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

$$\rho_k = \rho_0 + \Delta\rho = \rho_0 + \zeta \cdot W_k^n, \quad (8)$$

где ρ_k – плотность бетонной смеси, соответствующая 100%-ому уплотнению, требуемая технологическими нормами; $\Delta\rho$ – величина прироста плотности бетонной смеси от начального ρ_0 до конечного ρ_k значения плотности; W_k – удельная работа уплотнения бетонной смеси от начального ρ_0 до конечного ρ_k значения плотности.

На основании выражений (7) и (8), получим следующее соотношение:

$$\frac{\rho - \rho_0}{\rho_k - \rho_0} = \left(\frac{W}{W_k} \right)^n, \quad (9)$$

откуда с учётом зависимости (5) получим формулу для определения плотности бетона в зависимости от затраченной работы на вибрационный процесс уплотнения бетонной смеси, т.е.:

$$\rho = \rho_0 + \chi \cdot \left(\frac{E \cdot A^2 \cdot k \cdot \omega \cdot t_y}{W_k} \right)^n, \quad (10)$$

где χ – разность между стандартным ρ_k и начальным ρ_0 значениями плотности бетонной смеси, принимаемая в зависимости от жёсткости бетонной смеси,

$$\chi = \rho_k - \rho_0. \quad (11)$$

Следует отметить, что в соотношении (10) величина E принимается усреднённой по всему процессу уплотнения смеси от значения ρ_0 до значения ρ .

Значение коэффициента n , приведенного в выражениях (9), (10), существенно зависит от жёсткости бетонной смеси и может быть определено из следующей зависимости [11]:

$$n = \Lambda \cdot G^V, \quad (12)$$

где Λ и ν – эмпирические коэффициенты, $\Lambda = 0,046$; $\nu = 0,25$; G – жёсткость бетонной смеси по Скрамтаеву.

Тогда на основании выражения (12), зависимость (10) для определения текущего значения плотности бетонной смеси в зависимости от удельной затраченной работы преобразуется к следующему виду:

$$\rho = \rho_0 + \chi \cdot \left(\frac{E \cdot A^2 \cdot k \cdot \omega \cdot t_y}{W_k} \right)^{\Lambda \cdot G^\nu} \quad (13)$$

В табл. 1 приведены значения удельной работы W_k , которую необходимо затратить для достижения 100%-ого уплотнения бетонных смесей, требуемого технологическими нормами, в зависимости от консистенции смеси при вертикально направленном вибрационном воздействии. Данные получены автором [11] для стандартной бетонной смеси с водоцементным соотношением В/Ц=0,41...0,51 со следующим содержанием минеральных компонентов и воды (кг на 1 м³ бетона): гранитный щебень фракции 5...20 мм – 1200; песок с модулем крупности $M_{кр} = 1,7...2$ мм – 635; портландцемент М400 – 400; вода – 165...205 л. При этом консистенция бетонной смеси изменялась путём дозирования определённого количества воды согласно табл. 2. С увеличением жёсткости бетонной смеси удельная работа W_k , которую необходимо затратить для полного уплотнения, возрастает достаточно существенно. Также в зависимости от консистенции изменяются начальная ρ_0 и конечная ρ_k плотности бетонной смеси [9].

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)х(м) | 56 | 111,5 | 180,5 | 254 | 321,3 |

Таблица 2

Расход воды, значения начальной ρ_0 и конечной ρ_k плотности бетонной смеси в зависимости от её консистенции* (жёсткости или подвижности)

| Консистенция бетонной смеси, с (см) | 110...120 | 80...90 | 50...60 | 25...30 | 5...7 (3,5...4,0 см) |
|---|-----------|---------|---------|---------|-------------------------|
| Расход воды, л/м ³ | 165 | 172 | 180 | 187 | 205 |
| Начальная плотность бетонной смеси ρ_0 , кг/м ³ | 1850 | 1890 | 1950 | 2015 | 2095 |
| Конечная плотность бетонной смеси ρ_k (полное уплотнение), кг/м ³ | 2420 | 2420 | 2410 | 2405 | 2400 |

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

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

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)х(м) | 31,4 | 64,4 | 103,1 | 147,6 | 186,8 |

При одновременном воздействии на бетонную смесь нормальными напряжениями σ_n (например, в вертикальном направлении) и касательными напряжениями τ (в горизонтальной плоскости) и, учитывая их неоднозначность воздействия на эффективность процесса уплотнения и разрушения структурных связей в бетонной смеси, следует определять эквивалентное значение мощности вибрационного воздействия с учётом гипотезы энергии формоизменения,

$$\tilde{P}_{eky} = \omega \cdot \sqrt{\sigma_n^2 \cdot A_n^2 + 3\tau^2 \cdot A_t^2}, \quad (14)$$

которое затем необходимо подставить в формулу (13), т.е.

$$\rho = \rho_0 + \chi \cdot \left(\frac{\tilde{P}_{eky} \cdot t_y}{W_k} \right)^{\Delta G^v}, \quad (15)$$

где \tilde{P}_{eky} – эквивалентное значение удельной мощности вибрационного воздействия; A_n – амплитуда деформирования уплотняемой среды в нормальном направлении; A_t – амплитуда деформирования уплотняемой среды в тангенциальном направлении.

Следует отметить, что в отличие от аналогичных формул, полученных в [11], здесь напряжение сдвига в бетонной смеси необходимо интерпретировать как

$$\tau = E_{c\partial\partial} \cdot \frac{\partial v(z,t)}{\partial z}, \quad (16)$$

где $E_{c\partial\partial}$ – эффективный (усреднённый) модуль сдвига бетонной смеси при её уплотнении, $v(z,t)$ – перемещение бетонной смеси в горизонтальном направлении (вдоль оси z).

В случае поличастотного вибрационного воздействия на уплотняемую среду эквивалентное значение удельной мощности вибрационного воздействия определяется из следующего выражения:

$$\tilde{P}_{eky} = \sqrt{\tilde{P}_{nsm}^2 + 3 \cdot \tilde{P}_{tsm}^2}, \quad (17)$$

где \tilde{P}_{nsm} – эквивалентное значение удельной мощности вибрационного воздействия в нормальном направлении,

$$\tilde{P}_{nsm} = \sum_{i=1}^n \sigma_i \cdot A_{ni} \cdot \omega_{ni}; \quad (18)$$

где \tilde{P}_{tsm} – эквивалентное значение мощности вибрационного воздействия в тангенциальном направлении,

$$\tilde{P}_{tsm} = \sum_{i=1}^n \tau_i \cdot A_{ti} \cdot \omega_{ti}; \quad (19)$$

где σ_i, τ_i – нормальное и касательное напряжения соответственно при угловых скоростях вынужденных колебаний ω_{ni} и ω_{ti} ; A_{ni}, A_{ti} – амплитуды вынужденных колебаний вибрационных воздействий соответственно при угловых скоростях вынужденных колебаний ω_{ni} и ω_{ti} .

В случае вибрационного воздействия на уплотняемую смесь одновременно нормальными в горизонтальном направлении и касательными в вертикальном направлении (в вертикальной плоскости) используются те же самые уравнения для определения эквивалентной мощности, а напряжения (нормальные и касательные) интерпретируются аналогично приведенным выше.

Значения удельной работы W_k в зависимости от консистенции бетонной смеси может быть определено из следующих однотипных зависимостей соответственно при вертикально направленных и горизонтальных колебаниях [11]:

- при вертикально направленных колебаниях:

$$W_k = W_{0v} \cdot (1 + K_v \cdot G); \tag{20}$$

- при горизонтально направленных колебаниях:

$$W_k = W_{0g} \cdot (1 + K_g \cdot G). \tag{21}$$

Здесь W_{0v} , W_{0g} – значения удельной работы при условном значении жёсткости бетонной смеси, равной $W_{0v} = 37,8 \text{ КПа} \cdot \text{м}$; $W_{0g} = 23,2 \text{ КПа} \cdot \text{м}$; K_v , K_g – коэффициенты пропорциональности, $K_v = 0,0624$; $K_g = 0,0588$.

Используя выражения (13) и (15), определим коэффициент уплотнения бетонной смеси в зависимости от затраченной удельной работы уплотнения:

$$k_y = \frac{\rho_0}{\rho_k} + \frac{\chi}{\rho_k} \cdot \left(\frac{E \cdot A^2 \cdot k \cdot \omega \cdot t_y}{W_k} \right)^{\Lambda \cdot G^v}; \tag{22}$$

$$k_y = \frac{\rho_0}{\rho_k} + \frac{\chi}{\rho_k} \cdot \left(\frac{\tilde{P}_{eky} \cdot t_y}{W_k} \right)^{\Lambda \cdot G^v}. \tag{23}$$

На основании выражений (22) и (23) определим время t_y , необходимое для достижения определённого коэффициента уплотнения бетонной смеси в зависимости от затраченной удельной работы уплотнения и физико-механических характеристик смеси:

$$t_y = \frac{W_k}{E \cdot A^2 \cdot k \cdot \omega} \cdot \left(\frac{k_y \rho_k - \rho_0}{\chi} \right)^{\frac{1}{\Lambda G^v}}; \tag{24}$$

$$t_y = \frac{W_k}{\tilde{P}_{eky}} \cdot \left(\frac{k_y \rho_k - \rho_0}{\chi} \right)^{\frac{1}{\Lambda G^v}}. \tag{25}$$

Время, необходимое для достижения стандартных значений плотности бетона ρ_k , определится из следующих выражений:

$$t_y = \frac{W_k}{E \cdot A^2 \cdot k \cdot \omega}; \tag{26}$$

$$t_y = \frac{W_k}{\tilde{P}_{eky}}. \tag{27}$$

Используя выражения (24) и (25), определим необходимую скорость перемещения поверхностного уплотнителя V относительно уплотняемой поверхности в зависимости от затраченной удельной работы уплотнения для достижения определённого значения коэффициента уплотнения k_y бетонной смеси, физико-механических характеристик уплотняемой среды и длины виброплиты l_0 :

$$V = \frac{E \cdot A^2 \cdot k \cdot \omega \cdot l_0}{W_k} \cdot \left(\frac{k_y \rho_k - \rho_0}{\chi} \right)^{-\frac{1}{\Lambda G^v}}; \tag{28}$$

$$V = \frac{\tilde{P}_{eky} \cdot l_0}{W_k} \cdot \left(\frac{k_y \rho_k - \rho_0}{\chi} \right)^{-\frac{1}{\Lambda G^v}}. \tag{29}$$

Следует отметить, что в отличие от результатов, полученных автором [11], в соотношениях типа (28) присутствует параметр A в степени 2, а не в первой степени, как у вышеупомянутого автора.

Выводы

1. 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.

2. Получены аналитические зависимости, позволяющие определять 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.
3. Результаты данного исследования могут быть в дальнейшем использованы для уточнения и совершенствования существующих инженерных методов расчёта энергосиловых характеристик вибромашин для уплотнения бетонных и строительных смесей как на стадиях их проектирования/конструирования, так и в режимах реальной эксплуатации.

Список использованной литературы

1. Kakuta S. Rheology of Fresh Concrete under Vibration / S. Kakuta, T. Kojima // Rheology of Fresh Cement and Concrete. Proceedings of the International Conference. P.F.G. Banfill, ed., University of Liverpool, UK, March 16-29. – London: Chapman and Hall, 1990. – P. 339-342.
2. Banfill P.F.G. Rheology and Vibration of Fresh Concrete: Predicting the Radius of Action of Poker Vibrators from Wave Propagation / P.F.G. Banfill, et al //Cement and Concrete Research. – 2011. – V. 41, № 9. – P. 932-941.
3. Hu C. The Rheology of Fresh High-Performance Concrete / C. Hu, F. Larrard // Cement and Concrete Research. – 1996. – V. 26, № 2. – P. 283-294.
4. Дворкин Л.И. Основы бетоноведения / Л.И. Дворкин, О.Л. Дворкин. – Санкт-Петербург: Aleksey Savinih, 2006. – 692 с.
5. Гусев Б.В. Бетон и железобетон. Справочник / Б.В. Гусев. – М.: Стройиздат, 1998. – 250 с.
6. Блехман И.И. Вибрационная техника / И.И. Блехман. – М.: Физматлит, 1994. – 400 с.
7. Маслов А.Г. Теоретические основы вибрационного уплотнения цементобетонных смесей / А.Г. Маслов, А.Ф. Иткин // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2004. – Вип. 5 (28). – С. 45-49.
8. Иткин А.Ф. Вибрационные машины для формирования бетонных смесей / А.Ф. Иткин. – К.: "МП Леся", 2009. – 152 с.
9. Маслов А.Г. Вибрационные машины для приготовления и уплотнения бетонных смесей / А.Г. Маслов, А.Ф. Иткин, Ю.С. Саленко. – Кременчуг: ЧП Щербатых А.В. , 2014. – 324 с.
10. Маслов А.Г. Вибрационные машины и процессы в дорожно-строительном производстве / А.Г. Маслов, Ю.С. Саленко. – Кременчук: ПП Щербатих О.В., 2014. – 262 с.
11. Жанар Батсайхан. Теоретические основы вибрационного уплотнения бетонных смесей / Батсайхан Жанар // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2017. – Вип. 6 (107). Частина 1. – С. 99-104.