

РЕОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВИБРИРУЕМОЙ БЕТОННОЙ СМЕСИ**А. Г. Маслов, Жанар Батсайхан**Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: knto@mail.ru

На основе анализа существующих реологических моделей, предложена усовершенствованная реологическая модель вибрируемой бетонной смеси, включающая элементы, описывающие упругие, вязкие, инерционные и энергетические свойства уплотняемой среды. Предложены теоретические выражения, описывающие изменения динамического модуля упругой деформации, коэффициента динамической вязкости и коэффициента сопротивления, учитывающего затраты энергии на разрушение внутренних связей, вытеснение воздуха, переориентацию частиц и другие явления в уплотняемой среде, сопровождающие вибрационное уплотнение в функциональной зависимости от плотности, относительной деформации и консистенции бетонной смеси. Приведены численные значения этих элементов, полученные теоретическим и экспериментальным методами. Приведены численные значения коэффициента внутреннего трения в бетонной смеси при вибрационном воздействии.

Ключевые слова: реологическая модель, уплотняемая среда, колебания, теоретические зависимости.**РЕОЛОГІЧНА МОДЕЛЬ ВІБРУЮЧОЇ БЕТОННОЇ СУМІШІ****О. Г. Маслов, Жанар Батсайхан**Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: knto@mail.ru

На основі аналізу існуючих реологічних моделей, запропоновано вдосконалену реологічну модель бетонної суміші, що представлена у вигляді системи з розподіленими параметрами, на яку здійснюється вібраційна дія. Реологічна модель включає безліч елементарних блоків, кожен з яких включає елементарні елементи, що описують пружні, в'язкі, інерційні та енергетичні властивості ущільнюваного середовища. Вперше в реологічну модель, що описує систему з розподіленими параметрами включена елементарна приведена маса бетонної суміші. Для розглянутої реологічної моделі наведено теоретичну залежність, що описує зміну напруги в ущільнюваному вібраційною дією бетонному середовищі від її деформації. Запропоновано теоретичні вирази, що описують зміни динамічного модуля пружної деформації, коефіцієнта динамічної в'язкості і коефіцієнта опору, що враховує витрати енергії на руйнування внутрішніх зв'язків, витіснення повітря, переорієнтацію частинок та інші явища в ущільнюваному середовищі, що супроводжують вібраційне ущільнення у функціональній залежності від густини, відносної деформації і консистенції бетонної суміші. Встановлено, що коефіцієнт динамічної в'язкості бетонної суміші істотно залежить від коефіцієнта внутрішнього тертя і динамічного модуля пружної деформації бетонної суміші, а також від кутової частоти вимушених коливань. Наведено чисельні значення цих елементів, отриманих теоретичним та експериментальним методами. Наведено чисельні значення коефіцієнта внутрішнього тертя бетонної суміші при вібраційній дії. Показано зростаюче значення динамічного модуля пружної деформації залежно від збільшення жорсткості бетонної суміші і її відносної щільності. Наведено зміна коефіцієнта опору бетонної суміші різної жорсткості залежно від її відносної щільності. Встановлено, що при збільшенні щільності бетонної суміші коефіцієнт опору зменшується і тим інтенсивніше, чим менше жорсткість. Показано, що зі збільшенням щільності і зменшенням жорсткості в міжзерновий простір суміші виділяється велика кількість води, яка в поєднанні з цементом утворить рідку фазу, що в якійсь мірі роз'єднує тверді мінеральні частинки і відіграє при цьому роль мастила. Встановлено, що в результаті цього знижуються сили опору, спрямовані на руйнування внутрішніх зв'язків і переорієнтацію мінеральних частинок. Жорсткі суміші мають більший коефіцієнт опору, ніж пластичні. Наведено хвильове рівняння коливань, що описує поширення пружно-в'язко-пластичних хвиль деформацій в ущільнюваному середовищі при вібраційній дії.

Ключові слова: реологічна модель, ущільнюване середовище, коливання, теоретичні залежності.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Физико-механические свойства бетонной смеси, уплотняемой вибрационным воздействием определяют форму колебаний динамической системы вибромашины и существенно влияют на конструктивные особенности и определение основных параметров проектируемой вибрационной машины [1, 2, 3]. Точное определение динамических характеристик вибрируемой бетонной смеси позволяет установить необходимый закон вибрационного воздействия на уплотняемую среду, а также рациональный режим движения и устойчивости работы вибрационной машины, обеспечивающей эффективное уплотнение с высокой производительностью и малой энергоемкостью.

В изложенных ранее исследованиях деформируемую среду представляли в виде упругой модели

Гука, вязкого (модель Ньютона) или вязкоупругого (модели Кельвина – Фогта или Максвелла) тела, моделью Бингама [4–7]. Некоторые исследователи деформируемую среду представляли математическими кривыми [8–12].

Наиболее точно уплотняемую среду можно представить реологической моделью, описывающей поведение сплошной среды с распределенными параметрами [13–15]. В этих работах принималось, что уплотняемая смесь имеет однородную структуру, а ее колебания при действии вибрации описываются волновым уравнением [2, 13], учитывающим упругие и вязкие свойства. И не учитывались инерционные свойства и силы трения, отдельных минеральных частиц при их переориентации, сближении, деформации. Поэтому для выбора основных пара-

метров вибраційної машини і режимів вібровоздействия на бетонну суміш необхідно побудувати реологічну модель для сплошної середовища з розподіленими параметрами, улічуючої еластичні та нееластичні сили опору, а також опору викликані дією сил внутрішнього тертя та інерції компонентів бетонної суміші.

Ціль роботи – створення реологічної моделі вибрируваної бетонної суміші, улічуючої еластичні та нееластичні сили опору, сили внутрішнього тертя та інерції компонентів бетонної суміші.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ІССЛЕДОВАНИЙ. При вибраційному впливі на бетонну суміш кожен її елемент об'єму проявляє інерційні, еластичні, в'язкі та пластичні властивості та володіє як кінетичною, так і потенціальною енергією. При цьому маса, а також еластичні, в'язкі та пластичні властивості рівномірно розподілені по всьому об'єму коливаючої системи. Отже, бетонну середовищу можна представляти у вигляді системи з розподіленими параметрами. Процес вибраційного ущільнення супроводжується руйнуванням первинної структури бетонної середовища, її теченням, переходом в тиксотропне стан та утворенням нової структури. При цьому відбуваються відносні деформації ущільнюваної середовища та кінцеві переміщення її елементів. На цій основі ущільнювану середовищу можна представити у вигляді реологічної моделі, улічуючої інерційні, еластичні, в'язкі та пластичні властивості (рис. 1). Для розглянутої реологічної моделі залежність між напруженням та деформацією у ущільнюваної бетонної середовища може бути описана наступним рівнянням:

$$\sigma(z, t) = E \frac{\partial u(z, t)}{\partial z} + \eta \frac{\partial u(z, t)}{\partial t} - \rho H_1 \frac{\partial^2 u(z, t)}{\partial t^2} + \mu u(z, t), \quad (1)$$

де $\sigma_n(z, t)$ – напруження, виникаючі у ущільнюваному шарі; u і z – ейлєрова та лагранжева координати; E – динамічний модуль еластичної деформації бетонного шару суміші; η – коефіцієнт динамічної в'язкості, улічуючий внутрішнє тертя у бетонній суміші; ρ – густина бетонної суміші; H_1 – приведена ефективна висота шару бетонної суміші; μ – коефіцієнт опору, улікуючий витрати енергії на руйнування внутрішніх зв'язків, витіснення повітря, переорієнтацію частинок та інші явища у ущільнюваній середовищі, супроводжувані вибраційним ущільненням.

Динамічний модуль еластичної деформації E суттєво залежить від фізико-механічної характеристики та консистенції (жесткості) бетонної суміші, її поточної густини та може бути представлений у вигляді наступної функціональної залежності:

$$E = E_{01} \left[1 + z_1 e^{\varepsilon_1 G} \left(\frac{\rho - \rho_0}{\chi} \right)^{z_2} \right], \quad (2)$$

де E_{01} – динамічний модуль еластичної деформації бетонної суміші при початковій густині ρ_0 ; ε_1 , z_1 , z_2 – коефіцієнти пропорційності, визначаються експериментальним шляхом, $\varepsilon_1 = 0,005$; $z_1 = 4$; $z_2 = 2$; G – жесткість бетонної суміші.

Значення динамічного модуля еластичної деформації ущільненої бетонної суміші E_{01} залежить від жесткості бетонної суміші та достатньо точно описується наступним вираженням:

$$E_{01} = E_0 (1 - \gamma G^{\varepsilon_2}), \quad (3)$$

де E_0 – динамічний модуль еластичної деформації при початковій густині ρ_0 та умовній жесткості бетонної суміші рівній 0, $E_0 = 5,2$ МПа (51 кг/см^2);

γ , ε_2 – коефіцієнти, визначаються експериментальним шляхом, $\gamma = 0,012$; $\varepsilon_2 = 0,8$.

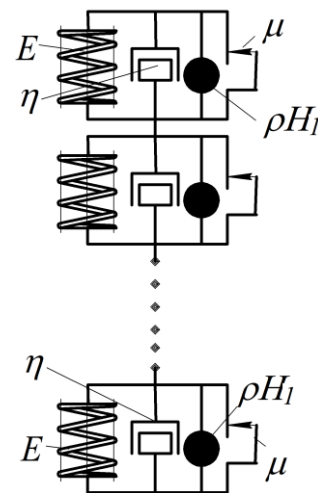


Рисунок 1 – Реологічна модель ущільнюваної середовища

На рис. 2 наведено порівняння теоретичних та експериментальних значень динамічного модуля еластичної деформації E_{01} , отриманих при різних жесткостях бетонної суміші.

На основі наведених виражень (2) та (3) отримано функціональну залежність зміни динамічного модуля еластичної деформації від її жесткості та відносної густини:

$$E = E_0 (1 - \gamma G^{\varepsilon_2}) \left[1 + z_1 e^{\varepsilon_1 G} \left(\frac{\rho - \rho_0}{\chi} \right)^{z_2} \right]. \quad (4)$$

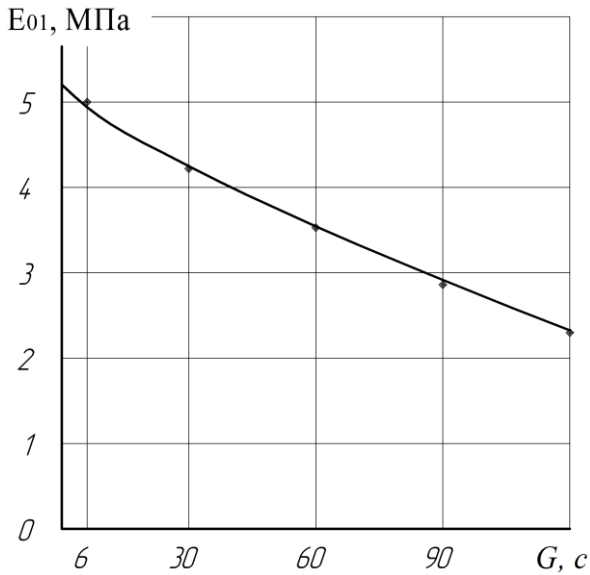


Рисунок 2 – Изменение теоретических и экспериментальных значений динамического модуля упругой деформации E_{01} в зависимости от жесткости бетонной смеси:
• – экспериментальные данные

На рис. 3 показано изменение значений динамического модуля упругой деформации E в зависимости от относительной плотности бетонной смеси $\varepsilon = (\rho - \rho_0) / \chi$. Анализ приведенных данных (рис. 2 и 3) показывает, что с уменьшением жесткости бетонной смеси и увеличением её плотности динамический модуль упругой деформации E существенно возрастает и, наоборот, при большей жесткости и меньшей плотности значения E уменьшаются.

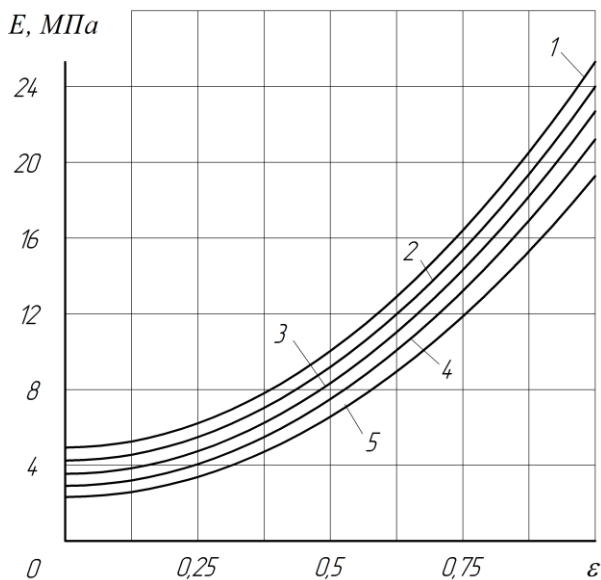


Рисунок 3 – Изменение значений динамического модуля упругой деформации E в зависимости от жесткости бетонной смеси и её относительной плотности $\varepsilon = (\rho - \rho_0) / \chi$: 1 – при жесткости бетонной смеси $J=6$ с; 2 – при $J=30$ с; 3 – при $J=60$ с; 4 – при $J=90$ с; 5 – при $J=120$ с

Это объясняется тем, что чем больше жесткость и меньшей плотность смеси, тем меньше свободной воды в межзерновое пространство, поскольку основная часть воды располагается на поверхности минеральных частиц, удерживаемая капиллярными силами, а межзерновое пространство заполнено воздухом. Это приводит к уменьшению значений динамического модуля упругой деформации E . При меньшей жесткости и большей плотности смеси в её межзерновом пространстве увеличивается количество свободной воды и одновременно уменьшается количество воздуха и, как следствие, увеличивается модуль упругой деформации E . Полученные результаты достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Коэффициент динамической вязкости, учитывающий внутреннее трение в бетонной смеси существенно зависит от динамического модуля упругой деформации E и угловой частоты вынужденных колебаний и может быть определен из следующей зависимости:

$$\eta = \frac{f_v E}{\pi \omega}, \quad (5)$$

где f_v – коэффициент внутреннего трения бетонной смеси при вибрационном воздействии.

В табл. 1 приведены значения коэффициента внутреннего трения, полученные для бетонных смесей различной консистенции при вибрационном воздействии на неё вынужденными колебаниями с угловой частотой $\omega = 292$ рад/с и амплитудой $A = 0,05$ см.

С учетом зависимости (2.30) выражение (2.31) для определения динамической вязкости бетонной смеси преобразуется к следующему виду:

$$\eta = \frac{f_v E_0 (1 - \gamma G^{\varepsilon_2})}{4 \pi \omega} \left[1 + z_1 e^{\varepsilon_1 G} \left(\frac{\rho - \rho_0}{\chi} \right)^{z_2} \right]. \quad (6)$$

Коэффициент сопротивления μ , учитывающий затраты энергии на разрушение внутренних связей, вытеснение воздуха, переориентацию частиц и другие явления в уплотняемой среде, сопровождающие вибрационное уплотнение, зависит от консистенции и относительной плотности бетонной смеси, подчиняется некоторой экспоненциальной зависимости и может быть определен по формуле:

$$\mu = \mu_0 \left[1 - \frac{\lambda_1}{e^{\varepsilon_1 G}} \left(\frac{\rho - \rho_0}{\chi} \right)^{z_2} \right], \quad (7)$$

где μ_0 – коэффициент сопротивления при начальной плотности ρ_0 ; λ_1 – коэффициент пропорциональности, $\lambda_1 = 0,8$.

Таблиця 1 – Значення коефіцієнта внутрішнього тріння f_v в залежності від консистенції бетонної суміші при вибрируванні вимушеними коливаннями з куловою частотою $\omega=292$ рад/с і амплітудою $A=0,05$ см

Консистенція бетонної суміші, с (см)	5...7 (3,5...4,0 см)	30	60	90	120
Значення коефіцієнта внутрішнього тріння f_v	0,12	0,15	0,165	0,175	0,182

Значення коефіцієнт спротивлення μ_0 при початковій густини ρ_0 приведені в табл. 2.

Используя известную зависимость

$$z = \rho \frac{\partial^2 u(z, t)}{\partial t^2}, \quad (8)$$

описывающую колебания слоя бетонной смеси в направлении координаты X за время t и выражение (1) составим уравнение движения, описывающее распространение упруго-вязко-пластических волн

деформаций в уплотняемой смеси при вибрационном воздействии:

$$E \frac{\partial^2 u(z, t)}{\partial z^2} + \eta \frac{\partial^2 u(z, t)}{\partial z \partial t} - \rho L_1 \frac{\partial^3 u(z, t)}{\partial z^2 \partial t} + \mu u(z, t) = \rho \frac{\partial^2 u(z, t)}{\partial t^2}. \quad (9)$$

Поведение рассматриваемой динамической системы определяется краевыми условиями.

Таблиця 2 – Значення коефіцієнт спротивлення μ_0 в залежності від жорсткості бетонної суміші

Консистенція бетонної суміші, с (см)	5...7 (3,5...4,0 см)	30	60	90	120
Значення коефіцієнта спротивлення μ_0 , МПа/м (кг/см ³)	39,2 (3,99)	44,0 (4,49)	48,0 (4,89)	52,0 (5,3)	54,4 (5,54)

На рис. 4 показано изменение коэффициента сопротивления μ бетонной смеси различной жесткости в зависимости от её относительной плотности. бетонной смеси. При увеличении плотности бетонной смеси коэффициент сопротивления уменьшается и тем интенсивнее, чем меньше жесткость. Это объясняется тем, что с увеличением плотности и уменьшением жесткости в межзерновое пространство смеси выделяется большое количество воды, которая в соединении с цементом образует жидкую фазу, в какой-то мере разъединяющую твердые минеральные частицы и играющую при этом роль смазки. В результате снижаются силы сопротивления, направленные на разрушение внутренних связей и переориентацию минеральных частиц. Жесткие смеси имеют больший коэффициент сопротивления μ , чем пластичные.

Таким образом, обоснована реологическая модель бетонной смеси и получены теоретические зависимости для определения динамического модуля упругой деформации, коэффициента динамической вязкости, коэффициента сопротивления в зависимости от консистенции смеси и степени ее уплотнения.

Эти зависимости позволяют описать волновой процесс распространения деформаций в уплотняемой среде и её напряженно-деформированное состояние при действии вибрационного воздействия. Оценить действие упругих, диссипативных и инерционных сил со стороны уплотняемой среды на вибрационную машину и на процессы, происходящие в самой уплотняемой среде при вибрационном воздействии. Обосновать рациональные параметры

вибрационной машины и режимы вибрационного воздействия на уплотняемую среду.

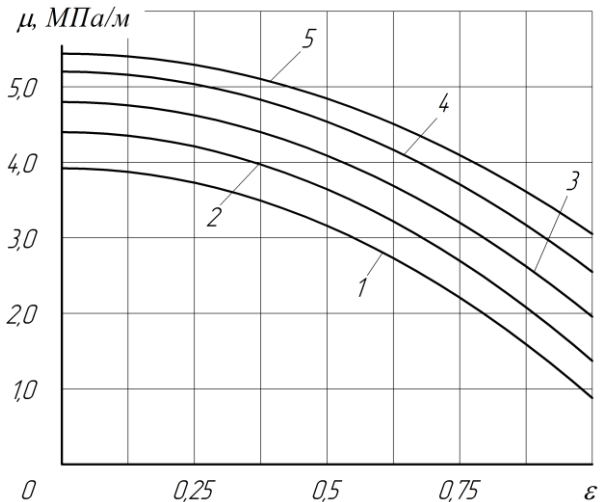


Рисунок 4 – Изменение коэффициента сопротивления μ в зависимости от жесткости бетонной смеси и её относительной плотности $\epsilon = (\rho - \rho_0) / \chi$: 1 – при жесткости бетонной смеси $Ж=6$ с; 2 – при $Ж=30$ с; 3 – при $Ж=60$ с; 4 – при $Ж=90$ с; 5 – при $Ж=120$ с

Расхождение приведенных теоретических зависимостей с экспериментальными данными в среднем не превышает 4...6%.

ВЫВОДЫ. На проведенных исследованиях создана вибрационная реологическая модель бетонной среды, подчиняющаяся основным положениям теории колебаний механики сплошной среды и описывающая

вающая процесс распространения волн деформации в уплотняемой среде, представленной в виде системы с распределенными параметрами, учитывающей действие упругих и неупругих сил сопротивления, а также действие сил трения и инерции минеральных частиц в смеси. Приведены теоретические зависимости для определения динамического модуля упругости, коэффициента динамической вязкости, коэффициент сопротивления, учитывающий затраты энергии на разрушение внутренних связей, вытеснение воздуха, переориентацию частиц и другие явления в уплотняемой среде, сопровождающие вибрационное уплотнение. Приведенные теоретические и экспериментальные данные позволяют сделать вывод об адекватности предложенной вибрационной реологической модели, которая может быть использована для описания поведения бетонной смеси при различных формах вибрационного воздействия. Получены теоретические выражения, позволяющие достаточно точно описать поведение реальной динамической системы «Вибрационная машина – уплотняемая среда» при формовании бетонных изделий, как из пластичных, так и жестких бетонных смесей путем приложения вертикальных, горизонтально направленных, пространственных, прямолинейных и крутильных колебаний. Они позволяют произвести компьютерное моделирование законов движения и обосновать вид и форму вибрационного воздействия, рациональные основные параметры вибрационной машины и оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маслов А.Г., Саленко Ю.С., Маслова Н.А. Исследование взаимодействия вибрирующей плиты с цементобетонной смесью. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2011. Вип. 2 (67), частина 1. С. 93 – 98.
2. Маслов А.Г., Саленко Ю.С. Вибрационные машины и процессы в дорожно-строительном производстве: Кременчук: ПП Щербатих О.В, 2014. 262 с.
3. Иткин А.Ф. Вибрационные машины для формования бетонных изделий. Київ: «МП Леся», 2009. 152 с.
4. Chen X., Wu S., Zhou J. Experimental study and analytical formulation of mechanical behavior of concrete. *Construction and Buildings Materials*. 2013. Vol. 47. P. 662–670.
5. Tattersall G. H. Effect of Vibration on the Rheological Properties of Fresh Cement Pastes and Concretes. *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. 1990. P. 323–338.
6. Kakuta S., Kojima T. 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. 1990 P. 339–342.
7. P. F. G. Banfill, et al. Rheology and vibration of fresh concrete: Predicting the radius of action of poker vibrators from wave propagation. *Cement and Concrete Research*. 2011. Vol. 41, № 9. P. 932–941.
8. Hu C., Larrard F. The Rheology of Fresh High-Performance Concrete. *Cement and Concrete Research*. 1996. Vol. 26, № 2. P. 283–294.
10. Szwabowski J. Influence of Three-Phase Structure on the Yield Stress of Fresh Concrete. *Rheology of Fresh Cement and Concrete, Proceedings of the International Conference*, P. F. G. Banfill, ed., University of Liverpool, UK, Mar. 16-29, 1990, Chapman and Hall, London. 1990. P. 241–248.
11. Kłosiński J., Trąbka A. Frequency analysis of vibratory device model (in Polish). *Pneumatyka*. 2010. Vol. 1. P. 46–49.
12. Żółtowski B. Research of machine dynamics (in Polish). Wyd. MARKAR, Bydgoszcz. 2002.
13. Маслов А.Г., Иткин А.Ф., Саленко Ю.С. Вибрационные машины для приготовления и уплотнения бетонных смесей: Кременчук: ЧП Щербатих А.В, 2014. 324 с.
14. Маслов А.Г., Жанар Батсайхан. Исследование колебаний рабочего органа машины для уплотнения бетонных смесей в вибрационном рабочем режиме. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*, 2015. Вип. 2 (91), частина 1. С. 92–97.
15. Маслов А.Г., Иткин А.Ф. Теоретические основы вибрационного уплотнения цементобетонных смесей. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету*. 2004. Вип. 5. С. 45–49.

THE RHEOLOGICAL MODEL OF VIBRATING CONCRETE MIX

A. Maslov, Janar Batsaikhan

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

Purpose. To establish a rheological model during vibration of the concrete mix, which takes into account elastic and inelastic resistance forces, forces of internal friction and inertia of the concrete mix. components. **Methodology.** Based on the analysis of existing rheological models, an improved rheological model during vibration of the concrete mix, including elements that describe elastic, viscous, inertial and energy properties of the sealing medium has been created. **Results.** The proposed theoretical expressions that describe the change of dynamic modulus of elastic deformation, the coefficient of dynamic viscosity and coefficient of drag, taking into account the energy cost of the destruction of the internal connections, air displacement, reorientation of particles and other phenomena in the sealing environment, and the accompanying vibratory compaction in functional density, the relative deformation and consistency of a concrete mix has been created and used. Numerical values of these elements have been obtained by theoretical and experimental methods. Numerical values of the coefficient of internal friction in the concrete mix during the vibration exposure have been gained. **Originality.** The theoretical expression that allows to describe accurately the behavior of a real dynamical system "Vibration machine – compacted environment" in the molding of concrete products, as in plastic and hard

concrete mixtures by application vertical, horizontal, directional, spatial, rectilinear and torsional vibrations. **Practical value.** The obtained rheological model allows to describe the law of propagation of waves of deformations in real concrete environment, and make a computer simulation of the laws of motion and justify the type and form of vibration exposure, the rational main parameters of vibrating machines and processing equipment. References 15, tables 2, figures 4.

Key words: form vibration, oscillation, interaction, the sealing environment.

REFERENCES

- Maslov, A.G., Salenko, Y.S., Maslova, N.A. (2011), "Study of the interaction between a vibrating plate with cement concrete mixture", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. Kremenchug: KRNU, Issue (67)*, pp. 93 – 98.
- Maslov, A.G., Salenko, Y.S. (2014), *Vibratsionnyie mashinyi i protsessy v dorozhno-stroitelnom proizvodstve* [Vibrating machines and processes in road construction industry], PP Cherbatykh, Kremenchuk, Ukraine.
- Itkin, A.F. (2009), *Vybratsyonnie mashyni dlya formovanyia betonnykh izdeliy* [Vibrating machines forming of the concrete products], "Les MP", Kyiv, Ukraine.
- Chen X., Wu S., Zhou J. (2013), Experimental study and analytical formulation of mechanical behavior of concrete, *Construction and Buildings Materials* 47, pp. 662–670.
- Tattersall, G.H. (1990), Effect of Vibration on the Rheological Properties of Fresh Cement Pastes and Concretes, *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. 323-338.*
- 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.*
- 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.
- Hu, C., Larrard, F. (1996), "The Rheology of Fresh High-Performance Concrete", *Cement and Concrete Research*, V. 26, No. 2, pp. 283-294.
- Szwabowski, J. (1990), Influence of Three-Phase Structure on the Yield Stress of Fresh Concrete, *Rheology of Fresh Cement and Concrete, Proceedings of the International Conference, P. F. G. Banfill, ed., University of Liverpool, UK, Mar. 16-29, 1990, Chapman and Hall, London, pp. 241-248.*
- Kłosiński, J., Trąbka, A. (2010), Frequency analysis of vibratory device model (in Polish), *Pneumatyka*, 1, pp. 46-49.
- Żółtowski, B. (2002), Research of machine dynamics (in Polish), *Wyd. MARKAR, Bydgoszcz.*
- Maslov, A.G., Itkin, A.F., Salenko, Y.S. (2014), *Vibratsionnyie mashinyi dlya prigotovleniya i uplotneniya betonnykh smesey* [Vibrating machines for the preparation and compaction of concrete mixes] PP Cherbatykh, Kremenchuk, Ukraine.
- Maslov, A.G., Batsaikhan, Zhanar (2015), "The Research of oscillations of the machine working body of the for compaction of concrete mixes in vibration working mode", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. Kremenchug: KRNU, Issue (91)*, pp. 92 – 97.
- Maslov, A. G., Itkin, A. F. (2004), "Theoretical foundations of the vibration compaction of concrete mix", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi State Polytechnic University. Kremenchug: KDPU, Issue (28)*, pp. 45 – 49.

Стаття надійшла 26.02.2018.