

УДК 693.95 (075.8)

И.Н. СИВАК, Ю.В. ЧОВНЮК

Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины

В.Т. КРАВЧУК

Киевский национальный университет строительства и архитектуры

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАБОЧЕГО ОРГАНА ВИБРОМАШИНЫ ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНОГО/ОБЪЁМНОГО УПЛОТНЕНИЯ БЕТОННОЙ СМЕСИ С ОБРАБАТЫВАЕМОЙ СРЕДОЙ

Предложена математическая модель, описывающая поведение динамической системы «вибрационная площадка – бетонная смесь», в которой бетонная смесь представлена в виде системы с распределёнными параметрами. Составлено волновое уравнение движения уплотняемой смеси. Определены граничные условия для случая, когда формование смеси осуществляется поверхностным/объёмным способом. Найдены аналитически значения волнового числа, коэффициента затухания возмущения в обрабатываемой среде, приведенная масса и коэффициент неупругого сопротивления бетонной смеси. Определён закон распространения волн возмущения в обрабатываемой среде.

Ключевые слова: вибрационная машина, бетонная смесь, поверхностное/объёмное уплотнение.

I.M. SIVAK, Y.V. CHOVNYUK

Національний університет біоресурсів і природокористування України

В.Т. КРАВЧУК

Київський національний університет будівництва і архітектури

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВЗАЄМОДІЇ РОБОЧОГО ОРГАНА ВІБРОМАШИНИ ДЛЯ ПОВЕРХНЕВОГО/ОБ'ЄМНОГО УЩІЛЬНЕННЯ БЕТОННОЇ СУМІШІ З ОБРОБЛЮВАНИМ СЕРЕДОВИЩЕМ

Запропонована математична модель, яка описує поведінку динамічної системи «вібраційний майданчик - бетонна суміш», у котрій бетонна суміш представлена у вигляді системи з розподіленими параметрами. Складене хвильове рівняння руху ущільнюваного середовища. Визначені граничні умови для випадку, коли формування суміші здійснюється поверхневим/об'ємним способом. Знайдені аналітично значення хвильового числа, коефіцієнта затухання збурення у оброблюваному середовищі, приведеної маси й коефіцієнту непружності опору бетонної суміші. Визначений закон розповсюдження хвиль збурення у оброблюваному середовищі.

Ключові слова: вібраційна машина, бетонна суміш, поверхнєве/об'ємне ущільнення.

I.N. SIVAK, Y.V. CHOVNYUK

National University of Bioresources and Life Sciences of Ukraine

V.T. KRAVCHYUK

Kyiv National University of Constructions and Architecture

THE INVESTIGATION OF INTERACTION PROCESS OF THE WORKING ORGAN OF VIBROMACHINE FOR THE SURFACE/VOLUME COMPACTION OF CONCRETE'S MIXTURE WITH A PROCESSABLE MEDIUM

The authors have suggested a new mathematical model describing the behavior of the dynamic system “vibration platform – concrete's mixture”, where the concrete's mixture is represented as a system with a distributed parameters. Within the frame of research the wave equation of the compactable medium motion was complied and the boundary conditions were defined. As a result, it were analytically calculated such key parameters as values of the wave number, the perturbation attenuation coefficient in the processable medium, reduced mass, the coefficient of inelastic resistance of concrete's mixture and the law of propagation of perturbations in the processable medium.

Key words: vibration machine, concrete's mixture, surface/volume compacting.

Постановка проблемы.

Современное строительное производство требует создания машин и виброформовочного оборудования с малой энергоёмкостью, обеспечивающих эффективное приготовление жёстких и сверхжёстких бетонных смесей (БС). Снижения энергоёмкости и повышения эффективности процесса приготовления БС можно достичь путём использования технологии, в которой на БС оказывается вибрационное воздействие (т.н. объёмное/поверхностное вибрационно-волновое формование/уплотнение смеси). При этом уменьшаются силы сопротивления перемешиванию за счёт уменьшения внутреннего коэффициента трения БС и её

коэффициента трения с корпусом вибрационной площадки. Одновременно ускоряется процесс приготовления БС и улучшается её качество за счёт виброактивации.

Таким образом, создание вибросистем для уплотнения БС, сочетающих в себе высокие показатели производительности и качества приготавливаемой смеси с их простотой конструкции и сравнительно малыми значениями металлоёмкости и энергоёмкости, является важной народнохозяйственной задачей. По мнению авторов данного исследования, моделирование процесса взаимодействия рабочего органа виброплощадки с обрабатываемой БС (например, поверхностным/объёмным способом) требует дальнейшего углублённого исследования, уточнения и совершенствования.

Анализ последних исследований и публикаций.

Уплотнение БС вибрационным воздействием (поверхностным/объёмным способом формирования смеси) связано с переходом в состояние тиксотропии, в результате чего БС становится более подвижной, из неё удаляется большая часть воздуха, осуществляется обмазка минеральных частиц вязким, заполняются вязким мельчайшие трещины, разрушаются дефектные агрегаты смеси, происходит переориентация минеральных частиц с образованием более плотной упаковки [1-3].

Для определения технологических параметров вибрационного воздействия на уплотняемую БС и основных параметров вибрационной машины необходимо исследовать взаимодействие в вертикальном направлении формы с уложенной в неё БС. При этом указанное вибровоздействие может осуществляться на поддон формы с БС, а верхняя поверхность её – свободна (т.н. объёмное формирование БС без пригруза), либо вибрация осуществляется на верхней поверхности через виброплиту, а нижняя поверхность БС – покоится на жёстком основании (т.н. поверхностное формирование БС). БС в расчётной динамической системе можно представить реологической моделью [4-10]. Доказано [11-13], что наибольшую точность в описании взаимодействия рабочего органа с уплотняемой средой дают реологические модели, в которых уплотняемая БС представлена в виде системы с распределёнными параметрами [14,15], в виде дискретных моделей [16,17], либо в виде дискретно-континуальных моделей [18] (грунтов). Физико-механические характеристики указанных моделей найдены из выражений, полученных для описания закона распространения волн деформаций в уплотняемой среде при вибрационном воздействии. По мнению авторов [19-23], для определения основных параметров вибрационной площадки необходимо достаточно точно определить её силовое взаимодействие с БС.

Следует отметить, что ни в одной из цитированных выше работ нет исследований указанного силового взаимодействия виброплощадки с БС (при поверхностном/объёмном способе её формирования), которые бы учитывали генерацию и влияние на это взаимодействие собственных форм колебаний БС. Если авторы [19-23] используют при таком анализе метод разделения переменных Фурье, то, по крайней мере, это сделано некорректно, поскольку для проведения такого динамического анализа согласно канонам математической физики [24] следует выполнить специальное преобразование искомого решения и представить его в виде суммы из двух составляющих (нельзя применять метод Фурье для подвижных граничных условий!). Именно данное исследование выполнено с учётом сказанного выше. Кроме того, в работах [19-23] встречаются многочисленные ошибки, описки, которые здесь исправлены и устранены.

Формулирование цели исследования.

Цель данной работы состоит в установлении основных закономерностей взаимодействия рабочего органа виброплощадки с БС в вертикальном направлении при поверхностном/объёмном её вибрационном формировании.

Изложение основного материала исследования.

Для исследования взаимодействия формы виброплощадки с БС в вертикальном направлении используем расчётную схему, представленную в [19,23].

Форма массой m , заполненная БС, установлена при помощи опор жёсткостью c и с коэффициентом демпфирования b на неподвижном основании. На форму снизу (при объёмном формировании БС) действует возмущение от вибровозбудителя направленных колебаний в виде вертикально направленной гармонической силы $Q \cdot \sin \omega t$, где Q – амплитуда, ω – частота (круговая) возбуждения, t – время. (Если формирование осуществляется поверхностным способом, тогда сила $Q \cdot \sin \omega t$ действует сверху через пригруз массы m на БС, а нижняя поверхность БС контактирует с неподвижным основанием). Если F – площадь днища формы (или днища пригруза при поверхностном уплотнении БС), тогда $Q = \tilde{q} \cdot F$, где \tilde{q} – величина возмущающей силы, приходящаяся на единицу площади днища формы/пригруза.

БС будем рассматривать как систему с распределёнными параметрами. При этом зависимость между напряжением (σ) и деформацией представим в виде уравнения Ньютона [14], учитывающим и возможные пластические деформации в БС:

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

где E – динамический модуль упругой деформации БС; η – коэффициент динамической вязкости, характеризующий внутреннее трение в БС; μ – коэффициент сухого трения, позволяющий моделировать уплотне-

ния БС в процессе её пластической деформации; u, z – эйлерова и лагранжева координаты (в вертикальном направлении). Естественно, что напряжение, возникающее по высоте уплотняемого слоя БС σ , как и перемещение уплотняемого слоя БС u являются функциями координаты z и времени t , т.е. $\sigma = \sigma(z, t)$, $u = u(z, t)$.

Дифференциальное уравнение движения уплотняемой БС в направлении координаты z будет иметь вид:

$$E(1 + \mu) \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \eta \cdot \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial t} = \rho \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \tag{2}$$

где ρ – плотность БС.

Решение волнового уравнения (2) отыскиваем при граничных условиях, характерных для объёмно-го/поверхностного способов формования.

1. Объёмное формование БС.

Рассмотрим вначале решение задачи для объёмного способа формования БС.

Граничные условия в этом случае имеют вид:

при $z = 0$ –

$$-m \frac{\partial^2 u(0, t)}{\partial t^2} - b \frac{\partial u(0, t)}{\partial t} - cu(0, t) + FE \frac{\partial u(0, t)}{\partial z} + F\eta \frac{\partial^2 u(0, t)}{\partial z \partial t} + F\mu E \frac{\partial u(0, t)}{\partial z} = -Q \cdot \sin \omega t, \dots\dots\dots(3)$$

при $z = H$ –

$$EF \frac{\partial u(H, t)}{\partial z} + \eta F \frac{\partial^2 u(H, t)}{\partial z \partial t} + \mu EF \frac{\partial u(H, t)}{\partial z} = 0, \tag{4}$$

где H – высота формируемого изделия.

Если считать, что $u(z, t)$ можно записать в виде функции, пропорциональной $\exp(i\omega t)$, $i^2 = -1$, разыскивая, тем самым, только вынужденную составляющую решения задачи, тогда из (2) можно получить следующее дисперсионное соотношение, связывающее ω с волновым вектором \tilde{k} :

$$\tilde{k}^2 = \omega^2 \cdot \frac{\rho}{[E(1 + \mu) + i\eta\omega]}. \tag{5}$$

Из (5) следует, что волновой вектор \tilde{k} – комплексная величина, а значит, её можно представить следующим образом:

$$\tilde{k} = \frac{\omega}{a} - i\alpha, \quad \alpha = \left\{ \frac{\rho\omega^2 \left[\sqrt{E^2(1 + \mu)^2 + \eta^2\omega^2} - E(1 + \mu) \right]}{2[E^2(1 + \mu)^2 + \eta^2\omega^2]} \right\}^{1/2}, \tag{6}$$

$$a = \left\{ \frac{2[E^2(1 + \mu)^2 + \eta^2\omega^2]}{\rho \left[E(1 + \mu) + \sqrt{E^2(1 + \mu)^2 + \eta^2\omega^2} \right]} \right\}^{1/2}, \quad \frac{\omega}{a} = k,$$

где α – коэффициент затухания возмущения, характеризующий уменьшение амплитуды колебаний в зависимости от расстояния до источника возмущения; a – фазовая скорость распространения возмущения в БС.

Используя граничные условия (3), (4) и запись $k = \frac{\omega}{a}$ в виде:

$$k = \frac{\omega}{a} = \left\{ \frac{\omega^2 \rho E(1 + \mu)}{2[E^2(1 + \mu)^2 + \eta^2\omega^2]} + \frac{\omega^2 \rho}{2\sqrt{E^2(1 + \mu)^2 + \eta^2\omega^2}} \right\}, \tag{7}$$

получим решение уравнения (2) в комплексной форме, т.е. в виде закона движения уплотняемой БС в направлении координаты z за время t в зависимости от частоты и амплитуды возмущающей силы, физико-механических характеристик уплотняемой БС, толщины уплотняемого слоя БС H и основных параметров вибростолы:

$$u(z, t) = \frac{Q \cdot \operatorname{ch}[(\alpha + ik) \cdot (H - x)] \cdot [(c_1 + c - q - m\omega^2) - i\omega(b_1 + b)]}{2\operatorname{ch}[(\alpha + ik) \cdot H] \cdot [(c_1 + c - q - m\omega^2)^2 + \omega^2(b_1 + b)^2]} \cdot \exp(i\omega t), \tag{8}$$

который лишь описывает возмущение в БС, вызванное внешней гармонической силой ($Q \cdot \sin \omega t$), т.е. вынужденное решение задачи. Здесь, в (8) введены обозначения:

$$\begin{cases} c_1 = F \cdot \frac{\alpha E(1 + \mu) \cdot sh(2\alpha H)}{[ch(2\alpha H) + \cos(2kH)]}; \\ b_1 = F \cdot \frac{[\alpha E(1 + \mu) - k\omega\eta] \cdot \sin(2kH) + [kE(1 + \mu) + \eta\omega\alpha] sh(2\alpha H)}{\omega[ch(2\alpha H) + \cos(2kH)]}; \\ q = F \cdot \frac{[kE(1 + \mu) - k\omega\eta] \cdot \sin(2kH) + [k\eta\omega - \alpha E(1 + \mu)] \cdot sh(2\alpha H)}{[ch(2\alpha H) + \cos(2kH)]}, \end{cases} \quad (9)$$

где c_1, b_1 – приведенные коэффициенты упругого и неупругого сопротивления БС.

Для нахождения истинного закона движения БС в объёмном случае её формирования следует в выражении (8) найти мнимую составляющую.

Закон движения вибростолба при $x = 0$ (в действительном виде) можно найти из соотношений:

$$\begin{aligned} u(0, t) &= A \cdot \sin(\omega t - \theta), \quad A = \frac{Q}{\sqrt{(c_1 + c - q - m\omega^2)^2 + \omega^2(b_1 + b)^2}}, \\ \theta &= \text{arctg} \left\{ \frac{\omega(b_1 + b)}{c_1 + c - q - m\omega^2} \right\}. \end{aligned} \quad (10)$$

Сила инерции БС выражается следующим образом:

$$q = m_n \cdot \omega^2, \quad m_n = F \cdot \frac{[kE(1 + \mu) - k\eta\omega] \cdot \sin(2kH) + [\eta\omega - \alpha E(1 + \mu)] \cdot sh(2\alpha H)}{\omega^2[ch(2\alpha H) + \cos(2kH)]}, \quad (11)$$

где m_n – приведенная масса БС в вертикальном направлении.

Удельная приведенная масса m_{1z} , коэффициенты сопротивления b_{1z} и жёсткости c_{1z} БС в вертикальном направлении определяются из соотношений (9), (11) путём деления m_n, b_1, c_1 на площадь основания формуемого изделия F :

$$m_{1z} = \frac{m_n}{F}, \quad b_{1z} = \frac{b_1}{F}, \quad c_{1z} = \frac{c_1}{F}. \quad (12)$$

Значения коэффициентов m_n, b_1, c_1 существенно зависят от коэффициентов динамической вязкости η и сухого трения μ , динамического модуля упругости E БС, её плотности ρ , фазовой скорости распространения возмущения в уплотняемом слое a , коэффициента поглощения α , толщины уплотняемого слоя БС H , площади основания днища формы F и места приложения вибрационной нагрузки.

Собственные колебания столба БС высотой H для объёмного способа её формирования получают следующий вид:

$$\tilde{u}(z, t) = \frac{2A\omega}{aH} \cdot \sum_{j=1}^{\infty} \frac{[(-1)^{j-1} - 1 + (-1)^j \cdot \cos\left(\frac{\omega H}{a}\right)]}{\left\{ \left(\frac{\omega}{a}\right)^2 - \left(\frac{j\pi}{H}\right)^2 + \alpha^2 \right\}} \cdot \sin\left\{ \frac{j\pi a t}{H} \right\} \cdot \sin\left\{ \frac{j\pi z}{H} \right\}. \quad (13)$$

Тогда общее решение задачи (2) – (4) можно записать так:

$$U(z, t) = u(z, t) + \tilde{u}(z, t). \quad (14)$$

Из (13) следует, что на частотах, удовлетворяющих соотношению:

$$\omega_j = \frac{j\pi a}{H}, \quad j = \overline{(1, \infty)}, \quad (15)$$

возможны резонансы собственных колебаний БС.

2. Поверхностное формирование БС.

Рассмотрим теперь решение задачи для поверхностного способа формирования БС.

Граничные условия в этом случае имеют вид (3) при $z = 0$ (координата z в этом случае отсчитывается от поверхности БС, на которую подаётся вибровозмущение), и условия при $z = H$ (нижняя поверхность формуемой смеси, контактирующая с неподвижным основанием):

$$u(H, t) = 0. \quad (16)$$

Вынужденная составляющая решения $u(z, t)$ в этом случае приобретает вид:

$$\bar{u}(z, t) = \frac{\sin[k(H - z)]}{\sin kH} \cdot \frac{Q \cdot \sin(\omega t - \tilde{\varphi})}{\left\{ \left[c + FE(1 + \mu)kctg(kH) - m\omega^2 \right]^2 + [b\omega - F\eta\omega kctg(kH)]^2 \right\}^{1/2}}, \quad (17)$$

где $\tilde{\varphi}$ – сдвиг фаз между перемещением и амплитудой возмущающей силы:

$$\tilde{\varphi} = \text{arctg} \left\{ \frac{b\omega - F\eta\omega kctg(kH)}{c + FE(1 + \mu)kctg(kH) - m\omega^2} \right\}. \quad (18)$$

При $z = 0$ выражения (17), (18) описывают колебания верхнего слоя уплотняемой БС и виброплиты:

$$\bar{u}(0, t) = \tilde{A} \cdot \sin(\omega t - \tilde{\varphi}), \quad (19)$$

где

$$\tilde{A} = \frac{Q}{\left\{ \left[c + FE(1 + \mu)kctg(kH) - m\omega^2 \right]^2 + [b\omega - F\eta\omega kctg(kH)]^2 \right\}^{1/2}}. \quad (20)$$

Анализ законов движения уплотняемой БС (17), (18) и вибрационной плиты (19), (20) (при поверхностном способе уплотнения) показывает, что выражение (20) служит для определения амплитуды вынужденных колебаний вибрационной плиты, а выражение:

$$\tilde{c}_1 = FE(1 + \mu)kctg(kH) \quad (21)$$

определяет жёсткость объёма уплотняемой БС.

Из выражения (21) находим удельное значение коэффициента жёсткости $\tilde{c}_{1y} = \tilde{c}_1 / F$, т.е.:

$$\tilde{c}_{1y} = E(1 + \mu)kctg(kH). \quad (22)$$

На основании выражения (20) закон колебаний (вынужденных) объёма уплотняемой БС можно представить в виде:

$$\bar{u}(z, t) = \tilde{A} \cdot \frac{\sin[k(H - z)]}{\sin[kH]} \cdot \sin(\omega t - \tilde{\varphi}). \quad (23)$$

Общее решение задачи (2), (3), (16) можно записать так:

$$\bar{U}(z, t) = \bar{u}(z, t) + u^*(z, t), \quad (24)$$

где $u^*(z, t)$ описывает собственные колебания уплотняемой БС, которые выражаются следующим соотношением:

$$u^*(z, t) = \frac{2\tilde{A}\omega}{aH} \cdot \sum_{j=1}^{\infty} \frac{(-1)^{j-1}}{\left[\left(\frac{\omega}{a} \right)^2 - \left(\frac{j\pi}{H} \right)^2 + \alpha^2 \right]} \cdot \sin \left[\frac{j\pi a t}{H} \right] \cdot \sin \left[\frac{j\pi z}{H} \right]. \quad (25)$$

Выводы

1. Определены законы движения основания уплотняемого слоя БС и днища формы при объёмном способе её формования.

2. Определены законы движения виброплиты и уплотняемого слоя БС при поверхностном способе её формования.

3. Для объёмного способа уплотнения БС получены: закономерности изменения коэффициента присоединённой массы БС; амплитуды колебаний днища формы; коэффициента неупругого сопротивления БС в зависимости от толщины уплотняемого слоя. Определён характер взаимодействия виброплощадки с БС при вертикально направленных колебаниях, её основные конструктивные параметры и параметры вибрационного воздействия на уплотняемую БС, что позволяет разработать эффективную виброплощадку, обеспечивающую уплотнение жёстких и умеренно жёстких БС.

4. На основании волновой теории колебаний изучен процесс распространения волн деформации в уплотняемом слое БС (при её поверхностном способе формования), представленной, как и при объёмном уплотнении, в виде системы с распределёнными параметрами. Определён закон движения уплотняемой БС при вибрационном воздействии (поверхностном) в зависимости от физико-механических характеристик БС, толщины уплотняемого слоя, массы виброплиты, частоты, амплитуды вынуждающей силы, жёсткости и коэффициента неупругого сопротивления упругой подвески. Найдены изменения удельного коэффициента жёсткости БС.

5. Для обоих способов уплотнения БС (объемного и поверхностного) определены законы движения, учитывающие возникновение колебаний собственных форм БС (при нулевых граничных условиях).

6. Полученные в работе результаты могут в дальнейшем служить для уточнения и совершенствования существующих инженерных методов расчёта вибростолы для объемного/поверхностного способов уплотнения БС как на стадиях их проектирования/конструирования, так и в режимах реальной эксплуатации.

Список использованной литературы

1. Маслов А.Г. Теоретические основы вибрационного уплотнения цементно-бетонных смесей/А.Г. Маслов, А.Ф. Иткин//Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДПУ. – 2004. – Вип. 5(28). – С. 45-49.
2. Саленко Ю.С. Горизонтальне бетоносмесителі принудительного действия/Ю.С. Саленко. – Кременчук: ТОВ «Кременчуцька міська друкарня», 2013. – 218с.
3. Волков С.А. Строительные машины/С.А. Волков, С.А. Евтюков. – СПб.: Издательство ДНК, 2012. – 597с.
4. Руденко И.Ф. Формование изделий поверхностными виброустройствами/И.Ф. Руденко. – М.: Издательство литературы по строительству, 1972. – 104с.
5. Овчинников П.Ф. Виброреология/П.Ф. Овчинников. – К.: Наукова думка, 1983. – 272с.
6. Чубук Ю.Ф. Вибрационные машины для уплотнения бетонных смесей/Ю.Ф. Чубук, И.И. Назаренко, В.Н. Гарнец. – К.: Вища школа, 1985. – 168с.
7. Маслов А.Г. Вибрационные машины и процессы в дорожном строительстве/А.Г. Маслов, В.М. Пономарь. – К.:Будівельник. 1985. – 128с.
8. Гарнец В.М. Прогресивні бетоноформуючі агрегати і комплекси/В.М. Гарнец. – К.: Будівельник, 1991. – 144с.
9. Гусев Б.В. Вибрационная технология бетона/Б.В. Гусев, В.Г. Зазимко. – К.: Будівельник, 1991. – 160с.
10. Назаренко И.И. Прикладные задачи теории вибрационных систем/И.И. Назаренко. – К.: ІСДО, 1993. – 216с.
11. Иткин А.Ф. Вибрационные машины для формования бетонных изделий/А.Ф. Иткин. – К.: «МП Леся», 2009. – 152с.
12. Маслов А.Г. Вибрационные машины и процессы в дорожном строительном производстве/А.Г. Маслов, Ю.С. Саленко. – Кременчук: ПП Щербатых О.В., 2014. – 262с.
13. Иткин А.Ф. Сравнение теоретических и экспериментальных данных исследований виброплощадок с горизонтально направленными колебаниями/А.Ф. Иткин, А.Г. Маслов//Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДПУ, 2007. – Вип. 1(42). Част. 2. – С. 14-18.
14. Маслов А.Г. Вибрационные машины для приготовления и уплотнения бетонных смесей/А.Г. Маслов, А.Ф. Иткин, Ю.С. Саленко. – Кременчук: ЧП Щербатых А.В., 2014. – 324с.
15. Маслов А.Г. Исследование взаимодействия вибрирующей плиты с цементно-бетонной смесью/А.Г. Маслов, Ю.С. Саленко, Н.А. Маслова//Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2011. – Вип. 2(67). Част. 1. – С. 93-98.
16. Маслов А.Г. Исследование колебаний рабочего органа машины для уплотнения бетонных смесей в вибрационном рабочем режиме/А.Г. Маслов, Жанар Батсайхан//Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2015. – Вип. 2(91). Част. 1. – С. 92-97.
17. Маслов А.Г. Исследование процесса уплотнения цементно-бетонных смесей на вибрационной площадке с жестко-упругими ограничителями/А.Г. Маслов, А.Ф. Иткин//Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДПУ, 2005. – Вип. 6(35). Част. 2. – С. 15-19.
18. Ловейкін В.С. Ідентифікація механічних властивостей ґрунтів сільськогосподарського призначення шляхом дослідження коливань їх зразків/В.С. Ловейкін, Ю.В. Човнюк, Л.А. Дяченко//Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. – Львів: Видавництво «Львівська Політехніка», 2011. – Вип. 45. – С. 103-109.
19. Савелов Д.В. Исследования процесса уплотнения порошковой смеси на вибростолы с вертикально направленными колебаниями/Д.В. Савелов//Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія: Машинобудування. – 2012. - №66. – С. 21-25.
20. Емельяненко Н.Г. Обоснование создания пневмовибрационных машин для формования бетонных изделий/Н.Г. Емельяненко//Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. – 2012. – Вип. 24. – С. 268-274.
21. Саленко Ю.С. Исследование процесса взаимодействия вибрационной заслонки бетоносмесителя с обрабатываемой средой/Ю.С. Саленко//Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2013. – Вип. 3(80). – С. 148-152.

22. Жанар Батсайхан. Исследование взаимодействия вибрационной плиты рабочего органа с уплотняемой средой/Батсайхан Жанар// Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2015. – Вип. 1(90). Част. 1. - С. 92-97.
23. Маслов А.Г. Исследование взаимодействия виброплощадки с бетонной смесью/А.Г. Маслов, О.О. Колесник// Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2016. – Вип. 1(96). - С. 51-57.
24. Кошляков Н.С. Уравнения в частных производных математической физики/Н.С. Кошляков, Э.Б. Глинер, М.М. Смирнов. – М.: Высшая школа. 1970. – 712с.