

УДК 693.546.4+666.97.033.16

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.231018.56.311

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ УПЛОТНЕНИЕМ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ ВИБРАЦИОННЫМ СПОСОБОМ И ЕГО ОСОБЕННОСТИ

СТОРОЖУК Н. А.¹, *д-р техн. наук, проф.*,

ДЕХТА Т. Н.², *канд. техн. наук, доц.*

¹Кафедра технологии строительных материалов, изделий и конструкций, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского 24-а, Днепро, 49600, Украина, тел. +38 (0562) 46-93-07, e-mail: storozhukpsacea@gmail.com, ORCID ID:0000-0002-3132-8864

²Кафедра технологии строительных материалов, изделий и конструкций, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского 24-а, Днепро, 49600, Украина, тел. +38 (096) 242-64-41, e-mail: dehta.tatyana75@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5023-3070

Аннотация. Постановка проблемы. Первые сведения о практическом применении вибрирования при уплотнении бетонных смесей относятся к 1890 году. Применяли пневматические и храповиковые виброустройства различных типов. После этого до 1915 г. научные работы и новые сведения о практическом применении виброуплотнения бетонных смесей не известны. В 1915 г. начаты исследования виброуплотненного бетона и бетона ручной кладки, сравнительная оценка их свойств. Появились публикации в различных научно-технических изданиях [1]. В работах [2; 3] проведен детальный анализ различных способов виброуплотнения бетонных смесей, которые применялись или применяются в настоящее время на производстве. В основном, уплотнение бетонных смесей вибрационным способом производится при принятых постоянных параметрах, характеризующих эффективность вибрационных воздействий. Такими параметрами для синусоидальных колебаний являются амплитуда перемещения A , частота f и их производные [4]. Каждый из перечисленных параметров может в определенной степени характеризовать вибрационное воздействие на бетонную смесь. **Цель статьи** – выполнение теоретических и экспериментальных исследований по оптимальному управлению уплотнением бетонных смесей при производстве бетонных и железобетонных изделий и конструкций. **Выводы.** Разработано и теоретически обосновано оптимальное управление процессом виброуплотнения (по быстродействию) с использованием принципа максимума академика Л. С. Понтрягина, позволяющее эффективно уплотнять бетонную смесь с минимальными затратами времени. На основании этого предложен новый режим уплотнения бетонных смесей вибрационным способом, который позволяет значительно повысить физико-механические свойства бетонов. Экспериментальными исследованиями подтверждены выводы, полученные при теоретических разработках по совершенствованию режима уплотнения бетонных смесей. Сравнительная оценка различных способов и режимов уплотнения показала, что лучшие результаты получены при применении оптимального управления формованием, т. е. при использовании режима с многократными вибрационными воздействиями. В этом случае повышение прочности бетона составило 25...30 % в сравнении с показателями бетона, уплотненного традиционным способом.

Ключевые слова: оптимальное управление; многократные вибрационные воздействия; режим уплотнения бетонных смесей; активное давление в бетонной смеси; физико-механические свойства бетона

ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ УЩІЛЬНЕННЯМ БЕТОННИХ СУМІШЕЙ ВІБРАЦІЙНИМ СПОСОБОМ І ЙОГО ОСОБЛИВОСТІ

СТОРОЖУК М. А.¹, *д-р техн. наук, проф.*,

ДЕХТА Т. М.², *канд. техн. наук, доц.*

¹Кафедра технології будівельних матеріалів, виробів та конструкцій, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (0562) 46-93-07, e-mail: storozhukpsacea@gmail.com, ORCID ID:0000-0002-3132-8864

²Кафедра технології будівельних матеріалів, виробів та конструкцій, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел.+38 (096) 242-64-41, e-mail: dehta.tatyana75@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5023-3070

Анотація. Постановка проблеми. Перші відомості про практичне застосування вібрації для ущільнення бетонних сумішей належать до 1890 року. Застосовували пневматичні і храповикові вібропристрої різних типів. Після цього до 1915 р наукові праці і нові відомості про практичне застосування віброущільнення бетонних сумішей не відомі. У 1915 р. розпочато дослідження віброущільненого бетону і бетону ручної укладки, порівняльна оцінка їх властивостей. З'явилися публікації в різних науково-технічних виданнях [1]. У працях [2; 3] проведено детальний аналіз різних способів віброущільнення бетонних сумішей, які застосовувалися або застосовуються в даний час на виробництві. В основному, ущільнення бетонних сумішей вібраційним способом здійснюється за прийнятих постійних параметрів, що характеризують ефективність вібраційних впливів. Такими параметрами для синусоїдальних коливань є амплітуда переміщення A , частота f і їх похідні [4]. Кожен із перерахованих параметрів може певною мірою характеризувати вібраційний вплив на бетонну суміш. **Мета статті** – виконання теоретичних і експериментальних досліджень з оптимального керування ущільненням бетонних сумішей під час виробництва бетонних і залізобетонних виробів і конструкцій. **Висновки.** Розроблено та теоретично обґрунтовано оптимальне керування процесом віброущільнення (за швидкодією) бетонних сумішей з використанням принципу максимуму академіка Л. С. Понтрягіна, що дозволяє ефективно ущільнювати суміші з мінімальними витратами часу. На підставі виконаних теоретичних досліджень для практичного використання запропоновано новий спосіб ущільнення бетонних сумішей вібраційним

способом. Експериментальними дослідженнями підтвержені висновки, отримані під час теоретичних розробок. Порівняльна оцінка різних способів і режимів ущільнення показала, що кращі результати отримані у разі застосування оптимального керування формуванням, тобто за використання режиму з багаторазовими вібраційними впливами. У цьому випадку підвищення міцності бетону склало 25...30 % порівняння з показниками бетону, ущільненого традиційним способом. При цьому значно скорочена тривалість ущільнення.

Ключові слова: оптимальне керування; багаторазові вібраційні впливи; режим ущільнення бетонних сумішей; активний тиск у бетонній суміші; фізико-механічні властивості бетону

OPTIMAL CONTROL OF CONCRETE MIXTURES COMPACTING BY VIBRATION METHOD AND ITS FEATURES

STOROZHUK N. A.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*

ДЕХТА Т. Н.², *Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof.*

¹ Department of building materials, products and structures technology, State Higher Education Establishment «Pridneprovskaya State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-a, Chernyshevskogo str., Dnepr 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-93-07, e-mail: storozhukpsacea@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3132-8864

² Department of building materials, products and structures technology, State Higher Education Establishment «Pridneprovskaya State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-a, Chernyshevskogo str., Dnepr 49600, Ukraine, tel. +38 (096) 242-64-41, e-mail: dehta.tatyana75@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5023-3070

Annotation. Formulation of the problem. The first information about the practical application of vibration during compacting concrete mixtures dates back to 1890. Pneumatic and ratchet vibrating devices of various types were used. After this, until 1915, scientific work and new information on the practical application of vibrocompaction of concrete mixtures are not known. In 1915, studies of vibrated concrete and hand-laid concrete as well as comparative assessment of their properties are started. The publications are appeared in various scientific and technical editions [1]. In works [2, 3], a detailed analysis of various methods of vibrocompaction of concrete mixtures, which have been used or are currently used in production, is carried out. Basically, the compaction of concrete mixtures by the vibration method is carried out with the adopted constant parameters characterizing the effectiveness of vibration effects. Such parameters for pure oscillations are the amplitude of the displacement A , the frequency f , and their derivatives [4]. Each of the listed parameters can in a certain degree characterize the vibration impact on the concrete mixture. **Purpose of the article** – implementation of theoretical and experimental investigations in accordance with the optimal control of concrete mixtures compaction during the production of concrete and reinforced concrete products and structures. **Conclusions.** The optimal control of concrete mixtures vibrocompaction process (in rapidity) has been developed and theoretically justified with using the maximum principle of academician L. S. Pontryagin, which allows effectively compacting mixtures with minimal time. On the basis of this, a new method of concrete mixtures compaction by the vibration method is offered, which can significantly improve the physical and mechanical properties of concrete. Experimental studies have confirmed the conclusions obtained during theoretical researchers to improve the concrete mixtures compaction. A comparative assessment of different methods and modes of compaction showed that the best results were obtained by applying optimal control of molding, i.e. when using the mode with multiple vibration effects. In this case, the increase in the concrete strength was 25 ... 30% in comparison with the performance of concrete compacted in the traditional way.

Keywords: optimal control; repeated vibration effects; mode of concrete mixtures compaction; active pressure in the concrete mixture; physical and mechanical properties of concrete.

Постановка проблеми. Первые сведения о практическом применении вибрирования при уплотнении бетонных смесей относятся к 1890 году. Применяли пневматические и храповиковые виброустройства различных типов. После этого до 1915 г. научные работы и новые сведения о практическом применении виброуплотнения бетонных смесей не известны.

В 1915 году начаты исследования виброуплотненного бетона и бетона ручной кладки, сравнительная оценка их свойств. Появились публикации в различных научно-технических изданиях [1].

В работах [2, 3] проведен детальный анализ различных способов виброуплотнения бетонных смесей, которые применялись или применяются в настоящее время на производстве. В основном, уплотнение бетонных смесей вибрационным способом производится при принятых постоянных параметрах, ха-

рактеризующих эффективность вибрационных воздействий.

Такими параметрами для синусоидальных колебаний являются амплитуда перемещения A , частота f и их производные [4]:

- амплитуда скорости - $V = A\omega$;
- ускорение - $a = A\omega^2$;
- величина резкости - $U = A\omega^3$;
- мощность по гипотезе вязкого сопротивления - $W_B = A^2\omega^3$;

- мощность по гипотезе о сопротивлении, пропорциональном ускорению при сдвиге силы сопротивления по фазе относительно перемещения на угол 90° - $W = A^2\omega^3$,

где ω - угловая частота или число полных колебаний за 2π единицы времени, рад/сек.

Каждый из перечисленных параметров может в определенной степени характеризовать

вать вибрационное воздействие на бетонную смесь. Однако результаты исследований, приведенные в работах [5; 6] показали, что такое воздействие достаточно надежно выражает величина, которую для синусоидальных колебаний можно представить в виде зависимости:

$$I = A^2 f^3 \quad (1)$$

Для несинусоидальных (поличастотных колебаний):

$$I = \frac{aR}{8\pi^2 T}, \quad (2)$$

где R – величина размаха;
 T – период колебаний;
 a – ускорение ($a = A\omega^2$).

Эту величину, в виде совместной функции скорости и ускорений (уравнения 1 и 2), пропорциональную мощности потока энергии, затрачиваемой на колебания, называют интенсивностью вибрации [5].

Большое внимание режимам уплотнения с управляющим динамическим воздействием уделял Б. И. Зыков [7]. Им установлено, что в условиях объемизменения среды без возможности бокового расширения происходит диссипация энергии, а внутренние ее превращения обусловлены тиксотропными явлениями в зонах межчастичных взаимодействий и деформационным упрочнением структуры в объеме.

Автором работы определена целевая функция для определения внутреннего напряженного состояния деформируемой среды, которое имеет временной характер развития и зависит от силы тяжести, статической и динамической нагрузок, амплитудно-частотного фона и его направленности. Обоснованы закономерности регулирования управляемых вибрационных режимов, критерии оценки эффективности назначаемых режимов и проектируемых машин.

Б. В. Гусев [8] предложил три плавных режима формования с начальной частотой 10 Гц и ускорением 2 g. В первом режиме за время формования плавно изменяли частоту до 25 Гц и ускорение до 2,5 g; во втором – до частоты 50 Гц и ускорения 3,5 g и в третьем – до 75 Гц и 4,5 g. По данным автора переменные режимы обеспечивают надлежащее

уплотнение бетонных смесей средней и даже повышенной жесткости, а также способствуют повышению морозостойкости.

Выполненные ранее исследования по виброуплотнению бетонных смесей посвящены следующим вопросам:

- исследованию влияния интенсивности вибрации на качество уплотнения бетонных смесей (В. Н. Шмигальский, Г. Я. Куннос, Ю. Сторк);
- созданию режимов уплотнения бетонных смесей с различной последовательностью изменения интенсивности во времени (Б. В. Гусев, В. Г. Зазимко, А. С. Файвусович);
- созданию нового формовочного оборудования с управляемыми режимами вибрирования (Б. И. Зыков);
- созданию разночастотного оборудования (Н. И. Орды).

Цель статьи – выполнение теоретических и экспериментальных исследований по оптимальному управлению уплотнением бетонных смесей при производстве бетонных и железобетонных изделий и конструкций.

Основной материал. В общем случае вопросам оптимального управления процессом уплотнения бетонных смесей практически не уделялось внимания. Отсутствует теоретическое обоснование оптимального режима уплотнения бетонных смесей. И, как следствие этому, продолжительность формования (уплотнения бетонных смесей) является весьма значительной.

Нами при разработке основ теории оптимального управления процессом виброуплотнения бетонной смеси использованы достижения теоретической физики и аналитической механики [9, 10]. Известно, что задание энергии как функции координат и импульсов частиц полностью определяет динамику системы. При этом уравнения имеют вид:

$$\frac{d\bar{X}^y}{dt} = \frac{\partial H}{\partial \bar{\psi}^y}; \quad \frac{d\bar{\psi}^y}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial \bar{X}^y}, \quad (3)$$

где \bar{X}^y – вектор фазового пространства (термины «теории оптимального управления»);

$\bar{\psi}^y$ – вектор количества движения частиц системы (импульс системы);
 H – величина, характеризующая энергию системы.

В таком виде эта зависимость называется уравнением Гамильтона, а энергия, как функция координат и импульсов, называется функцией Гамильтона.

Указанные закономерности нами использованы при применении принципа максимума Л. С. Понтрягина для вывода уравнений, необходимых для оптимального управления по быстрдействию процессом уплотнения бетонных смесей вибрационным способом [10; 12].

Сущность принципа максимума Л. С. Понтрягина заключается в следующем.

Пусть $\bar{P}(t)$ – допустимое управление, переводящее фазовую точку из положения \bar{X}_o^y в положение \bar{X}_k^y . Для оптимальности (по быстрдействию) управления $\bar{P}(t)$ и траектории $\bar{X}^y(t)$ необходимо существование такой ненулевой непрерывной вектор-функции $\bar{\psi}^y(t) = \psi_1^y(t), \psi_2^y(t) \dots \psi_n^y(t)$, соответствующей функциям $\bar{P}(t), \bar{X}^y(t)$ и уравнениям:

$$\frac{dX_i^y}{dt} = \frac{\partial H}{\partial \psi_i^y}; \quad \frac{d\psi_i^y}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial X_i^y}, \quad (4)$$

при которой:

- для всех $t, t_0 \leq t \leq t_k$, функция $H(\bar{\psi}^y(t), \bar{X}^y(t), P)$ переменного $P \in P_{\max}$ достигает в точке $P = \bar{P}(t)$ максимума:

$$H(\bar{\psi}^y(t), \bar{X}^y(t), \bar{P}(t)) = \max H(\bar{\psi}^y(t), \bar{X}^y(t), P); \quad (5)$$

- в конечный момент t_k выполняется соотношение:

$$H(\bar{\psi}^y(t_k), \bar{X}^y(t_k), \bar{P}(t_k)) \geq 0. \quad (6)$$

В уравнении (4) функция H характеризует энергию частиц бетонной смеси при виброуплотнении, а функция $\bar{\psi}^y$ – вектор количества движения частиц бетонной смеси (импульс системы). Существенными факторами, характеризующими качество и скорость уплотнения бетонной смеси, являются изменение объема уплотняемой смеси и скорость удаления воздушной фазы. Поэтому, используя термины «теории оптимального управления», фазовую плоскость будем характеризовать координатой X_1^y – объем уплотняемой бетонной смеси, а координатой X_2^y – скорость удаления воздушной фазы; начало координат будет характеризоваться минимально возможным объемом уплотненной смеси и скоростью удаления воздушной фазы, равной нулю. Фазовое состояние бетонной смеси в начальный момент времени $(X_1^y(t_0), X_2^y(t_0))$ и управляющая функция $\bar{P}(t)$ – давление в бетонной смеси во время виброуплотнения – однозначно определяют фазовую траекторию состояния бетонной смеси при уплотнении (рис. 1).

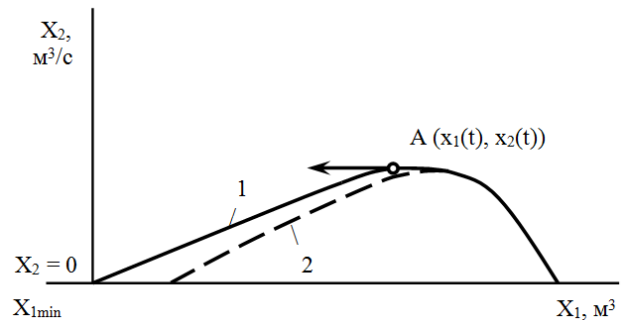


Рис. 1. Фазовая траектория уплотнения бетонной смеси: 1 – при оптимальном управлении формированием; 2 – при традиционном способе формирования / Phase trajectory of the concrete mixture compaction: 1 – with optimal control of molding; 2 – with the traditional method of molding

Точку A с координатами $(X_1(t), X_2(t))$ на плоскости $X_1 O X_2$ (рис. 1) называют фазовой точкой системы (уплотняемой бетонной смеси). С изменением времени t точка A изменяет свое положение и образует фазовую траекторию системы (уплотняемой бетонной смеси).

Что касается характеристики управления, принято следующее определение: в бетонной смеси активное давление, вызываемое потоком энергии (при работающем виброустройстве), характеризуется $P = +1$, а давление, возникающее при инерционном потоке энергии (при отключенном виброустройстве) – $P = -1$. Таким образом, управляющее воздействие изменяется в пределах:

$$-1 \leq P \leq +1. \quad (7)$$

Среди всех допустимых управлений $\bar{P}(t)$, переводящих бетонную смесь из заданного начального состояния \bar{X}_o^y в конечное положение \bar{X}_k^y , необходимо найти такое управление $\bar{P}(t)$, для которого функционал

$$I = \int_{t_o}^{t_k} dt = t_k - t_o = T_o \quad (8)$$

принимает наименьшее значение. Искомое управление $\bar{P}(t)$, минимизирующее время уплотнения бетонной смеси T_o , является оптимальным управлением.

В соответствии с принципом максимума Понтрягина функция H имеет вид:

$$H = \psi_1^y X_2^y + \psi_2^y K^y(t) P_b. \quad (9)$$

Из выражения (9) следует, что функция H достигает максимальной величины, если управляющее воздействие в каждый момент времени имеет максимальное по модулю значение и знак, совпадающий со знаком функции $\psi_2^y(t)$.

Для функций ψ_1^y и ψ_2^y , с учетом (4) и (9), мы получим систему уравнений:

$$\frac{d\psi_1^y}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial X_1^y} = 0; \quad \frac{d\psi_2^y}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial X_2^y} = -\psi_1^y. \quad (10)$$

Путем интегрирования (10) находим:

$$\psi_1^y = C_1^y; \quad \psi_2^y = C_2^y - C_1^y t \quad (11)$$

где C_1^y, C_2^y – постоянные интегрирования,

зависящие от свойств

- уплотняемой бетонной смеси,
- режима уплотнения.

На основании соотношения максимума (5), с учетом (7) и (9) для управляющего воздействия \bar{P} и функции $\bar{\psi}^y$ получено:

$$\begin{aligned} \bar{P}(t) &= +1 \quad \text{при} \quad \psi_2^y(t) > 0 \\ \bar{P}(t) &= -1 \quad \text{при} \quad \psi_2^y(t) < 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Таким образом, в нашем случае H есть линейная функция от P , ее наибольшее значение при прочих равных условиях достигается при $P = +1$ или при $P = -1$, т. е. $P = +1$ при $\psi_2 > 0$ ($\psi_2 P > 0$), $P = -1$ при $\psi_2 < 0$. Это значит, что:

$$\bar{P}(t) = \text{sign} \psi_2(t) = \text{sign}(C_2^y - C_1^y t). \quad (13)$$

Соотношение (13) дает искомое оптимальное по быстродействию управление, которое оказывается кусочно-постоянным (релейным) – периодически изменяющимся. Число переключений (или интервалов постоянства управления P) для линейных систем всегда конечно и зависит от области управления и от начальных и конечных условий \bar{X}_o^y, \bar{X}_k^y .

Постоянные интегрирования C_1^y и C_2^y определяем из граничных условий, при этом предполагаем, что промежуток времени работы виброустройства $t = 1$ при отключенном виброустройстве $t = 0$. Таким образом, с учетом (7) получим:

$$\text{при } t = 1, P = 1, \quad \text{при } t = 0, P = -1$$

$$\bar{P}(t) = \text{sign}(2t - 1); \quad (14)$$

С учетом работы [13]

$$\bar{H}(t) = \text{sign}(2t - 1). \quad (14a)$$

На основании полученных результатов теоретических исследований (уравнения 14 и 14a) разработана структурная схема управления виброуплотнением бетонной смеси с обратной связью (рис. 2).

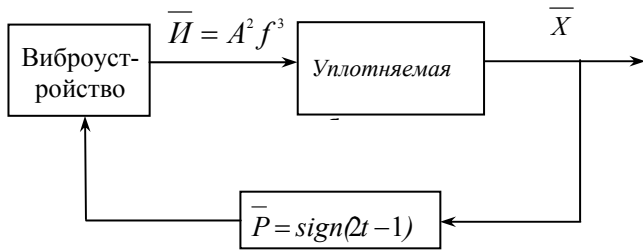


Рис. 2. Структурная схема управления виброуплотнением бетонной смеси с обратной связью / Structural control circuit vibrating compaction of concrete mix with feedback

Таким образом, оптимальное управление формированием осуществляется рациональным регулированием давления внутри уплотняемой вибрационным способом бетонной смеси путем многократных вибрационных воздействий (многократных импульсов интенсивности).

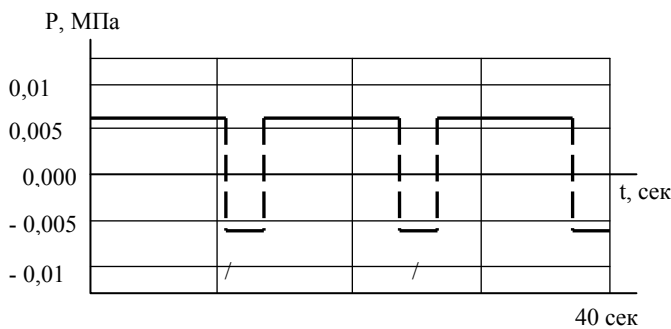


Рис. 3. Схема оптимального управления активным давлением при уплотнении бетонной смеси: 1 – при включенном виброустройстве; 2 – то же при отключенном виброустройстве / Optimum control of active pressure during compaction concrete mix: 1 – with the vibrating device turned on; 2 – also with unplugged vibrator

При выполнении экспериментальных исследований, следуя основным принципам оптимального управления технологическими процессами, мы сделали одно весьма существенное для дальнейших исследований предложение о характере управления. Как и принято в теории оптимального управления предполагаем, что «рули», положение которых характеризуется управляющими параметрами P_1, P_2, \dots, P_n , безынерционны, так что есть возможность, если нужно, мгновенно переключить эти «рули» из одного положения в другое, т. е. мгновенно (скачком)

менять значения управляющих параметров P_1, P_2, \dots, P_n . В соответствии с этим рассматриваются не только непрерывное, но и произвольные кусочно-непрерывные управления $P(t)$, т. е. управления, состоящие из конечного числа непрерывных кусков. В нашем случае такое управление приведено на рисунке 3.

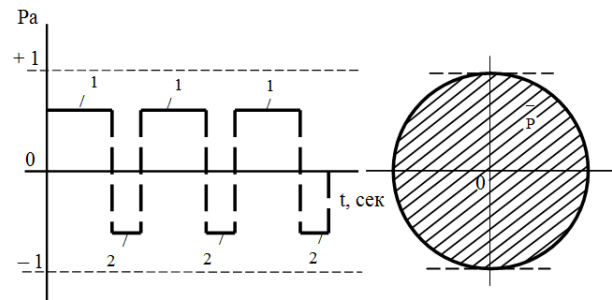


Рис. 4. Область управления при оптимальном управлении уплотнением бетонных смесей: 1 – при включенном виброустройстве; 2 – то же при отключенном виброустройстве / Management area with optimal control of compaction of concrete mixtures: 1 – when the vibrating control is on; 2 – also with the vibration device disabled

Что касается области управления, то следует отметить следующее.

В нашем случае параметры P_1, P_2, \dots, P_n характеризуют векторную величину на плоскости, модуль которой не превосходит единицы, а направление произвольно, поэтому, эти параметры подчинены только одному условию $(P_1)^2 + (P_2)^2 - 1 \leq 0$ и область управления \bar{P} представляет собой круг (рис. 4).

При выполнении экспериментальных исследований применяли бетонные смеси состава 1:2,24:4,99:0,76 (Ц:П:Щ:В), подвижность которых характеризовалась ОК = 3...4 см.

Результаты измерения активного давления в бетонной смеси с учетом принятых допущений приведены в таблице 1 и на рисунке 5.

Установлено, что при включении виброустройства в результате воздействия потока энергии (потока интенсивности) на бетонную смесь активное давление увеличивается до некоторой величины (0,005 МПа), а затем

стабилизируется. При такой стабилизации возникают сводообразования за счет заклинивания заполнителей, что приводит к резкому уменьшению скорости уплотнения, а также к образованию направленных капилляров удаляемым воздухом и перераспределяющимся цементным тестом (растворной составляющей). В случае отключения потока интенсивности (потока энергии) на короткий промежуток времени наблюдается инерционный всплеск интенсивности, выраженной в резком повышении активного давления (0,007 МПа) (табл. 1).

При таком воздействии происходит разрушение сводообразований, направленных капилляров, что способствует значительному повышению степени уплотнения бетонной смеси. Особенно это проявляется при многократном повторении таких воздействий.

Таблица 1

Активное давление (МПа) в бетонной смеси при вибрационном воздействии / Active pressure (MPa) in concrete mix under vibration exposure

№ опытов	При работе виброустройства (продолжительностью 6 с)	При отключенном виброустройстве (продолжительностью 3 с)	При работе виброустройства (продолжительностью 6 с)	При отключенном виброустройстве (продолжительностью 3 с)	При работе виброустройства (продолжительностью 6 с)
1	0,005	0,007	0,005	0,0057	0,005
2	0,005	0,007	0,006	0,0065	0,0055
3	0,005	0,006	0,005	0,0055	0,0045

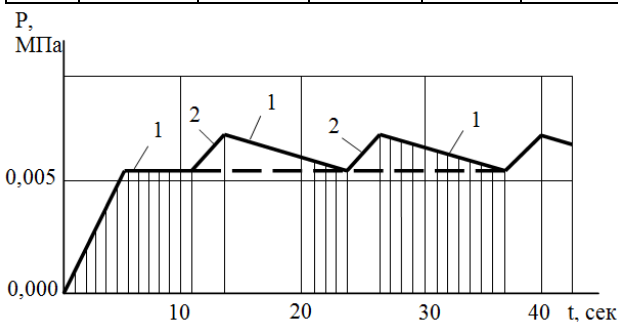


Рис. 5. Активное давление при вибрационных воздействиях на уплотняемую бетонную смесь: 1 – при включенном виброустройстве; 2 – при отключенном виброустройстве / Active pressure during vibrocompaction on compacted concrete mix: 1 – when the vibration device is on; 2 – when the vibration device is off

отрежимауплотнения / Density and strength of concrete depending from compaction mode

Вид уплотнения	Продолжительность вибровоздействия, с	Количество вибровоздействий	Плотность бетонной смеси ρ_0 , кг/м ³	Прочность бетона R_{28}^{28} , МПа
Существующий способ виброуплотнения (при постоянной интенсивности)	20	1	2 376	19,3
Предлагаемый способ виброуплотнения (при многократных вибровоздействиях)	8	2	2 441	22,6
То же	6	3	2 478	25,1
Существующий способ виброуплотнения (при постоянной интенсивности)	30	1	2 384	19,4
Предлагаемый способ виброуплотнения (при многократных вибровоздействиях)	13	2	2 466	23,0
То же	8	3	2 505	25,8
То же	6	4	2 507	25,9
Существующий способ виброуплотнения (при постоянной интенсивности)	40	1	2 386	19,3
Предлагаемый способ виброуплотнения (при многократных вибровоздействиях)	18	2	2 475	24,0
То же	13	3	2 511	26,0
То же	8	4	2 513	26,2

Таблица 2

Плотность и прочность бетонов в зависимости

Это подтверждено нашими дальнейшими исследованиями. Продолжительность фор-

мования образцов была различной и составляла 20, 30 и 40 с. Количество вибровоздействий изменялось от одного (при постоянной интенсивности уплотнения) до четырех в пределах указанной продолжительности. Промежуток времени между вибровоздействиями составил 2...3 с. Результаты исследований приведены в табл 2.

Приведенные экспериментальные данные показывают, что при двух вибровоздействиях повышение прочности бетона в 28-суточном возрасте составляет 16...18 %, при трех вибровоздействиях прочность бетона оказывается на 25...30 % выше, в сравнении с бетонами, уплотненными по традиционному режиму формования.

При этом высокие показатели по плотности и по прочностным характеристикам получены уже при продолжительности формования 20 св случае применения оптимального управления формованием. Дальнейшее увеличение количества вибровоздействий (больше трех) не приводит к существенному увеличению ни плотности бетона, ни его прочности.

Выводы. Разработано и теоретически обосновано оптимальное управление процессом виброуплотнения (по быстрдействию) бетонных смесей с использованием принципа максимума академика Л. С. Понтрягина, позволяющее эффективно уплотнять смеси с минимальными затратами времени. На основании выполненных теоретических исследований для практического использования предложен новый способ уплотнения бетонных смесей вибрационным способом.

Экспериментальными исследованиями подтверждены выводы, полученные при теоретических разработках. Сравнительная оценка различных способов и режимов уплотнения показала, что лучшие результаты получены при применении оптимального управления формованием, т. е. при использовании режима с многократными вибрационными воздействиями. В этом случае повышение прочности бетона составило 25...30 % в сравнении с показателями бетона, уплотненного традиционным способом. При этом значительно сокращена продолжительность уплотнения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Десов А. Е. Вибрированный бетон / А. Е. Десов. – Москва : Госстройиздат, 1956. – 229 с.
2. Десов А. Е. О рациональных режимах виброуплотнения бетонных смесей / А. Е. Десов // Сборник трудов научно-исследовательского института бетона и железобетона. – Москва : Госстройиздат, 1959. – Вып. 11 : Технология и свойства тяжелых бетонов. – С. 12–25.
3. Десов А. Е. Состояние и перспективы развития технологии и теории формования сборного железобетона / А. Е. Десов, И. Ф. Руденко // Формование бетона : матер. координац. совещания. – Москва, 1973. – С. 8–25.
4. Иориш Ю. И. Виброметрия. Измерение вибрации и ударов. Общая теория, методы и приборы / Ю. И. Иориш. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Гос. науч.-техн. изд-во машиностроит. лит., 1963. – 773 с.
5. Шмигальский В. Н. Формование изделий на виброплощадках : монография / В. Н. Шмигальский. – Москва : Стройиздат, 1968. – 104 с.
6. Куннос Г. Я. Вибрационная технология бетона / Г. Я. Куннос. – Ленинград : Стройиздат, 1967. – 168 с.
7. Зыков Б. И. Уплотняющие машины с управляемым динамическим воздействием: Теория, эксперимент, практика : монография / Б. И. Зыков. – Ярославль, 1990. – 88 с.
8. Гусев Б. В. Вибрационная технология бетона / Б. В. Гусев, В. Г. Зазимко. – Київ : Будівельник, 1991. – 160 с.
9. Ландау Л. Д. Теоретическая физика : в 10 т. / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – 3-е изд., доп. – Москва : Наука, 1976. – Т. V : Статистическая физика. Ч. 1. – 584 с.
10. Астахов А. В. Курс физики : в 3 т. / А. В. Астахов. – Москва : Наука, 1977. – Т. 1 : Механика. Кинетическая теория материи. – 384 с.
11. Математическая теория оптимальных процессов : монография / Л. С. Понтрягин, В. Г. Болтянский, Р. В. Гамкрелидзе, Е. Ф. Мищенко. – 3-е изд. – Москва : Наука, 1976. – 392 с.
12. Болтянский В. П. Математические методы оптимального управления / В. П. Болтянский. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Наука, 1969. – 408 с.
13. Лермит Р. Проблемы технологии бетона / Р. Лермит. – Москва : Госстройиздат, 1959. – 294 с.

REFERENCES

1. Desov A.E. *Vibrirovannyj beton* [Vibrated concrete]. Moscow: Gosstrojizdat, 1956, 229 p. (in Russian).
2. Desov A.E. *O ratsional'nykh rezhimakh vibrouplotneniya betonnykh smesey* [On the issue of rational modes of vibro-compaction of concrete mixtures]. *Sbornik trudov nauchno-issledovatel'skogo instituta betona i zhelezobetona* [Works' collection of the Scientific Research Institute of concrete and reinforced concrete]. Moscow: Gosstrojizdat,

- 1959, iss. 11: *Tekhnologiya i svoystva tyazhelykh betonov* [Technology and properties of heavy concrete], pp. 12–25. (in Russian).
3. Desov A.E. and Rudenko I.F. *Sostoyanie i perspektivy razvitiya tekhnologii i teorii formovaniya sbornogo zhelezo-betona* [The state and prospects of the development of technology and the theory of the molding precast concrete]. *Formovanie betona: mater. koordinats. soveshchaniya* [Concrete forming: coordinate materials of meetings]. Moscow, 1973, pp. 8–25. (in Russian).
 4. Iorish Yu.I. *Vibrometriya. Izmerenie vibratsii i udarov. Obshchaya teoriya, metody i pribory* [Vibrometry. Measurement of vibration and shock. General theory, methods and devices]. Ed. 2, Moscow: Gos. nauch.-tekhn. izd-vo mashinostroit. lit., 1963, 773 p. (in Russian).
 5. Shmigal'skiy V.N. *Formovanie izdeliy na vibroplushchadkakh* [Forming products on vibrating-plate compactor]. Moscow: Stroyizdat, 1968, 104 p. (in Russian).
 6. Kunnos G.Ya. *Vibratsionnaya tekhnologiya betona* [Vibration technology of concrete]. Leningrad: Strojizdat, 1967, 168 p. (in Russian).
 7. Zykov B.I. *Uplotnyayushchie mashiny s upravlyaemym dinamicheskim vozdeystviem: teoriya, eksperiment, praktika* [Dynamic Impact Sealing Machines: theory, experiment, practice]. Yaroslavl, 1990, 88 p. (in Russian).
 8. Gusev B.V. and Zazimko V.G. *Vibratsionnaya tekhnologiya betona* [Vibration technology of concrete]. Kyiv: Budivelnik, 1991, 160 p. (in Russian).
 9. Landau L.D. and Lifschitz E.M. *Teoreticheskaya fizika* [Theoretical physics]. Ed. 3, Moscow: Nauka, 1976, vol. 5: *Statisticheskaya fizika* [Statistical physics], part 1, 584 p. (in Russian).
 10. Astakhov A.V. *Kurs fiziki* [Physics course]. Moscow: Nauka, 1977, vol. 1: *Mekhanika. Kineticheskaya teoriya materii* [Mechanics. Kinetic theory of substance], 384 p. (in Russian).
 11. Pontryagin L.S., Boltyanskiy V.G., Gamkrelidze R.V. and Mishchenko E.F. *Matematicheskaya teoriya optimal'nykh protsessov* [Mathematical theory of optimal processes]. Ed. 3, Moscow: Nauka, 1976, 392 p. (in Russian).
 12. Boltyanskiy V.P. *Matematicheskie metody optimal'nogo upravleniya* [Mathematical methods of optimal control]. Ed. 2, Moscow: Nauka, 1969, 408 p. (in Russian).
 13. Lermi R. *Problemy tekhnologii betona* [Problems of concrete technology]. Moscow: Gosstroyizdat, 1959, 294 p. (in Russian).

Рецензент: Слободянюк С. О., д-р техн. наук, проф.

Надійшла до редколегії: 13.08.2018 р.