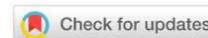


СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS



УДК 691.328

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-3-15-21>

Аналитический обзор способов управления параметрами вибрационного уплотнения бетонных смесей



С.В. Эдильян  ✉, Х.С. Явруян 

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ spartak-edilyan@yandex.ru

EDN: BREMVP

Аннотация

Введение. Представлен исторический обзор становления и применения способов виброуплотнения бетонных смесей, а также выдающиеся современные наработки ученых в данной области. Предлагается использовать жесткие бетонные смеси, которые сокращают расход цемента в бетоне, ускоряют нарастание прочности, уменьшают усадочные деформации и тепловыделение, повышают прочность и долговечность изделий. Рассмотрены вопросы теории и практики вибрационного уплотнения бетонных смесей, исследований воздействия различных режимов колебаний виброплощадок, вопросы выбора эффективного режима вибрационных воздействий при уплотнении бетонных смесей и оптимизации их параметров. Детально изучено устройство вибростола, схема установки дебалансов вибратора для получения заданной величины вынуждающей силы, схема вибрационного модуля с направленными колебаниями. Приведены критерии продолжительности уплотнения бетонных смесей, приведена характеристика изменения параметров воздействия при уплотнении бетонной смеси, приведены технические характеристики типоразмерного ряда вибростолов. Значительное внимание в статье уделяется основным параметрам виброформовочных машин: частоте, амплитуде и ускорению рабочего органа. Для оценки эффективности вибрационного воздействия на смесь в процессе формирования изделий чаще всего используют параметр интенсивности.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования была выбрана смесь, которая после уплотнения, схватывания и отвердения превращается в бетон. Были рассмотрены различные способы и параметры уплотнения бетонной смеси для получения высококачественного бетона. Исследовано влияние различных режимов вибраций на процесс уплотнения бетонных смесей, рассмотрены критерии эффективного выбора и оптимизации параметров вибрационного воздействия. В работе приведены основные параметры оценки продолжительности уплотнения бетонных смесей, и описаны изменения параметров при уплотнении бетонной смеси. Также представлены технические характеристики вибростолов разного типоразмерного ряда. Выбор режима виброуплотнения бетонной смеси является сложной задачей, включающей в себя множество значений.

Результаты исследования. После проведения исследования были получены данные о процессе уплотнения бетонной смеси под воздействием вибрационных сил. В результате происходит разрушение ее структурных связей и ослабление связей между элементами, что ведет к появлению переменного напряженно-деформированного состояния. Также было обнаружено, что при таких условиях происходит перемещение минеральных частиц и формирование более плотной упаковки.

Обсуждение и заключение. Полученный результат более плотной упаковки частиц бетонной смеси дает неоспоримое экономическое преимущество в связи с уменьшением расхода вяжущего вещества без потери прочностных характеристик бетона.

Ключевые слова: бетон, железобетон, бетонная смесь, уплотнение, виброуплотнение, виброплощадка, колебания

Для цитирования. Эдильян С.В., Явруян Х.С. Аналитический обзор способов управления параметрами вибрационного уплотнения бетонных смесей. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий.* 2024;3(3):15–21. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-3-15-21>

Analytical Overview of the Methods of Controlling the Parameters of Vibratory Compaction of the Concrete Mixes

Spartak V. Edilyan  , Khungianos S. Yavruyan 

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

 spartak-edilyan@yandex.ru

Abstract

Introduction. A historical (retrospective) overview of the evolution and application of the methods of concrete mixture compaction by vibration, as well as an overview of the breakthrough scientific+ advancements in the studied field have been presented. The use of the dry concrete mixes that reduce cement consumption, accelerate the strength gain of concrete, reduce the shrinkage strain and heat emission and increase the strength and durability of products has been proposed. The theoretical and practical issues of vibratory compaction of the concrete mixes, the research on the effect reached by the various vibration modes of the vibrating tables, the issues of choosing an efficient mode of vibration impact during compacting the concrete mixes and optimisation of their parameters have been studied. The vibrating table design, the installation layout of the vibrator's eccentric weights to obtain a given value of the exciting force and the layout of a vibration module with the directed vibrations have been studied in detail. The criteria of duration of the concrete mixture compaction have been defined, changes of the impact parameters during compacting the concrete mixes have been characterised and technical specifications of the vibrating tables have been defined. In the article considerable attention has been paid to the main parameters of the vibrocompacting machines: frequency, amplitude and acceleration of the working member. Most often, the parameter of intensity is used to assess the efficiency of the vibration impact received by the mixture during the compaction process.

Materials and Methods. A mixture that turns into concrete after compaction, setting and hardening was selected for the research. The various methods and parameters of concrete mixture compaction to obtain the high-quality concrete were studied. The impact of the various vibration modes on the process of compaction of concrete mixes was investigated, the criteria for the efficient selection and optimisation of the vibration impact parameters were revealed. The paper presents the criteria for assessing duration of the concrete mixture compaction and describes the changes in the parameters during compaction of the concrete mixes. The technical specifications of the vibrating tables of different types and sizes were also presented. The choice of the vibration compaction mode for the concrete mixture is a complicated task, which includes many parameters.

Results. Upon the research, the data on the process of concrete mixture compaction under the impact of vibration forces has been obtained. The process results in the destruction of the structural bonds and weakening the bonds between the particles, which leads to the emergence of a variable stress-strain condition. It has also been found that under such settings, the mineral particles get transferred and a denser packing is formed.

Discussion and Conclusion. The resulting denser packing of the concrete mixture particles ensures the undoubted economic advantage due to reduced consumption of a binder without loss of the strength properties of concrete.

Keywords: concrete, reinforced concrete, concrete mixture, compaction, vibratory compaction, vibrating table, vibrations

For Citation. Edilyan SV, Yavruyan KhS. Analytical Overview of the Methods of Controlling the Parameters of Vibratory Compaction of the Concrete Mixes. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2024;3(3):15–21. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-3-15-21>

Введение. Первые сведения о практическом применении вибрирования при уплотнении бетонных смесей относятся к 1890 г. 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, а также проведена сравнительная оценка их свойств, появились новые публикации в различных научно-технических изданиях [1].

Повышение эффективности виброформования бетонных и железобетонных изделий неразрывно связано с выбором рациональных режимов вибрационных воздействий на уплотняемую смесь и оптимальных параметров виброоборудования. В качестве примера Теличенко В.И. и Васильев В.Г. показали схему устройства вибростол (рис. 1). Вибростол представляет собой подвижную рабочую часть, смонтированную на подпружиненных опорах. На подвижной рабочей части установлены два вибратора, создающие направленные колебания, передаваемые форме и вибрируемой массе, размещенным горизонтально на подвижной рабочей части [1].

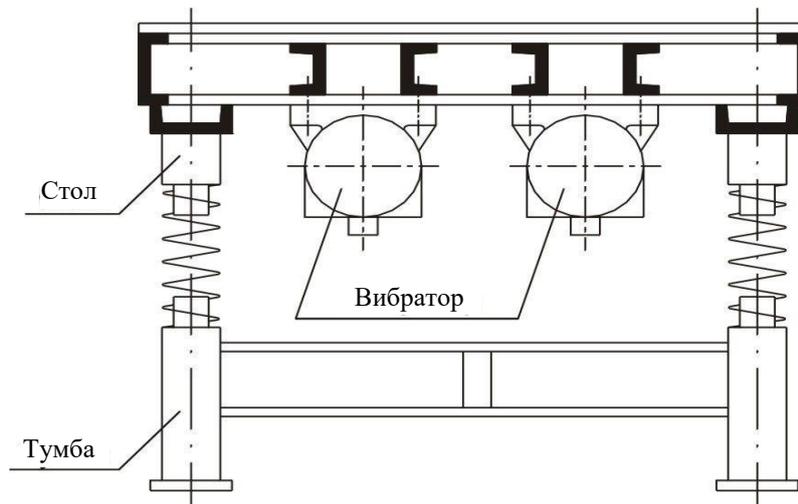


Рис. 1. Схема устройства вибростола [1]

Представлен исторический обзор эволюции и использования методов виброуплотнения бетонных смесей, а также выдающиеся достижения современных исследователей в этой области. Рекомендуется применение жестких бетонных смесей, которые способствуют снижению затрат на цемент, ускоряют набор прочности, уменьшают усадку и тепловыделение, а также увеличивают прочность и долговечность бетонных изделий. Рассмотрены теоретические и практические аспекты вибрационного уплотнения бетона, исследование воздействий различных режимов колебаний вибрационных площадок, вопросы выбора оптимального режима вибрации для уплотнения бетонных смесей и оптимизация их параметров.

Материалы и методы. Работа носит обзорно-проблемный характер и направлена на изучение применения способов виброуплотнения бетонных смесей. Литературный обзор проводился путем обработки, анализа и обобщения данных из открытых первоисточников, представленных на портале научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU, зарубежных публикаций — на платформе поисковой системы Google Scholar.

В качестве предмета исследования была выбрана жесткая бетонная смесь, которая после уплотнения, схватывания и твердения превращается в бетон. Изучались различные методы и характеристики уплотнения бетонной смеси для получения высококачественного бетона. Было проанализировано влияние различных режимов вибраций на процесс уплотнения бетонных смесей, а также рассмотрены критерии эффективного выбора и оптимизации параметров вибрационного воздействия. В работе представлены критерии длительности уплотнения бетонных смесей и описаны изменения параметров воздействия при уплотнения бетонной смеси. Кроме того, предоставлены технические характеристики вибростолов различных типоразмеров.

Выбор режима виброуплотнения бетонной смеси является комплексной задачей, включающей множество факторов. Объединение значений параметров виброуплотнения бетонной смеси сводится в единую картину параметров вибрации, на основе которой определена цель работы.

В работе рассматривается механизм распределения и удаления пор при разных режимах работы вибростола. Рассмотрены теоретические основы ударно-вибрационной технологии уплотнения, разработано и внедрено оборудование для реализации низкочастотных режимов формования железобетонных изделий

Результаты исследования. Жесткие и сверхжесткие бетонные смеси обладают относительно низким водосодержанием, благодаря чему при измерении их консистенции стандартным конусом они не дают осадки. Использование таких смесей сокращает расход цемента в бетоне, ускоряет нарастание прочности, уменьшает усадочные деформации и тепловыделение, повышает прочность и долговечность изделий. Жесткие и сверхжесткие смеси требуют интенсивной обработки вибрационными и виброударными машинами, вследствие чего их применяют исключительно в промышленном производстве сборного железобетона. Жесткие смеси разделяются на умеренно жесткие ($30 \leq Ж \leq 60$ с.), средней жесткости ($60 \leq Ж \leq 150$ с.), повышенной жесткости ($150 \leq Ж \leq 200$ с.) и особо жесткие ($Ж > 200$ с.). Жесткие и особо жесткие (сверхжесткие) бетонные смеси при изготовлении их на обычных вибрационных площадках требуют применения формовочных машин, оснащенных мощными вибрационными возбудителями и пригрузочными устройствами (пригрузами). При этом продолжительность вибрирования сравнительно большая [2].

Основной задачей при станковом формовании железобетонных изделий, особенно из жестких смесей, является выбор эффективных режимов вибрационных воздействий и рациональных параметров виброплощадок, обеспечивающих высокую степень и однородность уплотняемых бетонных смесей [2].

Без тщательного уплотнения бетонных смесей невозможно достичь требуемого качества бетона. Вибрирование не только помогает ускорить процесс укладки бетона в опалубку, но и способствует уплотнению бетона в процессе формирования изделий. При выходе из смесителя бетонная смесь содержит большое количество воздушных пор, что приводит к образованию неустойчивых структур с воздушными полостями. Доля воздуха в бетоне может составлять до 40–50 %, что снижает его прочность. При недостаточном уплотнении прочность бетона уменьшается еще больше, особенно при уменьшении расхода цемента. Недостаточное уплотнение оказывает негативное влияние на многие свойства затвердевшего бетона. Коэффициент уплотнения определяет степень уплотнения бетонной смеси [3].

Проводятся исследования по распространению волнового пакета при ударно-вибрационном воздействии на форму со смесью из бетона. Изучен спектр импульсов, которые распространяются внутри бетонной смеси. В результате проведенных исследований было установлено, что спектр волнового пакета при ударно-вибрационном воздействии на форму с бетонной смесью содержит значительное количество гармоник, амплитуды которых меняются в соответствии с нелинейным законом, зависящим от параметров системы. Один из главных параметров системы — это жесткость упругого элемента между формой с бетонной смесью и рабочим органом формирующей машины [3].

Вибрационные устройства занимают большой кластер в строительной и дорожностроительной индустрии. Усовершенствование всех вибрационных машин начинается, прежде всего, с вибрационного устройства, как основного рабочего органа машины [4].

Для уплотнения крупноразмерных изделий из жестких бетонных смесей были разработаны теоретические основы ударно-вибрационной технологии уплотнения, разработано и внедрено оборудование для реализации низкочастотных режимов формирования железобетонных изделий [5].

Формование железобетонных изделий производят с использованием оборудования, обладающего различным характером уплотняющих воздействий: вибрационным, ударным и ударно-вибрационным. Основными параметрами виброформовочных машин являются частота, амплитуда и ускорение рабочего органа, а также характер колебаний. Для оценки эффективности вибрационного воздействия на смесь в процессе формирования изделий чаще всего используют параметр интенсивности I , определяемый ускорением колебаний виброплощадки:

$$I = A\omega^2,$$

где A — амплитуда колебаний, мм; ω — угловая частота колебаний, рад/с.

Этот параметр рекомендуют использовать для контроля работы и настройки режимов формовочных машин в связи с простотой проведения измерений в заводских условиях [5].

В качестве основного параметра уплотнения авторами используется симметричный и ударно-вибрационный режимы уплотнения (таблица 1).

Таблица 1

Критерии продолжительности уплотнения бетонных смесей

Жесткость бетонной смеси, с	Режим уплотнения		Коэффициент уплотнения
	Симметричный $F = 50$ Гц; $A_g = 3,5$ g	Ударно-вибрационный $f = 10$ Гц; $A_{gb} = 2-2,5$ g; $A_{gn} = 5-7$ g	
20	30	15	0,98
50	150	50	0,98
70	300	120	0,95

Проведенные исследования показывают, что использование различных режимов колебаний, в том числе симметричных и асимметричных, влияет на уплотнение бетонной смеси при ее формировании. По результатам исследований выяснилось, что наиболее эффективными для уплотнения жестких бетонных смесей являются асимметричные ударно-вибрационные режимы. Сравнение удельных мощностей при уплотнении бетонных смесей виброплощадками, работающими в асимметричном и симметричном режимах, показало, что асимметричные режимы примерно в восемь раз превосходят симметричные режимы [5].

Детально представлено теоретическое обоснование эффективности применения ударно-вибрационных воздействий в процессе формирования железобетонных изделий по сравнению с симметричными гармоническими колебаниями. Также были рассмотрены решения дифференциальных уравнений, описывающих распространение продольных колебаний столба из бетонной смеси при воздействии на его нижний торец гармонического или ударного вынуждающих воздействий. Исследования показали, что при воздействии на бетонную смесь гармоническими колебаниями частицы смеси начинают колебаться с частотой вибрационного воздействия. В случае же ударного воздействия смещение частиц бетонной смеси при распространении ударной волны происходит против

направления распространения волны, что приводит к уплотнению материала. В реальных условиях на интенсивность процесса уплотнения бетонных смесей также оказывает влияние форма и спектр импульсов ударно-вибрационных воздействий [6].

Различные исследования позволили прийти к новым пониманиям и методам для улучшения прочности бетонных конструкций. Эксперименты показали, что использование стандартной вибрации при уплотнении бетонной смеси может приводить к нежелательным результатам, таким как повышенная пористость и уменьшение прочности. Основным фактором, который влияет на эти результаты, является частота и амплитуда вибрации. Другие эксперименты показали, что бетонная смесь, уплотнявшаяся низкочастотной асимметричной вибрацией, демонстрировала лучшие характеристики прочности и отсутствие большого количества пор. Низкочастотная асимметричная вибрация имеет своеобразное воздействие на бетонную смесь, позволяя ей более эффективно уплотняться. Снижение частоты вибрации до 600–900 колебаний в минуту в сочетании с амплитудой 4–10 см позволяет более эффективно распределить бетонную смесь и исключить воздушные пузырьки из материала, что повышает его плотность и прочность. Это новое понимание процесса уплотнения бетона открывает новые возможности для улучшения качества строительных материалов. Более тщательное исследование применения низкочастотной асимметричной вибрации может определить оптимальные параметры для каждого конкретного случая, что позволит достичь максимальной прочности и минимального количества пор в бетонной смеси. В конечном итоге, обобщенные результаты исследований открывают новое направление в развитии строительных технологий. Применение низкочастотной асимметричной вибрации в уплотнении бетонной смеси может улучшить качество строительных материалов, повышая их прочность и стойкость к внешним воздействиям. Это важный шаг в совершенствовании технологий строительства и повышении долговечности зданий и сооружений [7].

Приводится пример, что при увеличении массы колебательной системы коэффициент динамичности уменьшается, а ширина резонансной зоны увеличивается. На основе этих результатов были разработаны регрессионные уравнения. Также было установлено, что с ростом жесткости рабочего органа уменьшается коэффициент динамичности, а горизонтальный участок на амплитудно-частотной характеристике, несмотря на существенные изменения ширины, сдвигается к более высоким частотам. При увеличении коэффициента демпфирования наблюдается снижение коэффициента динамичности, когда ширина резонансной зоны и частотный диапазон практически не изменяются. Разработан широкий спектр типоразмерного ряда резонансного вибрационного оборудования, который обосновывается разнообразием номенклатуры и массы сборного железобетона. Были разработаны типоразмеры оборудования легкого (до 2 тонн), среднего (2–6 тонн) и тяжелого (6–10 тонн) типов. На основе анализа и обобщения результатов исследований разработана методика расчета резонансного вибрационного оборудования для уплотнения бетонных смесей, позволяющая повысить его энергоэффективность. Предлагается определить грузоподъемность вибрационного оборудования на основе номенклатуры и массы изделия. Для определения соотношения массы рабочего органа и вибратора рекомендуется учитывать желаемую ширину резонансной зоны и коэффициент динамичности системы. Анализ полученных зависимостей показывает, что за исключением мощности привода вибратора все они пропорциональны грузоподъемности резонансного вибрационного оборудования. Мощность возрастает по параболической зависимости, так как с ростом массы рабочего органа увеличивается коэффициент демпфирования вибратора [8].

Отмечаются различные этапы компактации бетонной смеси: образование пузырьков, их увеличение в размере и финальное удаление из состава бетона. Образование пузырьков может быть, как искусственным при использовании специальных добавок, обладающих способностью удерживать воздух, так и естественным — при наличии растворимого в воде кислорода, аккумулированного в порах и капиллярах. Увеличение размеров пузырьков происходит посредством превышения энергии связи между молекулами воздуха и воды, между молекулами воздуха и цементного раствора, а также под воздействием сил трения. Наконец, удаление пузырьков возможно только в процессе вибрации. Воздушные пузырьки, включенные в состав цементного теста, имеют определенное количество и размер. Их внутреннее давление поддерживается силами поверхностного натяжения и вязкого трения. Однако во время вибрации вязкость теста снижается, что приводит к возрастанию внутреннего давления, превышая силы поверхностного натяжения и вязкого трения. В результате чего маленькие пузырьки начинают перемещаться и соединяться, образуя более крупные. Увеличение размера пузырьков повышает их энергетический потенциал, а также способствует их скоплению вокруг добавки. Вибрацией пузырьки отстраняются от бетонной смеси, омывая ее по контуру формы и двигаясь вдоль бортов. При заданных параметрах колебаний существует временной интервал, в течение которого происходит активная, динамическая вязкость цементного теста. Именно в этот промежуток времени выходит воздух из смеси, а затем застаивается в ней. Данный интервал между началом колебаний, при котором достигается текучее состояние смеси, и моментом потери этого состояния может быть продлен. Следовательно, возможно повышение плотности путем изменения параметров колебаний: частоты, амплитуды и их производных [9, 10].

Bazhenov YuM, Gusev BV, Deminov AD, Zazimko VG, Zayats YuL, Kryukov BI, et al. *Method of Compaction of Rigid Concrete Mixture*. Author's Certificate SU 637253 A1. 1978. (In Russ.)

8. Зедгенизов В.Г., Файзов С.Х. Типоразмерный ряд резонансного вибрационного оборудования для уплотнения бетонных смесей и методика расчета его основных параметров. *Научный рецензируемый журнал «Вестник СибАДИ»*. 2023;20(5):540–547. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-540-547>

Zedgenizov VG, Faizov SKh. Type Series of Resonant Vibration Equipment for Concrete Mixtures Compaction and Its Main Parameters Calculation Method. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023;20(5):540–547. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-540-547>

9. Косяков Д.Н. Поличастотное вибрирование — простой способ улучшения качества уплотнения бетонной смеси. *ЖБИ и конструкции*. 2011;4:24–27.

Kosyakov DN. Multiple-Frequency Vibration — A Simple Method for Improving the Quality of Concrete Mix Compaction. *ZHBI i konstruksii (Reinforced Concrete Products and Structures)*. 2011;4:24–27. (In Russ.)

10. Ren B, Wang H, Wang D, Guan T, Zheng X. Vision Method Based on Deep Learning for Detecting Concrete Vibration Quality. *Case Studies in Construction Materials*. 2023;18: e02132. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02132>

Об авторах:

Спартак Варданович Эдилян, аспирант кафедры технологического инжиниринга и экспертизы в строительной промышленности Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](https://orcid.org/0009-0001-9010-1000), spartak-edilyan@yandex.ru

Хунгианос Степанович Явруян, кандидат технических наук, доцент кафедры технологического инжиниринга и экспертизы в строительной промышленности Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](https://orcid.org/0009-0001-9010-1000), khungianos@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

С.В. Эдилян: формирование цели и задачи исследования, анализ результатов исследования, формирование выводов.

Х.С. Явруян: научное руководство, формирование основной концепции, доработка текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Spartak V. Edilyan, PhD Student of the Technological Engineering and Expertise in the Construction Industry Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ORCID](https://orcid.org/0009-0001-9010-1000), spartak-edilyan@yandex.ru

Khungianos S. Yavruyan, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor of the Technological Engineering and Expertise in the Construction Industry Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ORCID](https://orcid.org/0009-0001-9010-1000), khungianos@mail.ru

Claimed Contributorship:

Edilyan SV: formulating the aim and objectives of the research, analysis of the research results, formulating the conclusions.

Yavruyan KhS: scientific supervision, formulating the main concept, refining the text, correcting the conclusions.

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 07.07.2024

Поступила после рецензирования / Reviewed 02.08.2024

Принята к публикации / Accepted 10.08.2024