

Транспортные сооружения / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2026, Том 13, № 1 / 2026, Vol. 13, Iss. 1 <https://t-s.today/issue-1-2026.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/29SATS126.pdf>

DOI: 10.15862/29SATS126 (<https://doi.org/10.15862/29SATS126>)

2.1.5. Строительные материалы и изделия (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Емельянов, Р. Т. Виброуплотнение тонких слоистых строительных элементов / Р. Т. Емельянов, Е. С. Турьшева, А. Е. Потапов, Д. С. Шулюшенков, Н. А. Челночков // Транспортные сооружения. — 2026. — Т. 13. — № 1. — URL: <https://t-s.today/PDF/29SATS126.pdf>. DOI: 10.15862/29SATS126.

For citation:

Emelyanov R.T., Turyшева E.S., Potapov A.E., Shulyushenkov D.S., Chelnochkov N.A. Vibration compaction of thin layered building elements. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2026;13(1): 29SATS126. Available at: <https://t-s.today/PDF/29SATS126.pdf>. DOI: 10.15862/29SATS126. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 691.001

Емельянов Рюрик Тимофеевич

ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия
Профессор
Доктор технических наук, профессор
E-mail: Ert-44@Yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5453-4882>

Турьшева Евгения Сергеевна

ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия
Доцент
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: E.Trisheva@Mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7252-4004>

Потапов Алексей Евгеньевич

ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия
E-mail: dumaiobomne7@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8577-8437>

Шулюшенков Данила Сергеевич

ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия
Аспирант
E-mail: danka.shul@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0867-2051>

Челночков Никита Алексеевич

ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия
E-mail: nikita.chelnochkov@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4158-2541>

Виброуплотнение тонких слоистых строительных элементов

Аннотация. Авторами статьи рассмотрена динамика виброуплотнения тонких слоистых строительных элементов при 3D-печати. Разработана виброэкструзионная модель 3D-принтера с электромеханическим приводом вибратора. Дано описание процессов воздухоотведения из формируемой смеси при виброуплотнении и условия формирования бетонного бруса. В

процессе испытаний проводились инструментальные измерения параметров технологического процесса. Приведены результаты экспериментальных исследований, полученные с акселерометра, которые характеризуют основные рабочие параметры экспериментального стенда. Под воздействием вибрации резко снижается трение между смесью и стенками сопла, смесь временно разжижается (проявляется тиксотропия), что позволяет ей плавнее укладываться и лучше сцепляться с предыдущим слоем, частично удаляются вовлеченные пузырьки воздуха. Под воздействием вибрации характер колебаний синусоидальный, сложного вида. Более интенсивный процесс уплотнения при напряжении вибратора 40 В. Установлены закономерности изменения свойств бетонной смеси при различных режимах виброуплотнений. Конечным результатом станет опытный образец системы подачи смесей с адаптивным управлением и методические рекомендации по составу строительных смесей для строительной 3D-печати.

Ключевые слова: 3D-печать; строительные изделия; экструзия; формование

Введение

Технология аддитивного производства (3D-печати) стремительно проникает в строительную отрасль, обещая коренные перемены в подходах к проектированию и возведению зданий. Главным преимуществом 3D-печати является возможность автоматизированного послойного нанесения строительных материалов, что позволяет существенно сократить сроки строительства, снизить затраты на рабочую силу и материалы, а также повысить качество и точность изготовления конструкции. Однако широкое внедрение технологии ограничено рядом ключевых проблем, связанных с пониманием влияния технологических характеристик строительных смесей на качество и долговечность 3D-печатных конструкций. На сегодняшний день опубликовано множество исследований, посвящённых технологиям 3D-печати в строительстве, большинство из них сосредоточены на описании методов и технологий печати, особенностях работы принтеров и управлении процессом. Остались острые вопросы, связанные с влиянием состава бетонной смеси на процесс твердения тонких слоев изделий [1].

3D-печать идет послойно, экструдированная нить бетона должна моментально держать форму и нести нагрузку следующих слоев. Слои должны надежно соединяться друг с другом иначе конструкция может оказаться рыхлой и непрочной. [2; 3]. Для этого требуется уплотнение смеси при выходе из сопла или непосредственно перед выходом смеси. Одним из методов уплотнения является виброуплотнение. Под воздействием вибрации резко снижается трение между смесью и стенками сопла, смесь временно разжижается (проявляется тиксотропия), что позволяет ей плавнее укладываться и лучше сцепляться с предыдущим слоем, частично удаляются вовлеченные пузырьки воздуха. Воздушные пузыри всплывают и выходят на поверхность, а избыток воды — удаляется из структуры. Сильная вибрация может вызвать расслоение компонентов и ведет к растеканию печатаемых элементов. Причины расслоения бетонной смеси под воздействием вибрационной среды, создаваемой вибровозбудителем, рассмотрены в работе [4]. При больших амплитудах вибрации возникают большие относительные перемещения частиц и интенсивнее преодолеваются силы трения благодаря большому тиксотропному разжижению цементного теста. Уплотнение функционально зависит от ускорения, создаваемого вынуждающей силой вибровозбудителя в соответствии с заданным законом колебаний стенки бункера.

Исследования в работе [5] рассматривают контроль качества печати в зависимости от точности геометрии изделия. Показано, что прочность печатных бетонных элементов зависит от свойств материала, от стратегии армирования, а также от особенности процесса печати.

В работе [6] для решения проблемы низкой прочности межслойного соединения при 3D-печати бетоном методом экструзии предлагается система синхронного нанесения бетона и

связующего вещества. В предлагаемой системе печатный бетон и связующее вещество наносятся одновременно с помощью вращающегося сопла с двумя выходами. Результаты показывают, что при использовании цементного раствора с соотношением воды и цемента 0,26 в качестве связующего вещества относительная прочность соединения может достигать 267 % при использовании предложенной системы.

Современное исследование материалов, включая геополимерные смеси, модифицированные бетоны и композиты, показывает важность управления реологией, свойствами отверждения и экологическими аспектами. Многие работы направлены на повышение устойчивости, эффективности использования ресурсов и уменьшения отходов. Несмотря на очевидные перспективы, встает ряд научно-технических проблем, связанных с обеспечением требуемых характеристик печатных конструкций. Наиболее критичными является обеспечение равномерного формирования слоев без деформаций и дефектов, достижение межслойного сцепления, устойчивости к усадочным трещинам и внешним воздействиям [7; 8].

В работах [9–12] демонстрируется важность правильного подбора рецептур и характеристик материалов для успешной 3D-печати. Ключевую роль в обеспечении прочности и долговечности конструкций играет вязкость и адгезия материала. Показана необходимость дифференцированного подхода к назначению средств механического воздействия на смесь вибрации для тиксотропного псевдоразжижения и снижения вязкости цементного теста, а также для снижения внутреннего трения заполнителя и возможности перераспределения частиц в горизонтальной плоскости с выдавливанием воздушных включений. Определены две стадии уплотнения смеси, одна происходила в бункере-укладчике, а вторая в форме. Вибрация в бункере интенсивно снижает вязкость цементного раствора, что способствует уже на первой стадии уплотнения продвижению потока смеси в сужающуюся часть бункера. При прохождении смеси в вибробункере ускоряется фильтрация раствора и увеличивается внутреннее трение заполнителя. Подчеркивается, что успешная 3D-печать зависит от правильных настроек процесса, таких как пропорции смеси, параметры печати и конструкция машин. Оптимальная текучесть и стабильность материала необходимы для качественного изготовления слоев [13–15]. Проведенные исследования литературных источников процессов 3D-печати показали недостаточную изученность вопроса виброуплотнения тонких строительных элементов и требуют дальнейшей проработки.

Материалы и методы

Для исследования процесса виброуплотнения тонких слоистых строительных элементов разработана виброэкструзионная модель 3D-принтера с электромеханическим приводом вибратора (рис. 1).



Рисунок 1. Виброэкструзионная модель 3D-принтера (Разработал автор Шулюшенков Д.С.)

Исследуемая система представляет собой раму, на которой размещены экструдер; стальной трапециевидный бункер; мотор, приводящий в движение подвижные органы оборудования, датчики положения, перемещения, температуры и давления; передвижное устройство и сама система управления 3D принтером. Наиболее важными элементами принтера являются экструдер и бункер. Экструдер 3D принтера — это узел, который обеспечивает подачу рабочей смеси из бункера в рабочую зону аппарата. Машина такого рода перемещает экструдер по картезианские координатам осей X, Y и Z. Для этого конструкцию машины оснащают высокоточными электрическими приводами, которые быстро двигают печатающую головку согласно программе. Управление подобными устройствами осуществляют при помощи контроллера. Благодаря этому, во всех автоматизированных системах обеспечивается перемещение экструдера, а конструкции наращиваются слой за слоем. Ограничения движений обеспечены оптическим, либо механическим фиксаторами. Это так называемые ограничительные датчики, которые по достижению им края рабочей поверхности подают сигнал, тем самым предотвращая выход за пределы, предусмотренные проектом. Создается диапазон движения приводов. При помощи этих приспособлений осуществляется настройка положения принтера и его рабочих органов непосредственно перед процессом печати, таким способом достигается точность и аккуратность. Бетонная смесь подается из приемного бункера 1 в специальную форму 2, где уплотняется вибратором 3 под действием сил вибрации. В результате послойного нанесения смеси изделие приобретает форму бруса 4.

В процессе испытаний проводились инструментальные измерения. Частота и амплитуда колебаний стенок бункера измерялась акселерометром Analog Devices с USB. Датчики измерения колебательного процесса устанавливали на торцевой стороне стенки бункера. При полностью загруженном бетоном вибробункере замерялись частота и амплитуда колебаний смеси и стенок бункера на различных частотах работы вибратора марки «ИВ-92»: 20; 40,5; 100 Гц. Возбуждающее усилие от двух дебалансов составило: максимальное — 8 кН; минимальное — 2,4 кН. Для исследования были выбраны наиболее характерные точки на стенках бункера. Испытания проводились при двух состояниях бункера: загруженном и пустом.

Таблица 1

Расход компонентов бетонной смеси и характеристики виброуплотнения

Компонент	Назначение	Примерное содержание, масс %
Основные компоненты		
Портландцемент (ЦЕМ I)	Вяжущее для сцепление заполнителя.	15–25 %
Мелкий заполнитель (песок)	Является основным структурообразующим компонентом, воспринимает нагрузки на сжатие.	40–60 %
Вода	Для гидратации цемента.	28–40 %
Добавки		
Минеральные добавки (микрокремнезём, зола-уноса, метакаолин)	Улучшают реологию, повышают плотность и прочность, снижают усадку	5–15 % (к массе цемента)
Химические добавки	1. Суперпластификаторы: для перекачиваемости. 2. Модификаторы вязкости (VMA): для формоустойчивости (предотвращают «оплывание»). 3. Ускорители/замедлители: для контроля времени схватывания.	1–5 % (к массе цемента)
Фибра (базальтовая, стеклянная или полипропиленовая)	Для снижения трещинообразования и повышения прочности на изгиб и растяжение	0,2–1 % (к массе цемента)

Разработано авторами

Условиями формования бетонного бруса являются:

- бетонная смесь должна быть жесткой и быстротвердеющей;
- частота и амплитуда вибрации подбираются под конкретную реологию бетонной смеси;

- длительность вибрации должна быть достаточной для уплотнения;
- выполняется автоматизированный контроль качества продукции.

Расход компонентов смеси и результаты испытаний образцов сведены в таблице 1.

Результаты

Косвенным показателем степени вибрационного уплотнения тонких слоистых бетонных изделий является амплитуда колебаний системы 3D-печати и ее вторая производная — ускорение. Амплитуда колебаний системы описываются уравнениями /53/:

$$\begin{aligned}x &= x_a \cos(\omega t - \phi_x) \\y &= y_a \sin(\omega t - \phi_x),\end{aligned}\quad (1)$$

где:

x_a и y_a — амплитудные значения перемещений;

ϕ — угол сдвига фаз между вынужденными колебаниями и вынуждающей силой вибровозбудителя.

Ускорения при виброуплотнении описываются системой линейных неоднородных уравнений с постоянными коэффициентами:

$$\ddot{x} = \frac{m_g R^2 \cos \omega t - b_2 \dot{x} - c_2 x}{m_0 + \rho v}, \quad (2)$$

$$\ddot{y} = \frac{m_g R^2 \sin \omega t - (m_0 + \rho v)g - c_2 y}{m_0 + \rho v}, \quad (3)$$

где:

m_0 — масса колебательной системы;

ρ — плотность строительной смеси;

x, \dot{x}, \ddot{x} — перемещение, скорость и ускорение системы соответственно;

b_2 — вязкость строительной смеси;

c_2 — жесткость бункера;

c_1 — жесткость амортизатора;

g — ускорение свободного падения;

m_0 — масса дебаланса вибратора;

R — радиус эксцентриситета;

ω — частота вращения дебаланса;

t — время работы.

Частота вращения дебаланса описывается уравнением в зависимости от конструктивных параметров вибровозбудителя

$$\omega = \sqrt{ql / (m_p R_p)}, \quad (4)$$

где:

m_p — масса вала дебаланса;

R_p — радиус дебаланса;

q — линейное давление;

l — длина вала.

Под действием колебательных нагрузок вибровозбудителя наблюдается разжижение смеси. В результате из смеси удаляется растворенный в ней воздух. Механизм воздухоотделения можно описать уравнением [9]:

$$\rho_n v_n \frac{dU_n}{dx} = \rho_c v_n g - \mu K U_n, \quad (5)$$

где:

$\rho_n v_n$ — плотность и объем «пузырей воздуха» соответственно;

ρ_c — плотность смеси в момент времени t ;

U_n — скорость «пузырей воздуха» при движении в вирированной смеси;

μ — коэффициент трения.

При этом коэффициент трения и вязкость строительной смеси уменьшаются.

В результате скорость движения смеси увеличивается и описывается уравнением [4]:

$$U_c = \left(1 - \mu \frac{L_y - x}{L_y} \right) U_t + U_0(y), \quad (6)$$

где:

$L_y = \lambda_0 - (H - y) \operatorname{tg} \alpha$ — ширина бункера в сечении;

$U_0(y)$ — изменение скорости движения смеси под действием силы тяжести;

μ — коэффициент трения.

Результаты математических вычислений показали, что амплитуда колебаний стенок бункера в зависимости от вынуждающей силы вибровозбудителя изменяется линейно и аппроксимируется зависимостью

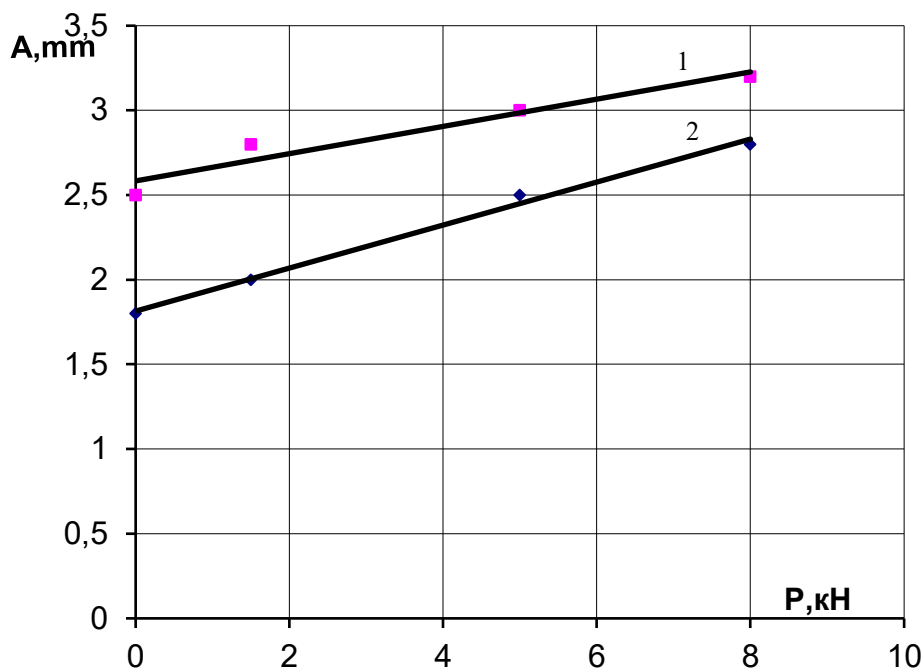
$$A = 0,13P + 1,81,$$

где:

P — вынуждающая сила вибратора.

Зависимость амплитуды колебаний стенок бункера от вынуждающей силы вибратора приведена на рисунке 3.

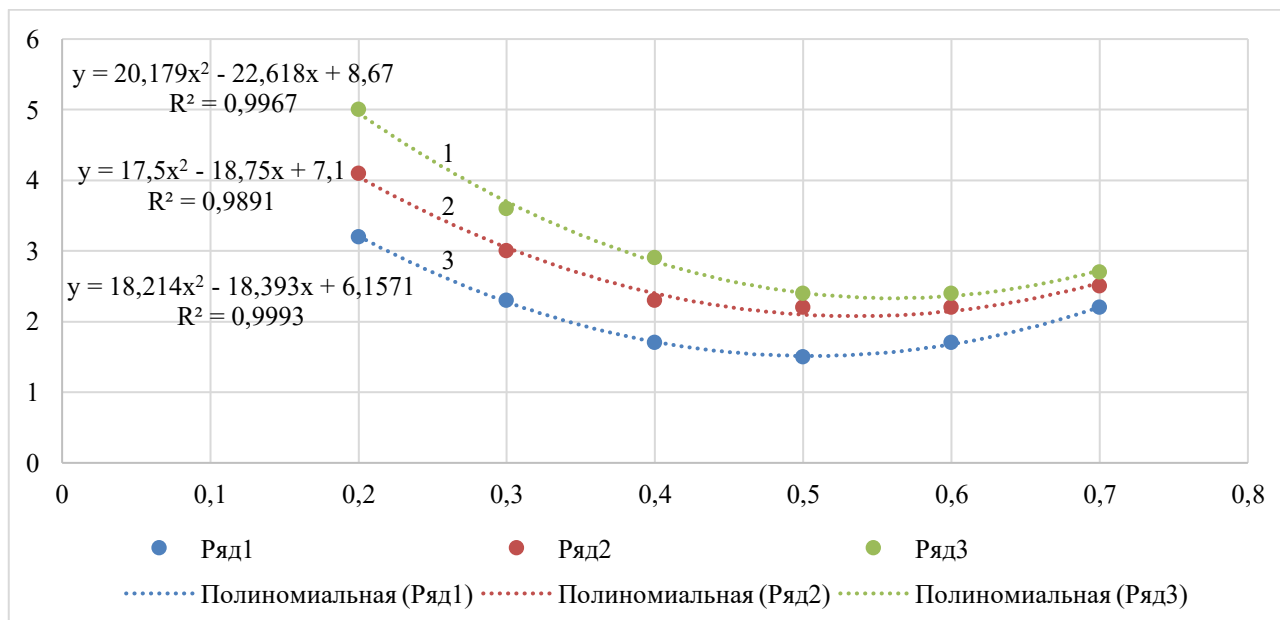
С увеличением вынуждающей силы вибровозбудителя амплитуда колебаний бункера возрастает линейно. При незагруженном бункере амплитуда колебаний изменяется от 1,8 до 2,8 мм. Величина амплитуды колебаний в вертикальной и горизонтальной плоскостях существенных отличий не имеет. Ускорения элементов системы колеблются от 0,2 до 3,0 м·с⁻². Ускорения, возникающие в вертикальной и горизонтальных плоскостях, больших отличий не имеют. Если увеличить плотность смеси от 1 000 до 1 800 кг·м³ амплитуда колебаний и ускорение элементов системы уменьшается. При текучести смеси 200 Па·с значения амплитуды колебаний и ускорений бункера небольшие.



1 — при незагруженном смесью бункере; 2 — при загруженном бункере смесью

Рисунок 3. Зависимость амплитуды колебаний стенок бункера от вынуждающей силы вибратора (разработано авторами)

Влияние амплитуды колебаний и удобоукладываемости бетонной смеси на объем заземленного воздуха приведено на рисунке 4.



1 — Жесткость 20 с; 2 — Жесткость 10 с; 3 — Осадок конуса 3–4 см

Рисунок 4. Влияние амплитуды колебаний и удобоукладываемости бетонной смеси (НК = 20 мм) на объем заземленного воздуха (разработано авторами)

Характер зависимости амплитуды колебаний бетонной смеси (НК = 20 мм) на объем заземленного воздуха имеет полиномиальный вид. Оптимальная амплитуда колебаний смеси 0,5 мм.

Результаты исследований виброускорений строительного 3D-принтера на режимах 40, 120, 200 представлены в виде графиков на рисунке 5. Виброуплотнение бетонной смеси происходило при различных оборотах вибратора, которые регулировались входным напряжением, изменяемым от 200 до 40 вольт.

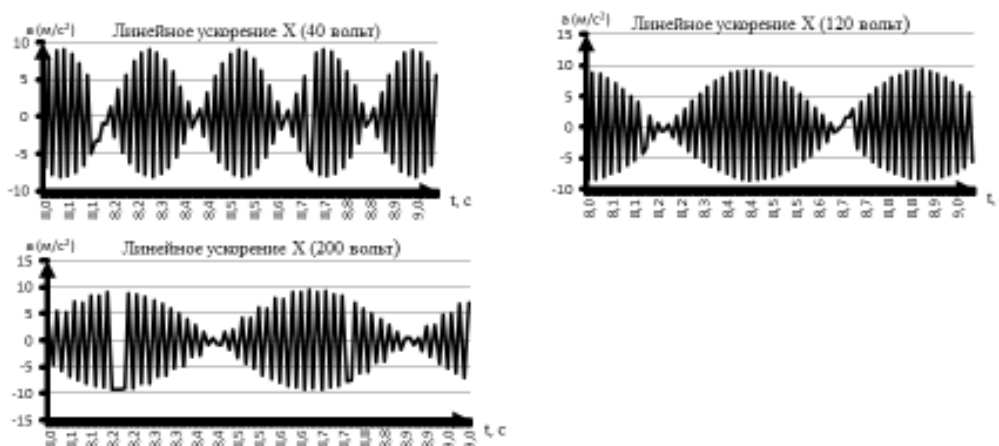


Рисунок 5. Графики виброускорений строительного 3D-принтера на режимах 40, 120, 200 в (разработано авторами)

По полученным осциллограммам, делаем вывод, что характер колебаний синусоидальный, сложного вида. Более интенсивный процесс уплотнения при напряжении вибратора 40 В. Колебания при этом режиме устойчивые. Максимальная частота колебаний достигала на всех графиках значения $9,8 м/с^2$, амплитуда с таким параметром не вызывает деформаций и разрушения формируемого изделия. Время переходного процесса равно $0,2-0,4 с$. (рис. 6). Это доказывает применимость виброускорений при 40 вольтах вибратора. При частоте колебаний 50 Гц образец получился более уплотненный, а соответственно набрал большую прочность по сравнению с другими составами. При загрузке бункера смесью, находящегося в режиме зарезонансной работы, происходит снижение амплитуды виброперемещений из-за увеличения колеблющейся массы вибратора строительного 3D-принтера. Использование вибратора с промышленной частотой 50 Гц позволяет получить амплитуду колебаний стенок бункера до 3,2 мм. Этого достаточно, чтобы передать вибрацию на шихту бетонной смеси.

Образцы строительного изделия размером $10*10*10$ см уплотненные при различной частоте испытывались на прочность при сжатии на гидравлическом прессе. Результаты испытаний строительного бруса приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты испытаний опытных образцов

Частота уплотнения, Гц	50	33	52
Напряжение вибратора, вольт	40	120	200
Время уплотнения, с	20	20	10
Плотность образцов, $г/см^3$	1,46	1,38	1,41
Отклонения геометрии, мм	менее 2		
Предел прочности при сжатии, $R_{сж}$, Мпа 7 сут / 28 сут.	4,12/6,67	3,6/6,1	3,6/6,49

Разработано авторами

Заключение

Исследования подтверждают, что технологически грамотный подбор материалов, адекватная настройка процесса печати и внедрение экологически устойчивых решений являются ключевыми факторами успеха в применении 3D-печати в строительстве.

Установлены закономерности изменения свойств бетонной смеси при различных режимах виброуплотнений. Анализ зависимостей колебательного процесса оборудования показал, что виброускорения и амплитуда колебаний бункера уменьшаются с увеличением плотности шихты и жесткости амортизатора. С увеличением времени вибрирования ускорения увеличиваются незначительно, не превышая нормативных санитарно-гигиенических значений. Уменьшение частоты виброускорений ухудшает удобоукладываемость бетонной смеси. Определен оптимальный расход компонентов на 1 м³, марки D1400 а также параметры процесса формирования бетонной смеси в условиях вибрационного воздействия оборудования на уплотняемую смесь.

Дальнейшие исследования должны сосредоточиться на совершенствовании рецептур, улучшении технологий и повышении экологической устойчивости.

ЛИТЕРАТУРА

1. 3D-печать в строительстве / Н.И. Ватин, Л.И. Чумадова, И.С. Гончаров [и др.] // Строительство уникальных зданий и сооружений. — 2017. — № 1(52). — С. 27–46. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29117639>. — DOI: [10.18720/CUBS.52.3](https://doi.org/10.18720/CUBS.52.3). — EDN: [YNESHX](https://www.edn.ru/YNESHX). (дата обращения: 22.03.2026).
2. Иноземцев А.С. Анализ существующих технологических решений 3D-печати в строительстве / А.С. Иноземцев, Е.В. Королев, Т.К. Зыонг // Вестник МГСУ. — 2018. — Т. 13, № 7(118). — С. 863–876. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35350633>. — DOI: [10.22227/1997-0935.2018.7.863-876](https://doi.org/10.22227/1997-0935.2018.7.863-876). (дата обращения: 22.03.2026).
3. Славчева Г.С. Строительная 3D-печать сегодня: потенциал, проблемы и перспективы практической реализации / Г.С. Славчева // Строительные материалы. — 2021. — № 5. — С. 28–36. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46146299>. — DOI: [10.31659/0585-430X-2021-791-5-28-36](https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-791-5-28-36). — EDN: [WACJMY](https://www.edn.ru/WACJMY). (дата обращения: 22.03.2026).
4. Емельянов Р.Т. Динамика виброуплотнения арболитовых изделий / Р.Т. Емельянов, Г.П. Баранова, Е.С. Турышева, И.А. Фролов // Вестник евразийской науки. — 2021. — Т. 13, № 5. — URL: <https://esj.today/PDF/21SAVN521.pdf>. — EDN: [LRJDX](https://www.edn.ru/LRJDX). (дата обращения: 22.03.2026).
5. Мухаметрахимов Р.Х. Технология и контроль качества строительной 3D-печати / Р.Х. Мухаметрахимов, Л.В. Зиганшина // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. — 2022. — № 1(59). — С. 64–79. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48233311>. — DOI: [10.52409/20731523_2022_1_64](https://doi.org/10.52409/20731523_2022_1_64). — EDN: [BZJGUO](https://www.edn.ru/BZJGUO). (дата обращения: 22.03.2026).
6. Зоткин А.Г. Процессы удаления воздуха при виброуплотнении бетонных смесей / А.Г. Зоткин // Технологии бетонов. Сухие строительные смеси. — 2015. — № 7-8. — С. 50–53. — URL: <https://rucont.ru/efd/396103>. — EDN: [UNWBYT](https://www.edn.ru/UNWBYT). (дата обращения: 22.03.2026).
7. Marczyk J. Properties of 3D printed concrete–geopolymer hybrids reinforced with aramid roving / J. Marczyk [et al.] // Materials. — 2022. — Т. 15, № 17. — С. 6132. — URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9458172/>. — DOI: [10.3390/ma15176132](https://doi.org/10.3390/ma15176132). (дата обращения: 22.03.2026).

8. A review of 3D printing of geopolymer composites for structural and functional applications / F.A. Shilar, S.V. Ganachari, V.B. Patil [et al.] // Construction and Building Materials. — 2023. — Т. 400. — Article 132869. — URL: https://www.researchgate.net/publication/373071936_A_review_of_3D_printing_of_geopolymer_composites_for_structural_and_functional_applications. — DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2023.132869](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132869). (дата обращения: 22.03.2026).
9. Anton A. A 3D concrete printing pre-fabrication platform for bespoke columns / A. Anton, L. Reiter, T. Wangler [et al.] // Automation in Construction. — 2020. — Т. 122. — С. 103467. — DOI: [10.1016/j.autcon.2020.103467](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103467). (дата обращения: 22.03.2026).
10. Synchronized concrete and bonding agent deposition system for interlayer bond strength enhancement in 3D concrete printing / Y. Weng, M. Li, T.N. Wong, M.J. Tan // Automation in Construction. — 2021. — Т. 123. — С. 103546. — DOI: [10.1016/j.autcon.2020.103546](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103546). (дата обращения: 22.03.2026).
11. Reiter L. Setting on demand for digital concrete. Principles, measurements, chemistry, validation / L. Reiter, T. Wangler, A. Anton, R.J. Flatt // Cement and Concrete Research. — 2020. — Т. 132. — С. 106047. — DOI: [10.1016/j.cemconres.2020.106047](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106047). (дата обращения: 22.03.2026).
12. Craveiro F. An automated system for 3D printing functionally graded concrete-based materials / F. Craveiro, S. Nazarian, H. Bartolo [et al.] // Additive Manufacturing. — 2020. — Т. 33. — С. 101146. — DOI: [10.1016/j.addma.2020.101146](https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101146). (дата обращения: 22.03.2026).
13. Tabassum T. A review of 3d printing technology-the future of sustainable construction / T. Tabassum, A.A. Mir // Materials Today: Proceedings. — 2023. — Т. 93. — С. 408–414. — DOI: [10.1016/J.MATPR.2023.08.013](https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2023.08.013). (дата обращения: 22.03.2026).
14. Le T.T. Hardened properties of high-performance printing concrete / T.T. Le, S.A. Austin, S. Lim [et al.] // Cement and Concrete Research. — 2012. — Т. 42, № 3. — С. 558–566. — DOI: [10.1016/j.cemconres.2011.12.003](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.12.003). (дата обращения: 22.03.2026).
15. Bos F. Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing / F. Bos [et al.] // Virtual and Physical Prototyping. — 2016. — Т. 11, № 3. — С. 209–225. — DOI: [10.1080/17452759.2016.1209867](https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1209867). (дата обращения: 22.03.2026).

Emelyanov Ryurik Timofeevich

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
E-mail: Ert-44@Yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5453-4882>

Turysheva Evgeniya Sergeevna

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
E-mail: E.Trisheva@Mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7252-4004>

Potapov Alexey Evgenievich

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
E-mail: dumaiobomne7@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8577-8437>

Shulyushenkov Danila Sergeevich

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
E-mail: danka.shul@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0867-2051>

Chelnochkov Nikita Alekseevich

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
E-mail: nikita.chelnochkov@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4158-2541>

Vibration compaction of thin layered building elements

Abstract. The authors of the article consider the dynamics of vibration compaction of thin layered building elements in 3D printing. A vibration extrusion model of a 3D printer with an electromechanical vibrator drive has been developed. The description of the processes of air removal from the formed mixture during vibration compaction and the conditions of forming a concrete beam is given. During the tests, instrumental measurements of the process parameters were carried out. The results of experimental studies obtained from the accelerometer, which characterize the main operating parameters of the experimental stand, are presented. Under the influence of vibration, the friction between the mixture and the nozzle walls sharply decreases, the mixture temporarily liquefies (thixotropy appears), which allows it to stack more smoothly and adhere better to the previous layer, partially removing the entrained air bubbles. Under the influence of vibration, the oscillation pattern is sinusoidal, of a complex type. A more intensive sealing process at a vibrator voltage of 40 V. The patterns of changes in the properties of the concrete mixture under various modes of vibration damping have been established. The end result will be a prototype of an adaptive control mixture feeding system and guidelines on the composition of building mixes for 3D construction printing.

Keywords: 3D printing; building products; extrusion; molding