

# Метод оценки растекаемости свежего бетона

Р Т Емельянов<sup>1</sup>, Е С Турышева<sup>1</sup>, А А Якшина<sup>1,2</sup>, В В Макеич и М Л Берсенева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, 82, Красноярск, 660041, Россия

<sup>2</sup>E-mail: AYakshina@sfu-kras.ru

**Аннотация.** Приведены результаты исследований растекаемости свежего бетона при 3D-печати строительных изделий. 3D принтер представляет собой автоматизированное устройство для строительства зданий и сооружений, изготовления отдельных конструкций и изделий методом трехмерной печати из мелкозернистого фибробетона со специальными добавками, пескобетона, геопалимерного бетона и др. Рассмотрены методы оценки консистенции бетона, протекающие во время укладки. Применяемые методы оценки растекаемости свежего бетона учитывают только собственную массу бетона и не отражают динамические процессы. Применение ультразвукового метода позволяет осуществлять массовые испытания изделий любой формы многократно, вести непрерывный контроль нарастания или снижения прочности. Недостатком метода является погрешность при переходе от акустических характеристик к прочностным. Сделана оценка растекаемости бетонной смеси в зависимости от амплитудно-частотных характеристик. Приведены зависимости амплитуды колебаний и ускорений бункера бетоноукладчика от плотности бетонной смеси. Выполнена частная оптимизация виброускорений по амплитуде колебаний стенок бункера, амплитуде колебаний слоев шихты и жесткости виброгасителей.

## 1. Введение

В настоящее время наблюдается большой интерес с применением аддитивных технологий (трехмерной печати) в различных сферах производства. Благодаря возможности применения 3D принтера при проектировании и изготовлении объектов различных геометрических форм и размеров, изготовления прототипов изделий, позволяющих оценить безопасность сборки и функциональность, данная технология успешно используется в современной строительной отрасли в наиболее развитых странах мира.

3D принтер является автоматизированным устройством, благодаря которому при изготовлении отдельных конструкций и изделий, строительстве зданий, сооружений методом трехмерной печати возможно снижение воздействия человеческого фактора и процент производственного брака, что в итоге позволяет уменьшить финансовые затраты на производство и сократить сроки строительных работ, что необходимо для экономической эффективности возведения строительных объектов.

Одной из основных проблем активного внедрения трехмерной печати в строительную отрасль России является подбор специальных добавок для бетонных смесей, позволяющих получить необходимую консистенцию, степень растекаемости, уровень прочности, время застывания и способность удерживать форму, которые будут соответствовать требованиям материала,

соответствующего требованиям, необходимым для данной технологии. В связи с этими требованиями, разработка состава и совершенствование технологии производства бетонных смесей для 3D технологии является основной задачей применения трехмерной печати в строительной отрасли России.

На процесс изготовления путем трехмерной печати оказывают влияние большое количество факторов, некоторые из которых возникают непосредственно во время работы. На текущий момент существуют несколько различных методов для измерения и количественной оценки качества объектов 3D печати. Неразрушающий контроль качества особенно актуален при изготовлении и эксплуатации строительных объектов и их частей, при этом методы неразрушающего контроля являются косвенными, у каждого из них имеются ограничения в применении вследствие своих недостатков и преимуществ. Исследования по данному вопросу проводились разными авторами, в работах которых некоторые методы контроля качества изготавливаемых изделий были предложены для применения в строительной сфере в целом [1,2,3,4] и для изготовления бетонных конструкций в частности [5,6,7,8].

Существующие методы оценки консистенции бетона, протекающие во время укладки, учитывают только собственную массу бетона, не отражая динамических процессов. Одним из наиболее распространенных неразрушающих способов контроля качества свежего бетона является ультразвуковой метод, основанный на связи между скоростью прохождения ультразвуковых волн в бетоне и его плотностью, динамическим модулем упругости и прочностью. В зависимости от расположения датчиков во время испытаний выделяют сквозное и поверхностное ультразвуковое прозвучивание. Данный метод позволяет получать данные по прочности в приповерхностных и глубоких слоях бетона, применим при массовых испытаниях объектов любой формы и непрерывном контроле нарастания или снижения прочности. Погрешность при переходе от акустических характеристик к прочностным является недостатком ультразвукового метода.

При вибрационном методе формования изделий проверку "консистенции" проводят косвенным путем по амплитудно-частотным характеристикам так как свежий бетон при транспортировке находится в пластическом состоянии, при смешивании и уплотнении - в жидком, а иногда и в обоих. Этот метод особенно подходит для бетонов от мягкой до очень текучей консистенции, но не для очень жестких и жестких бетонов. [9]

**Цель работы:** разработка метода оценки растекаемости свежего бетона при 3D печати.

## 2. Методы и материалы

На рисунке 1 приведено оборудование 3D печати вибрационного типа.



**Рисунок 1.** Процесс контроля растекаемости монолитного бруса из свежего бетона:

1 - монолитный брус; 2 - скользящая опалубка; 3 - частотомер; 4 - бункер.

При движении бетоноукладчика смесь из бункера 4 поступает в скользящую опалубку 2 под воздействием вынуждающей силы, возникающей при работе вибратора 5. Растекаемость свежего бетона определялась акселерометром косвенно по амплитудно-частотным характеристикам вибрационного оборудования (рис. 1). При этом варьировалась вынуждающая сила вибратора. Точность измерений составляет около  $\pm 2\%$ . Диапазон измерений акселерометра охватывает частоты от 800 до 50 000 мин<sup>-1</sup>, что соответствует примерно 14-833 Гц.

Растекаемость монолитного бруса зависит от состава бетонной смеси. В таблице 1 приведены классы растекаемости и уплотнения бетонной смеси в зависимости от категории бетона.

Таблица 1. Характеристика бетона

| Категория бетона по консистенции | Классы растекаемости |                            | Классы уплотнения |                        |
|----------------------------------|----------------------|----------------------------|-------------------|------------------------|
|                                  | Класс                | Значение растекаемости, мм | Класс             | Степень уплотнения $v$ |
| очень жесткий                    | –                    | –                          | C0                | $\geq 1,46$            |
| жесткий                          | F1                   | $\leq 340$                 | C1                | 1,45 – 1,26            |
| пластичный                       | F2                   | 350 – 410                  | C2                | 1,25 – 1,11            |
| мягкий                           | F3                   | 420 – 480                  | C3                | 1,11 – 1,04            |
| очень мягкий                     | F4                   | 490 – 550                  |                   |                        |
| текучий                          | F5                   | 560 – 620                  |                   |                        |
| очень текучий                    | F6                   | $\geq 630$                 |                   |                        |

### 3. Результаты

При работе вибратора идут колебания стенок бункера, которые передаются слоям шихты бетонной смеси. Регулируя величину возмущающей силы вибратора выбирался оптимальный режим вибрации, а также влияние вибрации на самовозбуждение бункера и скользящей опалубки. Выполнение стенок бункера из листового металлического материала позволяет обеспечивать колебания бетонной смеси и соответственно уплотнять ее в процессе формирования изделий. Амплитуда колебаний слоев шихты зависит от амплитуды колебаний стенок бункера, а значит и от размещения вибратора на бункере. Исследования процесса формирования монолитного бруса методом 3D печати показали, что максимальная амплитуда колебаний шихты наблюдается со стороны стенки, на которой установлен вибратор. На рис. 2 приведены экспериментальные зависимости амплитуды колебаний стенок бункера при частоте колебаний, создаваемых вибратором: 30, 40, 50 и 100 Гц.

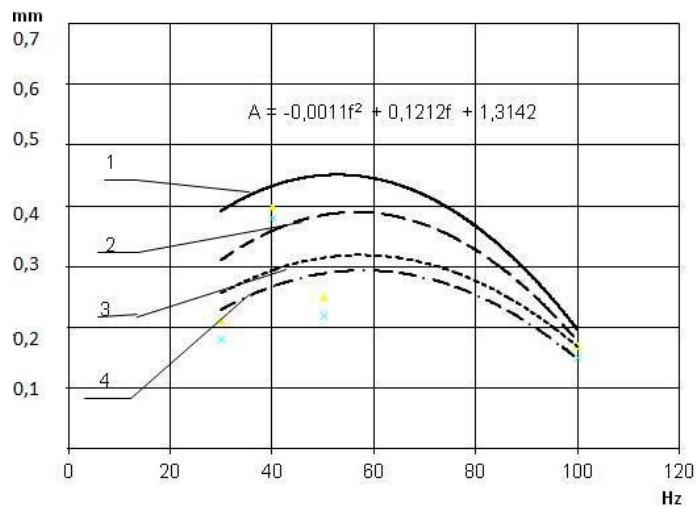
Наибольшая амплитуда колебаний стенок бункера возникает при частоте колебаний 40 Гц. Использование вибратора с промышленной частотой 50 Гц позволяет получить амплитуду колебаний стенок бункера до 0,3 мм. Этого достаточно, чтобы передать вибрацию на шихту бетонной смеси. Поэтому колебания шихты бетонной смеси исследовались при работе вибратором с частотой вибрации 50 Гц.

Амплитуда колебаний стенок бункера описывается уравнением

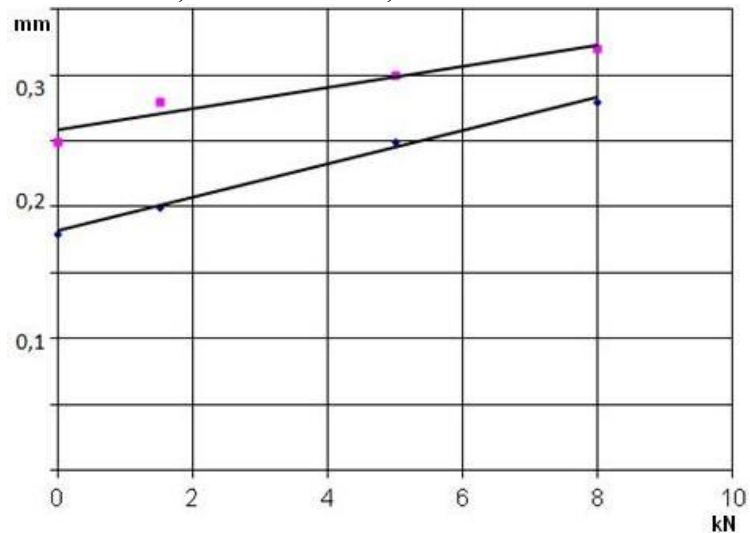
$$A = -0,001f^2 + 0,13f + 0,43$$

где  $f$  – частота колебаний.

Влияние вынуждающей силы вибратора на амплитуду колебаний стенок бункера приведено на рисунке 3.



**Рисунок 2.** Зависимость амплитуды от частоты колебаний стенок бункера  
1 – сегмент №1, 2 – сегмент №2, 3 – сегмент №3, 4 – сегмент №4



**Рисунок 3.** Зависимость амплитуды колебаний стенок бункера от вынуждающей силы вибратора: 1 – при незагруженном смесью бункере; 2 – при загруженном бункере смесью. При минимальном дебалансе амплитуда уменьшается к середине стенки, а концы, то есть углы бункера, вибрируют сильнее, что дает возможность более уплотнить смесь по краям рамки и тем самым выровнять прочность по изделию. При вынуждающей силе соответственно 2,4 и 5,2 кН идет выравнивание плотности по всей скользящей опалубке. Соответственно по высоте бетонного столба амплитуда колебаний слоев шихты уменьшается с увеличением расстояния от установленного вибратора. Наименьшие колебания шихты наблюдаются с противоположной стороны от вибратора. Максимальная амплитуда колебаний шихты наблюдается на уровне установленного вибратора и составляет 0,27 мм. Минимальная амплитуда колебаний в этом же слое составляет 0,27 мм. Таким образом в процессе колебаний шихты наблюдается ее перемещение в противоположную сторону от вибратора.

#### 4. Обсуждение

При определении рациональных параметров виброгасителей использовался метод локальной оптимизации. На этом этапе производилась частная оптимизация виброускорений в зависимости от конструктивных параметров оборудования и плотности шихты. В качестве критерия оптимизации принято условие снижения уровня вибрации без ухудшения качества

работы оборудования за счет поглощения части энергии и перераспределения внутренней энергии демпфирования внутри самой системы.

Частная оптимизация виброускорений по амплитуде колебаний стенок бункера, амплитуде колебаний слоев шихты и жесткости виброгасителей проводилась с помощью программного редактора Excel. Параметром оптимизации принят уровень виброускорений 3D принтер. Начальные условия оптимизации приведены в таблице 2.

Таблица 1. Начальные условия оптимизации

| Виброускорения, $\ddot{Y}$ , м/с <sup>2</sup> | Амплитуда колебаний стенок бункера, Аб, мм | Амплитуда колебаний шихты, Аш мм | Жесткость амортизатора, С1 кН/м |
|---|--|----------------------------------|---------------------------------|
| 3   | 0,3  | 0,28                             | 100                             |
| 2   | 0,23                                       | 0,21                             | 100                             |
| 0,75  | 0,1  | 0,09                             | 100                             |
| 2,75  | 0,4  | 0,38                             | 10                              |
| 0,5   | 0,05                                       | 0,04                             | 10                              |

Уравнение регрессии виброускорений имеет вид:

$$\ddot{Y} = -0,6381 + 78,7383Aб - 73,714Aш + 0,0027C$$

где Аб - амплитуда колебаний стенок бункера; Аш - амплитуда колебаний слоев шихты; С - жесткость виброгасителей.

## 5. Выводы

Результаты исследований процесса растекаемости свежего бетона показали, что при вибрационном способе формования строительных изделий консистенция смеси зависит от амплитудно-частотных характеристик и мощности вибратора. С увеличением плотности бетонной смеси виброускорения и амплитуда колебаний бункера уменьшаются. С увеличением времени вибрирования ускорения увеличиваются незначительно, не превышая нормативных санитарно-гигиенических значений. Рациональная частота колебаний 50 Гц.

Амплитуда колебаний стенок бункера изменяется линейно в зависимости от действия вынуждающей силы вибратора и нелинейно от частоты колебаний вибратора. Наибольшая амплитуда колебаний стенок бункера виброформовочной машины возникает в диапазоне частоты колебаний 40 – 50 Гц. Использование вибратора с промышленной частотой 50 Гц позволяет получить амплитуду колебаний стенок бункера до 0,3 мм.

## Литература

- [1] Wi K, Suresh V, Wang K, Li B, Qin H 2020 Quantifying quality of 3D printed clay objects using a 3D structured light scanning system Additive Manufacturing 32 100987
- [2] Ketel S, Falzone G, Wang B, Washburn N, Sant G 2019 A printability index for linking slurry rheology to the geometrical attributes of 3D-printed components Cement and Concrete Composites 101 P. 32-43
- [3] Vozisova O, Bliznyuk D, Egorov A, Eroshenko S, Snegirev D 2016 The laser scanning application for power systems equipment engineering reverse 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University 7763075
- [4] Lim S, Buswell R A, Valentine P J, Piker D, Austin S A, De Kestelier X 2016 Modelling curved-layered printing paths for fabricating large-scale construction components Additive Manufacturing 12 P. 216-230
- [5] Wallevik J E 2020 Measuring Thixotropic Properties in a Truck Mixer - Analysis by Numerical Simulation Using the PFI Material Model Rheology and Processing of Construction Materials pp. 644-651

- [6] Hirayama Y, Zhang J, Kawahara Y 2019 A method to evaluate the formability and fluidity of concrete based materials for 3D printing SCF '19: Proceedings of the ACM Symposium on Computational Fabrication P. 1–10
- [7] Liu Z, Li M, Wong T N, Tan M J 2018 Towards additive manufacturing: Pumping flow rate with time-dependent material rheology in 3d cementitious material printing 10th International Conference on Processing and Manufacturing of Advanced Materials 941 P. 2131-2136
- [8] Wolfs R J M, Bos F P, Van Strien E C F, Salet T A M 2017 A real-time height measurement and feedback system for 3D concrete printing High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet - Proceedings of the 2017 fib Symposium P. 2474-2483
- [9] Постоев П. А. Влияние колебательного процесса на динамические параметры бункера укладчика бетонной смеси/ Постоев П. А., Цыганкова А. В. / Материалы всероссийской научно-технической конференции молодых ученых. Инновации и актуальные проблемы техники и технологий. Том 2. Саратов. 2010. С. 187-189.