

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2020, №2, Том 12 / 2020, No 2, Vol 12 <https://esj.today/issue-2-2020.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/13SAVN220.pdf>

Ссылка для цитирования этой статьи:

Емельянов Р.Т., Прокопьев А.П., Якшина А.А., Пиндур С.В. Моделирование 3D печати малых архитектурных форм // Вестник Евразийской науки, 2020 №2, <https://esj.today/PDF/13SAVN220.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

For citation:

Emelyanov R.T., Prokopyev A.P., Yakshina A.A., Pindur S.V. (2020). Modeling 3D printing of small architectural forms. *The Eurasian Scientific Journal*, [online] 2(12). Available at: <https://esj.today/PDF/13SAVN220.pdf> (in Russian)

УДК 480.56

Емельянов Рюрик Тимофеевич

ФГАОУ «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия

Профессор

Доктор технических наук, профессор

E-mail: ert-44@yandex.ru

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5453-4882>

РИНЦ: http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=318363

Mendeley: <https://www.mendeley.com/authors/57192652495>

SCOPUS: <http://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57192652495>

Google Академия: <https://scholar.google.ru/citations?user=Bkoed-kAAAAJ&hl=ru>

Прокопьев Андрей Петрович

ФГАОУ «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия

Доцент

Кандидат технических наук

E-mail: prok1@yandex.ru

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2838-7350>

РИНЦ: http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=415304

Mendeley: <https://www.mendeley.com/authors/57211797790>

Researcher ID: <http://www.researcherid.com/rid/W-1397-2018>

SCOPUS: <http://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57211797790>

Google Академия: <https://scholar.google.com/citations?user=jBhEt40AAAAJ>

Якшина Александра Алексеевна

ФГАОУ «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия

Старший преподаватель

E-mail: sestrasha@gmail.ru

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3906-8021>

РИНЦ: http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1035864

Mendeley: <https://www.mendeley.com/authors/57209199510>

SCOPUS: <http://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57209199510>

Google Академия: <https://scholar.google.com/citations?user=TxQyhH8AAAAJ>

Пиндур Станислав Валерьевич

ФГАОУ «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия

Аспирант

Магистр

E-mail: pindur@inbox.ru

Моделирование 3D печати малых архитектурных форм

Аннотация. Сделан обзор состояния в России и за рубежом аддитивных технологий, в том числе и их использованию в архитектуре и строительстве. Авторами отмечается, что применение аддитивных технологий возможно, как при 3D печати зданий пониженной этажности, так и возведение высотных зданий. Широкое применение 3D нашло при изготовлении малых архитектурных форм. В статье приведены результаты исследований подачи строительной смеси от бункера 3D принтера к печатающей головке принтера. Для отработки рациональных параметров системы подачи строительной смеси широко применяется математическое моделирование. Автором составлена система двух дифференциальных уравнений первого порядка для определения выходных переменных модели. Для преобразования этих уравнений в блок-диаграмму формируются правые части уравнений. Даны зависимости скорости входного и выходного потоков смеси. С целью выявления влияния скорости подачи строительной смеси от бункера строительной смеси к печатающей головке проведен компьютерный эксперимент на основе результатов моделирования процесса наполнения и опустошения бункера 3D принтера. Приведены уровни варьирования переменных, и матрица планирования эксперимента, результаты измерений. Определено влияние скорости подачи строительной смеси от бункера строительной смеси к печатающей головке при переходном процессе выполнены методом планирования эксперимента в среде MathCAD. Составлена матрица планирования эксперимента в размерном масштабе. По уравнению регрессии в среде MATLAB построена функция амплитуды зависимости наполнения уровня бака от диаметра бункера при различных значениях скорости подачи бетона в бункер.

Ключевые слова: 3D принтер; печатающая головка; аддитивные технологии; цилиндрический бак; скорость подачи; строительная смесь

Введение

Строительство всегда считалось перспективным и выгодным делом. Однако выгоду можно получить только в том случае, если использовать современные разработки стройиндустрии. На сегодняшний день строительные технологии непрерывно развиваются, происходит доработка и усовершенствование старых, либо изобретение новых методик и принципов строительного дела. Возведение зданий и сооружений трудно представить без применения различных механизмов, машин и приспособлений, облегчающих ведение строительно-монтажных работ.

В настоящий момент активно развивается технология 3D-печати. За последние несколько лет аддитивная технология стала примером самых стремительно развивающихся отраслей. Уникальность аддитивных технологий заключается в том, что использование 3D принтера позволяет распечатать объект практически любого размера в различных отраслях промышленности.

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, геоплимерного бетона и др.

Широкое использование потенциала трехмерной печати позволит экономить средства и время, а также повысить производительность. 3D печать – это инструмент для расширения возможностей. Таким образом, исследования активно ведутся и можно предположить, что в самом недалеком будущем – лет через десять – применение 3D принтеров позволит создавать сложные трехмерные проекционные модели зданий с точностью передачи в 100 микрон, которые особенно актуальны для научных институтов, ведь теперь можно не только делать

прототип, а и прикасаться к нему в проводимых исследованиях. Быстрое, экологичное и недорогое. Строительство может быть таким, если поручить сложную работу умным машинам и внедрить новые технологии.

Литературный обзор

В России и за рубежом наблюдается резкий подъем интереса к аддитивным технологиям, в том числе к их использованию в архитектуре и строительстве [1–3]. Активным внедрением и продвижением аддитивных технологий в строительную отрасль занимаются Ярославская компания «Спецавиа» и Московская компания «ApisCor» [4–6].

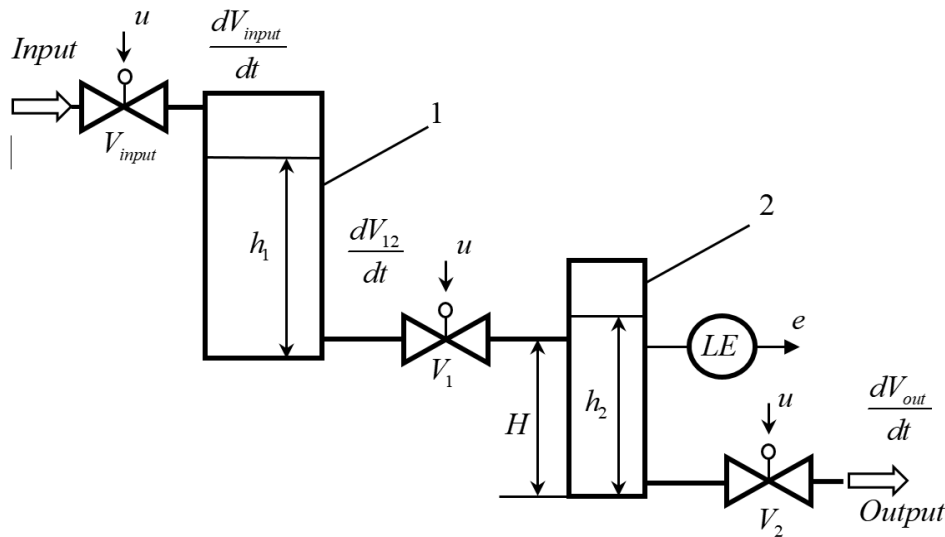
При поддержании высокого темпа развития аддитивных технологий, по самым смелым замыслам 3D-принтеры можно будет использовать не только для строительства небольших коттеджей, но и для возведения небоскребов, а автоматизация ручного труда позволит сократить численность строительных рабочих и минимизировать риск производственных травм. 3D печать зданий, при должном развитии, будет теснить обычное строительство в возведении малогабаритных зданий, а в будущем, возможно, сможет встать на первое место и среди высотных сооружений [7–10]. Несмотря на все вышеперечисленные преимущества у аддитивных технологий имеются множественные недоработки, которые необходимо устранять путём проведения дополнительных исследований и испытаний, для внедрения аддитивных технологий в массовое строительство зданий и сооружений. Комплексное решение проблем позволит данной технологии составить серьезную конкуренцию традиционным способам строительства [11]. Анализ исследований в рассматриваемой области показал недостаточно изученный вопрос о совместной работе бункера строительной смеси с мобильным автоматизированным комплексом подготовки и подачи строительной смеси в 3D принтер. Необходимо исследовать, как влияет скорость подачи строительной смеси от бункера строительной смеси к мобильному автоматизированному комплексу на процесс печати строительных конструкций. Необходимо определить значения самих параметров, дать рекомендации по их значениям в процессе подачи строительной смеси.

Одним из способов перейти на автоматизированное производство в строительной отрасли является 3D-печать зданий и сооружений. Однако имеется множество тонких вопросов, касающихся самой технологии возведения зданий. В частности, использования арматуры и монтаж инженерных систем. Много вопросов вызывают состав рабочей смеси. Было проанализировано множество данных о составах рабочих смесей для 3D-печати. Был разработан состав гипсоцементно-пуццолановом вяжущем (ГЦПВ), обладающим высоким показателем водостойкости. Проведен ряд испытаний по достижению строительной смеси необходимых свойств. В результате проведенных исследований выявлено, что при наличии в строительной смеси водоредуцирующей добавки и редиспергируемого полимерного порошка, происходит увеличение прочности бетона на 20 %. У строительной смеси происходит снижение пористости вдвое, водостойкость и коррозионная стойкость повышаются более чем на 10 %, а морозостойкость увеличивается на 60 %. Также в присутствии водоудерживающей добавки происходит регулирование вязкости и пластичности смеси, что придает ей требуемую для 3D-принтера удобоукладываемость. При поддержании высокого темпа развития аддитивных технологий, по самым смелым замыслам 3D-принтеры можно будет использовать не только для строительства небольших коттеджей, но и для возведения небоскребов, а автоматизация ручного труда позволит сократить численность строительных рабочих и минимизировать риск производственных травм [11].

Цель работы – совершенствование технологии 3D печати малых архитектурных форм.

Методы и материалы

На рис. 1 приведена расчетная схема подачи строительной смеси от бункера к печатающей головке принтера.



u – сигнал контроллера; e – сигнал датчика уровня

Рисунок 1. Расчетная схема подачи строительной смеси от бункера к печатающей головке принтера (разработано Пиндур С.В. и Емельяновым Р.Т.)

Для подачи смеси в бункер применяется входной кран V_{input} . Подача смеси из головки принтера осуществляется через выходной кран Q_{output} . Краны V_1 и V_2 открываются и закрываются с одной и той же постоянной скоростью, так что от момента начала открытия (закрытия) до полного открытия (закрытия) требуется 80 с. Их открытие и закрытие контролируется задвижкой, меняющей свое положение от значения $P = 0$ (полное закрытие в условных единицах) до $P = 80$ (полное открытие). Управление открытием/закрытием кранов V_{input} , V_1 и V_2 осуществляется специальным контроллером. Входной кран V_{input} открывается мгновенно.

Результаты исследований

Скорость входного потока

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{1}{A_1} \cdot \left(\frac{dV_{input}}{dt} - \frac{dV_{12}}{dt} \right), \quad (1)$$

скорость выходного потока

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{1}{A_2} \cdot \left(\frac{dV_{12}}{dt} - \frac{dV_{out}}{dt} \right), \quad (2)$$

где A_1 и A_2 обозначить площади оснований баков; $\frac{dV_{12}}{dt}$, $\frac{dV_{out}}{dt}$ – скорость протекания и вытекания бетона по трубе между баками, соответственно.

Так как баки – цилиндрические, то площади оснований баков вычисляются по формуле площади круга. Скорость протекания строительной смеси между баками зависит от уровней бетона h_1 и h_2 , значения H и положения задержки P_1 в кране V_1 :

$$\frac{dV_{12}}{dt} = \begin{cases} K_1(P_1) \cdot \sqrt{h_1 - (h_2 - H)}, h_2 > H; \\ K_1(P_1) \cdot \sqrt{h_1}, h_2 \leq H \end{cases} \quad (3)$$

Скорость вытекания бетона из системы зависит от уровня бетона во втором баке h_2 и положения задвижки P_2 на кране V_2 .

$$\frac{dV_{out}}{dt} = K_2(P_2) \cdot \sqrt{h_2}, \quad (4)$$

где K_1 и K_2 – коэффициенты расхода смеси через краны

$$K_1(P_1) = \begin{cases} 1.85 \cdot 10^4 \cdot e^{-6 \cdot 10^{-6} \cdot p_1^3}, 0 \leq P_1 < 80; \\ 0, P_1 = 80 \end{cases} \quad (5)$$

$$K_2(P_2) = \begin{cases} 2.26 \cdot 10^4 \cdot e^{-5.7 \cdot 10^{-6} \cdot p_2^3}, 0 \leq P_2 < 80; \\ 0, P_2 = 80 \end{cases} \quad (6)$$

Основными уравнениями модели является система двух дифференциальных уравнений первого порядка для определения выходных переменных модели – h_1 и h_2 . Для преобразования этих уравнений в блок-диаграмму формируются правые части уравнений. Проинтегрировав эти выражения, получаем значения h_1 и h_2 . Полученные величины использованы для формирования правых частей уравнений (обратной связью).

С целью выявления влияния скорости подачи строительной смеси от бункера строительной смеси к печатающей головке проведен компьютерный эксперимент на основе результатов моделирования процесса наполнения и опустошения бункера 3D принтера в среде MATLAB/Simulink. В таблицах 1 и 2 приведены уровни варьирования переменных, и матрица планирования эксперимента, результаты измерений. Определение влияния скорости подачи строительной смеси от бункера строительной смеси к печатающей головке при переходном процессе выполнены методом планирования эксперимента в среде MathCAD.

Таблица 1

Уровни варьирования независимых переменных

Факторы	V_{input} , л/ч	D_1 , см
Нижний уровень (-1)	135	80
Верхний уровень (+1)	550	390
Основной уровень (0)	$(135 + 550)/2 = 342,5$	$(80 + 390)/2 = 235$
Интервал варьирования (ΔX)	$550 - 135 = 415$	$390 - 80 = 310$

Таблица 2

Матрица планирования и результаты эксперимента

№ опыта	Безразмерный масштаб		Размерный масштаб		Высота бака H , м
	X_1	X_2	V_{input} , л/ч	D_1 , см	
1	-1	-1	135	80	0,041
2	1	-1	550	80	0,682
3	-1	1	135	390	0,036
4	1	1	550	390	0,464
5	-1	0	135	235	0,04
6	1	0	550	235	0,53
7	0	-1	342,5	80	0,264
8	0	1	342,5	390	0,161

Матрица планирования эксперимента в размерном масштабе имеет вид:

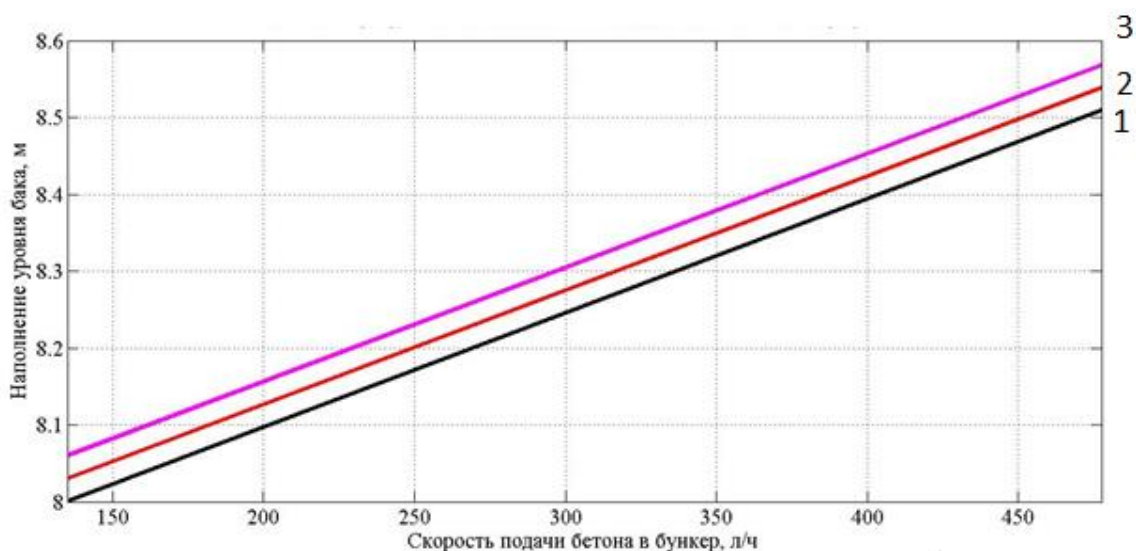
$$C = \begin{pmatrix} 1 & 135 & 80 & 1.822 \times 10^4 & 6.4 \times 10^3 & 1.08 \times 10^4 \\ 1 & 550 & 80 & 3.025 \times 10^5 & 6.4 \times 10^3 & 4.4 \times 10^4 \\ 1 & 135 & 390 & 1.822 \times 10^4 & 1.521 \times 10^5 & 5.265 \times 10^5 \\ 1 & 550 & 390 & 3.025 \times 10^5 & 1.521 \times 10^5 & 2.145 \times 10^4 \\ 1 & 135 & 235 & 1.822 \times 10^4 & 5.522 \times 10^4 & 3.172 \times 10^4 \\ 1 & 550 & 235 & 3.025 \times 10^5 & 5.522 \times 10^4 & 1.292 \times 10^5 \\ 1 & 342.5 & 80 & 1.173 \times 10^5 & 6.4 \times 10^3 & 2.74 \times 10^4 \\ 1 & 342.5 & 390 & 1.173 \times 10^5 & 1.521 \times 10^5 & 1.336 \times 10^5 \end{pmatrix}$$

Уравнение регрессии с независимыми переменными в размерном масштабе в формате MathCAD:

$$z(V, D) := 0.014 + 1.577 \cdot 10^{-4} \cdot V - 1.894 \cdot 10^{-4} \cdot D + 2.166 \cdot 10^{-6} \cdot V^2 + 8.637 \cdot 10^{-7} \cdot D^2 - 1.656 \cdot 10^{-6} \cdot V \cdot D, \quad (7)$$

где V – скорость подачи бетона в бункер, л/ч; D – диаметра бункера, см.

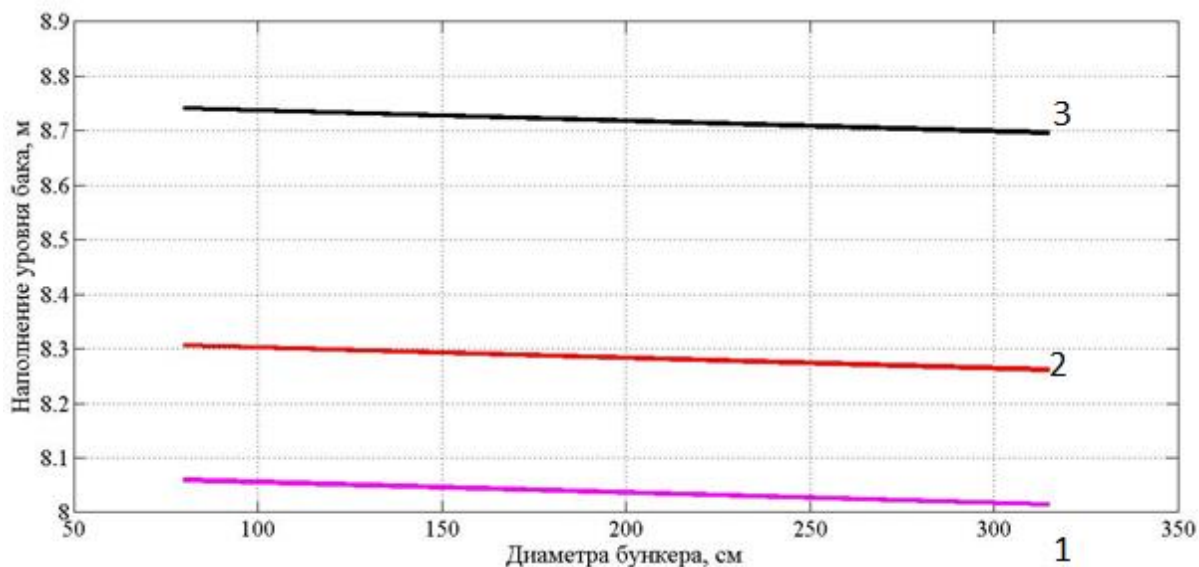
По уравнению регрессии в среде MATLAB построена функция амплитуды зависимости наполнения уровня бака (м) от скорости подачи бетона в бункер (л/ч), при различных значениях диаметра бункера (см), рис. 2.



1 – диаметр бункера 100 см; 2 – диаметр бункера 200 см; 3 – диаметр бункера 100 см

Рисунок 2. Зависимость наполнения уровня бака (м) от скорости подачи бетона в бункер (л/ч), при различных значениях диаметра бункера (см) (разработано Пиндур С.В. и Прокотьевым А.П.)

По уравнению регрессии в среде MATLAB построена функция амплитуды зависимости наполнения уровня бака (м) от диаметра бункера (см), при различных значениях скорости подачи бетона в бункер (л/ч), рис. 3.



1 – скорость подачи смеси 150 л/ч; 2 – скорость подачи смеси 250 л/ч; 3 – скорость подачи смеси 450 л/ч

Рисунок 3. Зависимость наполнения уровня бака (м) от диаметра бункера (см), при различных значениях скорости подачи бетона в бункер (л/ч) (разработано Пиндур С.В. и Прокопьевым А.П.)

На рис. 4 приведена зависимость наполнения уровня бака (м) от скорости подачи строительной смеси в бункер (л/ч) и диаметра бункера (см).

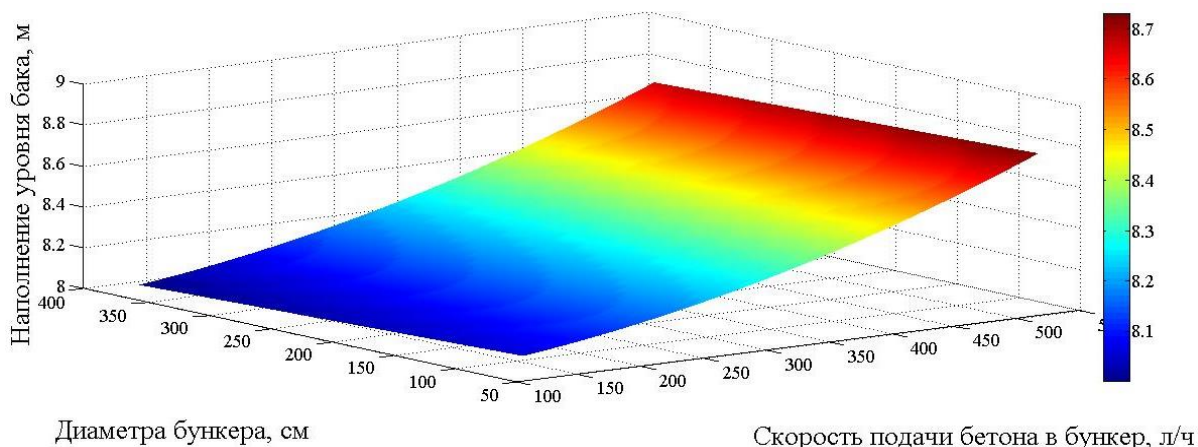


Рисунок 4. Зависимость наполнения уровня бака (м) от скорости подачи бетона в бункер (л/ч) и диаметра бункера (см) (разработано Пиндур С.В. и Прокопьевым А.П.)

Выводы

В результате выполнения компьютерного моделирования были определены параметры рабочего процесса наполнения и опустошения бункера 3D принтера при печати малых архитектурных форм. Разработана расчётная схема исследуемого процесса. Получена математическая модель процесса наполнения и опустошения бункера 3D принтера. Выполнена проверка адекватности имитационной модели на конкретном примере. Реализован компьютерный эксперимент с использованием плана бокса Б2. Обработка результатов компьютерного эксперимента выполнена с использованием программной среды MathCAD. Получено регрессионное уравнение зависимости наполнения уровня бака от скорости подачи

бетона в бункер и диаметра бункера. Построены графические зависимости функции от переменных в программе MATLAB.

ЛИТЕРАТУРА

1. Максимов Н.М. Аддитивные технологии в строительстве: оборудование и материалы. Журнал аддитивные технологии: часть 2. Москва. 2018. С. 54–68.
2. Емельянов Р.Т., Клиндух Н.Ю., Якшина А.А., Берсенева М.Л. Эффективность 3D печати в строительстве. Экономика и предпринимательство, 2019.
3. 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.
4. Wolfs R., Salet T. An Optimization Strategy for 3D Concrete Printing. EG-ICE 2015 – 22nd Workshop of the European Group of Intelligent Computing in Engineering. 2015. Code 114260.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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. Pp. 2474–2483. URL: <http://www.knigi.konflib.ru/8raznoe/8767-5-rukovod...>

Emelyanov Rurik Timofeevich

Siberian federal university, Krasnoyarsk, Russia
E-mail: ert-44@yandex.ru

Prokopyev Andrei Petrovich

Siberian federal university, Krasnoyarsk, Russia
E-mail: prok1@yandex.ru

Yakshina Alexandra Alekseevna

Siberian federal university, Krasnoyarsk, Russia
E-mail: sestrasha@gmail.ru

Pindur Stanislav Valerevich

Siberian federal university, Krasnoyarsk, Russia
E-mail: pindur@inbox.ru

Modeling 3D printing of small architectural forms

Abstract. A review of the state of additive technologies in Russia and abroad, including their use in architecture and construction, is made. The authors note that the use of additive technologies is possible both with 3D printing of buildings with low floors, and the construction of high-rise buildings. 3D has been widely used in the manufacture of small architectural forms. The article presents the results of studies of the supply of mortar from the 3D printer hopper to the print head of the printer. To work out the rational parameters of the mortar supply system, mathematical modeling is widely used. The author has compiled a system of two first-order differential equations for determining the output variables of the model. To convert these equations into a block diagram, the right-hand sides of the equations are formed. The dependences of the velocity of the input and output flows of the mixture are given. In order to identify the influence of the feed rate of the mortar from the mortar to the print head, a computer experiment was conducted based on the simulation results of the filling and emptying of the 3D printer hopper. The levels of variation of variables, and the planning matrix of the experiment, the measurement results. The influence of the mortar feed rate from the mortar hopper to the printhead during the transition process is determined by the method of experiment planning in the MathCAD environment. An experiment planning matrix has been compiled on a dimensional scale. Using the regression equation in MATLAB, a function of the amplitude of the dependence of the filling of the tank level on the diameter of the hopper was constructed for various values of the feed rate of concrete into the hopper.

Keywords: 3D printer; printhead; additive technology; cylindrical tank; feed rate; mortar