

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-5-374-385>

УДК 666.972.3

3D-бетонирование – составы, методики и свойства смесей

Магистр Ю. Д. Самуйлов¹⁾, канд. техн. наук, доц. В. М. Тrepачко¹⁾,
докт. техн. наук, проф. Э. И. Батяновский¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. В статье отражена проблематика технологии 3D-бетонирования, достаточно интенсивно развивающейся в современных условиях строительного производства. Важнейшим условием ее практической реализации является разработка составов бетонных смесей, обеспечивающих необходимые реологические (технологические) свойства для формирования изделий, элементов строительных конструкций или конструкции в целом, а также позволяющих сохранять требуемый темп ведения работ, физико-механические характеристики и свойства затвердевшего бетона. На начальном этапе исследований, выполненных в НИИЛ бетонов и строительных материалов Белорусского национального технического университета, разработан ряд составов бетонных смесей, предназначенных и обеспечивающих необходимые условия для реализации технологии 3D-бетонирования самонесущих и несущих конструктивных элементов соответственно при изготовлении изделий малых архитектурных форм и возведении (устройстве) строительных конструкций различного назначения. Разработана и реализована методология подбора рационального гранулометрического состава заполнителя, вида, свойств и количества связующего, химических и минеральных добавок, в совокупности обеспечивающих требуемые технологические свойства бетонных смесей после их затворения водой. Предложены и экспериментально обоснованы оригинальные методики оценки реологических свойств водозатворенных бетонных смесей и их изменений во времени, приводящих к росту пластической прочности отформованного бетона, а также методика расчета темпа ведения бетонных работ в зависимости от свойств используемых бетонных смесей. В результате созданы предпосылки как для дальнейшего расширения ряда составов сухих бетонных смесей с учетом их предназначения для 3D-бетонирования, так и для разработки методик и оценки физико-механических характеристик и свойств затвердевшего бетона с учетом предназначения изготавливаемых изделий и возводимых (устраиваемых) строительных конструкций.

Ключевые слова: сухая смесь, водозатворенная смесь, заполнитель, вяжущее, добавки, методики, свойства, 3D-бетонирование

Для цитирования: Самуйлов, Ю. Д. 3D-бетонирование – составы, методики и свойства смесей / Ю. Д. Самуйлов, В. М. Тrepачко, Э. И. Батяновский // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 5. С. 374–385. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-5-374-385>

3D-Concreting – Compositions, Techniques and Properties of Mixtures

Yu. D. Samuilov¹⁾, V. M. Trepachko¹⁾, E. I. Batyanovskiy¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper reflects the problems of 3D-concreting technology, which is developing quite intensively in modern conditions of construction production. The most important condition for its practical implementation is the development of concrete mixture compositions that provide the necessary rheological (technological) properties for formation of products,

Адрес для переписки

Батяновский Эдуард Иванович
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 12,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-96-73
batyanovskij@bntu.by

Address for correspondence

Batyanovskiy Eduard I.
Belarusian National Technical University
12, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-96-73
batyanovskij@bntu.by

elements of building structures or the structure as a whole, as well as providing the required pace of work and physical and mechanical characteristics and properties of the hardened concrete. At the initial stage of research carried out in the Research and Testing Laboratory of Concrete and Building Materials of the Belarusian National Technical University a number of concrete mixtures compositions were developed that are designed and provide the necessary conditions for the implementation of 3D-concreting of self-supporting and load-bearing structural elements respectively, in the manufacture of products of small architectural forms and the erection (arrangement) of building structures for various purposes. A methodology has been developed and implemented for the selection of a rational granulometric composition of aggregate, type, properties and amount of binder, chemical and mineral additives, together providing the required technological properties of concrete mixtures after they have been mixed with water. Original methods for assessing the rheological properties of water-soluble concrete mixtures and their changes over time, leading to an increase in the plastic strength of molded concrete, as well as a method for calculating the rate of concrete work depending on the properties of the concrete mixtures used, are proposed and experimentally substantiated. As a result, prerequisites have been created for further expansion of a number of compositions of dry concrete mixes taking into account their purpose for 3D-concreting, and for developing methods and evaluating the physical and mechanical characteristics and properties of hardened concrete, taking into consideration the purpose of manufactured products and erected (arranged) building structures.

Keywords: dry mix, water-soluble mixture, filler, binder, additives, techniques, properties, 3D-concreting

For citation: Samuilov Yu. D., Trepachko V. M., Batyanovskiy E. I. (2022) 3D-Concreting – Compositions, Techniques and Properties of Mixtures. *Science and Technique*. 21 (5), 374–385. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-5-374-385> (in Russian)

Введение

Анализ разнообразных источников информации по проблематике 3D-бетонирования [1–3] показал заинтересованность в развитии данного направления строительного производства в целом ряде стран, занимающих передовые позиции в этой области хозяйственной деятельности. Одновременно налицо отсутствие конкретных сведений по составам, основным компонентам, особенностям технологии, методическому обеспечению по оценке свойств и режимов формования бетона с применением 3D-печати, что, естественно, составляет ноу-хау работающих в данном направлении исследовательских центров и фирм.

В этой связи для разработки и реализации в Беларуси такого в целом перспективного направления строительного производства есть необходимость проведения соответствующих исследований, результаты начального этапа которых приведены в материале статьи. Первичным и одним из важнейших элементов технологии 3D-бетонирования является разработка составов бетона, т. е. подбор его компонентов, обеспечивающих специфические технологические свойства бетонных смесей, а также режимы их формования при послойно-последовательном устройстве разнообразных конструкций, твердения и целенаправленного формирования свойств затвердевшего бетона. В статье частично отражены результаты выполненных исследований по разработке ряда составов

бетона, методики оценки пригодности водозатворенных смесей по технологическим параметрам для 3D-бетонирования, включая основные положения предлагаемой методики расчета планируемого темпа ведения бетонных работ.

Общая методология, материалы и методики исследований

Методология исследований предопределена необходимостью решения комплексной задачи с итоговой целью получения бетонного конструктива с требуемыми прочностными и эксплуатационными характеристиками. При этом исходная бетонная смесь должна обеспечивать возможность экструзионного формования бетона деформирующимся пластичным объемом, приобретающим в процессе подачи через насадку (сопло) требуемую (эллипсоидную) форму, которая способна сохраняться в заданных геометрических размерах и при этом воспринимать нагрузки от массы и динамических воздействий при укладке последующих ее слоев с некоторой заданной скоростью, обеспечивающей требуемый темп ведения бетонных работ. Поскольку имеющиеся на рынке материалы и научно-техническая информация о составах смесей для 3D-бетонирования являются ноу-хау фирм-производителей, для решения перечисленной комплексной задачи было необходимо в поисковом порядке:

– определить требуемую исходную пластичность смеси, т. е. ее консистенцию, спо-

собную держать заданную форму сразу после «выдавливания», и динамику роста пластической прочности, определяющую несущую способность слоя смеси во времени;

– найти оптимальное соотношение разнообразных компонентов бетонной смеси, при котором ее консистенция будет соответствовать предъявляемым требованиям;

– определить свойства материалов – компонентов, входящих в состав смеси, и их влияние на ее реологические свойства с целью обеспечения заданных требований;

– разработать методику оценки и экспериментальным путем выявить закономерности изменений реологических свойств (пластической прочности) смеси различных составов на соответствие заданным требованиям;

– разработать методику расчета допустимого темпа ведения бетонных работ с учетом технологических свойств смеси;

– экспериментально выявить закономерности кинетики твердения (роста прочности) бетона оптимальных составов и установить рациональные режимы его твердения.

В исследованиях использовали стандартизированные методики действующих нормативных документов и вариационные авторские методики, приспособленные к решению конкретных задач, описание и особенности которых отражены в данной статье в соответствующих разделах. Условия проведения экспериментов соответствовали требованиям к лабораторным испытаниям бетонных смесей и бетона (СТБ 1545–2005 [4], ГОСТ 10180–2012 [5]), в частности по температуре воздуха (20 ± 5) °С и относительной влажности (65 ± 5) %.

Компоненты для бетона

• Вяжущие:

а) портландцемент ЦЕМ I класса прочности 42,5Н по ГОСТ 31108–2020 [6] и СЕМ I класса прочности 42,5N по СТБ EN 197-1–2015 [7] (соответствует М500-Д0 по ГОСТ 10178–85 [8], 2-я группа эффективности) с характеристиками, соответствующими требованиям указанных стандартов. Портландцемент производства ОАО «Белорусский цементный завод» с маркировкой «Н», т. е. с обычной прочностью в раннем возрасте, принимали для исследова-

ний как нормально твердеющее вяжущее с учетом того, что цемент с маркировкой «Р» (с высокой прочностью в раннем возрасте) заведомо обеспечит эффекты, полученные на менее активном вяжущем;

б) глиноземистый цемент Fondu (Kerneos, Франция) по стандарту EN 1464766 «Алюминаткальциевый цемент», с характеристиками, удовлетворяющими требованиям указанного норматива;

в) строительный гипс марок не ниже Г-5 Б2 [9], нормально твердеющий, прочностью не менее 5 МПа, удовлетворяющий требованиям стандарта [9] (результаты исследований с гипсовым вяжущим в статье не приводятся, так как по объему материала это предмет отдельной публикации).

• Минеральная добавка – микрокремнезем в соответствии с требованиями [6, 10].

• Заполнители – отсеянные фракции природного песка разной крупности по [11] и их смеси в экспериментально установленном соотношении на базе так называемой фуллеровской зависимости, представленной на рис. 1. График на рис. 1 отражает рациональное соотношение фракций мелкого заполнителя, обеспечивающее их смеси минимальную пустотность (объем межзерновых пустот) при оптимальной удельной поверхности зерен твердой фазы. Это является предпосылкой для минимизации расхода вяжущего при обеспечении требуемых прочностных характеристик бетона на их основе. При изготовлении бетона использовали песок:

а) фракции 0–0,63: средняя плотность в рыхлонасыпном состоянии $\rho_{0,63}^0 = 1484 \text{ кг/м}^3$, в виброуплотненном $\rho_{0,63}^B = 1766 \text{ кг/м}^3$; плотность зерен $\rho_{\text{п}}^3 = 2650 \text{ кг/м}^3$; пустотность $\Pi_{0,63}^0 = 44,0 \%$, $\Pi_{0,63}^B = 33,4 \%$ в рыхлонасыпном и виброуплотненном состоянии соответственно; удельная поверхность фракции песка $S_{\text{уд}} = 143,8 \text{ м}^2/\text{т}$ (определена по методике профессора И. Н. Ахвердова [12]);

б) фракции 0–1,25: $\rho_{0,25}^0 = 1441 \text{ кг/м}^3$ и $\rho_{1,25}^B = 1618 \text{ кг/м}^3$; $\rho_{\text{п}}^3 = 2650 \text{ кг/м}^3$; $\Pi_{1,25}^0 = 45,6 \%$, $\Pi_{1,25}^B = 38,9 \%$; $S_{\text{уд}} = 44,2 \text{ м}^2/\text{т}$;

в) фракции более 1,25: $\rho_{>1,25}^0 = 1431 \text{ кг/м}^3$ и $\rho_{>1,25}^B = 1577 \text{ кг/м}^3$; $\rho_{\Pi}^3 = 2650 \text{ кг/м}^3$; $\Pi_{>1,25}^0 = 46,0 \%$, $\Pi_{>1,25}^B = 40,5 \%$; $S_{уд} = 19,3 \text{ м}^2/\text{т}$;

г) по Фуллеру, фракции 0–1,25: $\rho_{\text{Фул.0-1,25}}^0 = 1572 \text{ кг/м}^3$ и $\rho_{\text{Фул.0-1,25}}^B = 1826 \text{ кг/м}^3$; $\rho_{\Pi}^3 = 2650 \text{ кг/м}^3$; $\Pi_{\text{Фул.0-1,25}}^0 = 40,7 \%$, $\Pi_{\text{Фул.0-1,25}}^B = 31,1 \%$; $S_{уд} = 150,8 \text{ м}^2/\text{т}$;

д) по Фуллеру, фракции 0–2,5: $\rho_{\text{Фул.0-2,5}}^0 = 1564 \text{ кг/м}^3$ и $\rho_{\text{Фул.0-2,5}}^B = 1764 \text{ кг/м}^3$; $\rho_{\Pi}^3 = 2650 \text{ кг/м}^3$; $\Pi_{\text{Фул.0-2,5}}^0 = 41,0 \%$, $\Pi_{\text{Фул.0-2,5}}^B = 33,4 \%$, $S_{уд} = 111,6 \text{ м}^2/\text{т}$.

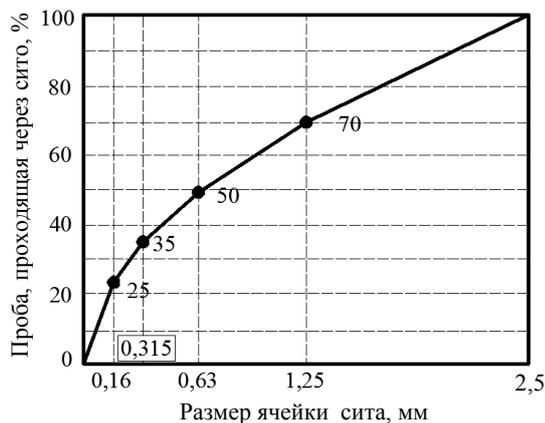


Рис. 1. Зависимость Фуллера [12]

Fig. 1. Fuller dependence [12]

• Химические добавки:

пластификатор, обеспечивает уменьшение водосодержания бетона и оптимальные прочностные характеристики;

ускоритель схватывания, предназначен для повышения темпа роста пластической прочности смеси;

водоудерживающий реагент, создает оптимальную консистенцию смеси, удерживает влагу в ее объеме и снижает усадку в процессе твердения в воздушно-сухих условиях.

• Суперпластификатор (по [13]) – «Полипласт СП-1» производства ОАО «ГК Полипласт» по техническим условиям, в сухом состоянии.

• Ускоритель схватывания – сульфат алюминия ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) по [14], дополнительный эф-

фект – уплотнение структуры цементного камня и бетона.

• Водоудерживающий реагент – гидроксипропилметилцеллюлоза WeKcelo MP 75 HM (WeiKem, КНР) и «УСК-200 ТТ» (Россия).

• Вода затворения – водопроводная питьевая вода, удовлетворяющая требованиям [15] к воде для приготовления бетонных и растворных смесей.

Разработка составов цементобетонных смесей

Составы бетонных смесей для экструзионного 3D-бетонирования на этапе современного развития этой технологии представляют собой некое рациональное соотношение компонентов мелкозернистого конструкционного тяжелого бетона, включающего цементное тесто (в состав которого входят вяжущее, химические и минеральные (при наличии в составе) добавки, вода затворения) и заполнитель, в качестве которого целесообразно использовать природный песок преимущественно фракций размером зерна до 2,5 мм. Последнее связано как с особенностями экструзионного формования бетона, так и с планируемыми к разработке в БНТУ механизмами для опытной реализации технологии 3D-бетонирования.

В этой связи на начальном этапе исследования решали задачу по оценке влияния химических добавок (пластификатора и ускорителя схватывания) на свойства цемента и цементного теста, преследуя двоякую цель: обеспечение связности и взвешивающей способности цементного теста по отношению к заполнителю при экструзионном формовании, а также регулирование сроков схватывания и требуемого темпа роста пластической прочности отформованных слоев бетона в процессе работ. Конечная задача – обеспечение требуемой прочности затвердевшего бетона в изготавливаемом (устраиваемом) конструктиве.

Свойства цементного теста

Пластифицирующий эффект оценивали для разных добавок-пластификаторов 1-й группы по [13], на основании чего по критериям «качество – стоимость» принята к использованию добавка «Полипласт СП-1». В табл. 1 приведены данные оценки эффективности по критерию снижения расхода воды в цементном тесте,

консистенция которого соответствует стандартизированному определению нормальной густоты цемента согласно [16]. С учетом данных табл. 1 и целесообразности максимального уменьшения начального водосодержания цементного теста для последующего роста прочности цементного камня и бетона для дальнейших исследований принимали дозировку добавки «СП-1» в количестве 1,1 % от массы цемента (МЦ) как наиболее рациональную.

Таблица 1

Влияние пластификатора «Полипласт СП-1» на водопотребность и начало схватывания цемента

Influence of the plasticizer “Polyplast SP-1” on water demand and the beginning of cement setting

Дозировка «Полипласта СП-1» от МЦ, %	Нормальная густота цемента, %	Схватывание цементного теста одинаковой консистенции, мин	
		Начало	Конец
0	27,75	250	325
0,5	24,50	225	305
0,7	22,30	360	405
0,9	22,25	365	415
1,1	22,15	380	440
1,3	22,20	415	465

С учетом явного замедления начала схватывания цемента при введении пластификатора, а также того обстоятельства, что период времени до начала схватывания смеси бетона должен обеспечивать, с одной стороны, высокий темп ведения бетонирования (т. е. быть коротким), а с другой – быть достаточным для его осуществления, исследовали возможность регулирования сроков схватывания смеси добавками ускоряющей группы [13]. Для достижения этой цели проверили добавки сульфата натрия Na_2SO_4 (Н), нитрата кальция $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ (НК) и сульфата алюминия Al_2SO_4 (СА) (рис. 2), характеризующиеся минимальными ограничениями к применению в железобетоне по степени агрессивного воздействия на металлические детали оборудования. По результатам исследований принята добавка СА, обладающая не только ускоряющим схватывание, но и уплотняющим структуру цементного бетона действием, что предпочтительно с позиций уменьшения усадочных явлений при его твердении в воздушно-сухих условиях.

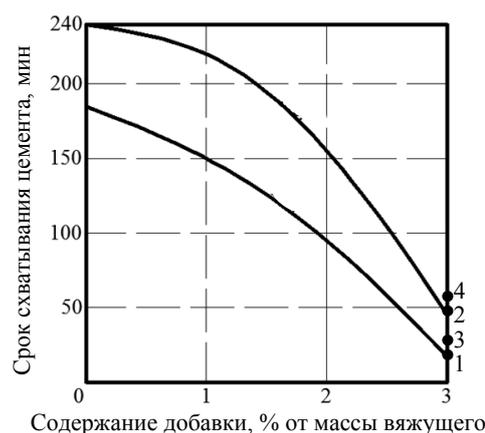


Рис. 2. Зависимость сроков схватывания от содержания добавки для цементного теста нормальной густоты:

1, 2 – начало и конец схватывания для сульфата алюминия (СА);
3, 4 – начало и конец схватывания для комплексной добавки 1,1 % «СП-1» + 3 % СА

Fig. 2. Dependence of setting time on the content additive for cement dough of normal density:

1, 2 – beginning and the end of setting for a sulphate ammonium (SA);
3, 4 – beginning and the end of setting for a complex additive 1.1% “SP-1” + 3 % SA

На рис. 2 приведены экспериментально установленные графические зависимости, отражающие влияние дозировки добавки СА на сроки схватывания цемента (цементного теста нормальной густоты при В/Ц ~ 0,27 доли ед.), а также влияние комплексной добавки, содержащей 1,1 % «СП-1» + 3 % СА от МЦ при В/Ц ~ 0,22. Анализ графиков на рис. 2 показывает, что при решении задачи по обеспечению требуемой формуемости бетонной смеси и одновременно ее ускоренного схватывания для высокого темпа укладки последующих слоев целесообразно, во-первых, обеспечить рациональное (расчетное, требуемое) время начала схватывания, а во-вторых, сократить время окончания схватывания и перехода бетона к твердению, т. е. к ускоренному росту его прочности. Как установлено экспериментально, эта задача решается разработанным комплексом добавок 1,1 % «СП-1» + 3 % СА от МЦ в бетоне, что отражено данными на рис. 2 при трехпроцентной дозировке сульфата алюминия.

Подбор состава бетонной смеси осуществляли экспериментально – путем оценки ее консистенции на пригодность для экструзионного формирования по методике и критериям, приве-

денным далее в статье. В экспериментах варьировали: крупность и фракционность заполнителя (т. е. соотношение фракций, величину его удельной поверхности и пустотность), расход цемента (за счет разного соотношения цемента и заполнителя), содержание воды затворения (величину водоцементного отношения бетона). В табл. 2 приведены результаты экспериментов по оценке пригодности бетонной смеси по формовочным свойствам в зависимости от

влияния заполнителя, соотношения цемент – заполнитель и водосодержания (строки а–в), а также соотношения компонентов бетона (строка г). Номинальный состав бетона уточняли по фактической величине его средней плотности, которую определяли при формировании контрольных образцов. Пригодность смеси по формовочным свойствам для 3D-бетонирования оценивали по разработанным в процессе исследований методикам.

Таблица 2

Оценка пригодности бетонной смеси по формовочным свойствам
Evaluation of suitability of a concrete mix by molding properties

а) Оценка влияния заполнителя			
Вид песка (фракция)	Пластичность смеси (ОК), мм	Способность смеси держать форму (методика 1)	Заключение о пригодности смеси к использованию для экструзионного формования
0–0,63	3	Конус лежит монолитно, не рассыпается и не теряет фрагменты	Пригодна
0,63–1,25	3	Конус лежит не монолитно, рассыпается и теряет фрагменты	Не пригодна
>1,25	3		
Состав песка по Фуллеру фракции 0–1,25	3	Конус лежит монолитно, не рассыпается и не теряет фрагменты	Пригодна
б) Оптимальное соотношение цемента и заполнителя (Ц:З) для консистенции смеси			
Ц:З	Пластичность смеси (ОК) по методике 1, мм	Консистенция смеси	Заключение о пригодности смеси к использованию для экструзионного формования
1:7	3	Влажная рассыпчатая	Не пригодна
1:6	3		
1:5	3		
1:4	3		
1:3	3	Мягкий пластилин	Пригодна
1:2	4		
в) Оценка влияния водосодержания			
В/Ц, доли ед.	Пластичность смеси (ОК) по методике 1, мм	Консистенция смеси	Заключение о пригодности смеси к использованию для экструзионного формования
0,40	0	Влажная рассыпчатая	Не пригодна
0,45	0		
0,50	1		
0,55	3	Мягкий пластилин	Пригодна
г) Соотношение компонентов для расчета номинального состава смеси			
Вид компонента	Формула		
Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н	$\rho_{см} V_{см} = Ц + 3Ц + 0,55Ц + 0,011Ц + 0,03Ц = 4,591Ц$, т. е. $Ц = \rho_{см} V_{см} / 4,591$; при $V_{см} = 1 \text{ м}^3$ $Ц = \rho_{см} / 4,591$		
Песок по Фуллеру фракции 0–1,25	$З = 3Ц$		
Вода	$В = 0,55Ц$		
«Полипласт СП-1»	$П = 0,011Ц$		
Сульфат алюминия	$СА = 0,03Ц$		
Обозначения: $\rho_{см}$ – средняя плотность смеси, кг/м ³ ; $V_{см}$ – объем смеси, м ³ ; Ц – цемент; З – заполнитель.			

В табл. 3 выборочно представлены номинальные составы конструкционного бетона для 3D-бетонирования при устройстве (возведении) несущих и при необходимости самонесущих конструктивов (включая декоративно-архитектурные изделия). Сопоставление приведенных составов бетона (№ 1 разработан фирмой «Сармат», № 2 – разработка БНТУ) по критериям «комплекс ингредиентов – стоимость – пригодность для 3D-бетонирования – качественные характеристики затвердевшего бетона» показало, что состав № 2 не уступает составу № 1 по всем характеристикам, но при этом в полтора-два раза дешевле по стоимости компонентов. В статье в связи с подачей заявки на изобретение не приводятся данные о составе № 2, включающем добавки микрокремнезема, разновидности метилцеллюлозы «УСК-200ТТ» и эластичных сортов фибры российского производства, а также о количественном содержании их в бетоне различного функционального назначения.

Таблица 3

Номинальные составы бетона
Nominal compositions of concrete

Вид компонента	Расход
Состав № 1	
Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н, кг/м ³	490
Песок по Фуллеру фракции 0–2,5, кг/м ³	1224
Вода, кг/м ³	343
Глиноземистый цемент Fondu, кг/м ³	98
Гидроксипропилметилцеллюлоза WeKcelo MP 75 НМ, кг/м ³	2,0
Волокно полипропиленовое 3–6 мм, кг/м ³	2,5
Водоцементное отношение бетона, доли ед.	0,58
Состав № 2	
Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н, кг/м ³	491
Песок по Фуллеру фракции 0–1,25, кг/м ³	1474
Вода, кг/м ³	270
«Полипласт СП-1», кг/м ³	5,4
Сульфат алюминия, кг/м ³	14,7
Водоцементное отношение, доли ед.	0,55

Методики оценки формовочных свойств бетонной смеси

Оценка требуемых формовочных (реологических, технологических) свойств вязко-пластичной мелкозернистой бетонной смеси, предназначенной для экструзионного 3D-бетонирования, специфична. Для данного случая не под-

ходит определение традиционной осадки конуса (ОК), устанавливаемой по [4]. Вместе с тем, как показали результаты экспериментальных исследований, достоверно первично оценить этот технологический параметр на соответствие требуемой консистенции позволяет использование традиционной приборной базы норматива [16].

Методика 1. Аппаратура, применяемая в процессе испытаний: ртутный термометр ТМ-6-1 со шкалой от (–30) до (+50) °С, (±0,2 °С); аспирационный психрометр МВ-4М (10–100 %, ±(6–2) %); кольцо к прибору Вика; две стальные пластины размерами 100×100×2 мм; металлическая линейка 0–150 мм; штангенциркуль 0–300 мм.

Для оценки пластических свойств бетонной смеси (рис. 3) и ее способности держать форму сразу после «выдавливания» отработан и предлагается вариант определения величины осадки конуса ОК при деформировании под собственным весом смеси после снятия кольца к прибору Вика [16] и визуальной фиксации способности смеси к сохранению конической формы без признаков нарушений сплошности ее структуры. Приготовленную к проведению испытаний смесь укладывали в кольцо к прибору Вика, предварительно смазанное антиадгезионным составом (машинным маслом) и установленное на смазанную стальную пластину. Смесь уплотняли вровень с верхней гранью кольца; после укладки смеси кольцо снимали и ставили рядом с отформованной смесью на эту или вторую стальную пластину (равной толщины). На кольцо укладывали на ребро линейку и измеряли ОК по схеме рис. 3. Одновременно визуально оценивали внешний вид отформованного конуса: наличие (отсутствие) трещин, уровень и равномерность деформаций, т. е. способность смеси держать форму после снятия кольца.

Пластичность смеси (ОК) фиксировали в миллиметрах (с точностью 1 мм). Результаты выполненных экспериментов позволяют считать, что для применения смеси в экструзионной технологии 3D-бетонирования ОК должна быть в пределах 2–5 мм (в зависимости от условий ведения работ). При этом форма конуса смеси должна быть монолитной, конус не должен терять фрагменты, а его боковой периметр должен характеризоваться равномерностью поперечных деформаций по высоте.

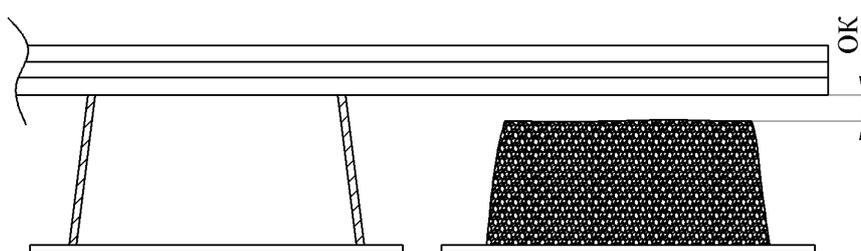


Рис. 3. Оценка деформации смеси

Fig. 3. Evaluation of mixture deformation

Предлагаемая методика дает возможность простейшими приемами оценить консистенцию смеси бетона на пригодность к экструзионному формованию (или 3D-бетонированию), а также определить влияние компонентов на пластические свойства смеси. По физическому состоянию смесь должна соответствовать консистенции размягченного пластилина, чтобы сплошным (без разрывов) слоем выходить из сопла, принимать форму плоского эллипса и сохранять ее под давлением последующих слоев. С помощью предлагаемой методики на начальном этапе подбора состава смеси бетона оценивали влияние расходов компонентов. Результаты этих испытаний представлены в табл. 2 (строки а–в).

Методика 2 предлагается как для первичной оценки формовочных свойств бетонной смеси при подборе состава, так и для оперативной оценки их в процессе ведения бетонных работ. Она заключалась в следующем. Из объема оцениваемой бетонной смеси отбирали пробу, из которой вручную изготавливали пробный шарик диаметром ~25 мм (рис. 4а). Его укладывали на стальную пластину размерами 100×100×2 мм [16], смазанную антиадгезионным составом, и такой же пластиной деформировали вертикально приложенной нагрузкой до остаточной высоты слоя смеси ~10 мм (рис. 4б, с, d).

Визуально оценивали состояние получившейся лепешки на сохранение целостности структуры «отформованной» бетонной смеси. Из испытанных проб для экструзионного 3D-бетонирования пригодна смесь, отображенная на рис. 4d, т. е. бетонная смесь, деформация которой равномерна и характеризуется сплошным (без разрыва) состоянием кромки образца по всему периметру.



Рис. 4. Оценка консистенции смеси: а – шарик диаметром 25 мм; б, с – примеры недостаточной пластичности смеси; d – пример смеси, консистенция которой соответствует консистенции мягкого пластилина

Fig. 4. Evaluation of mixture consistency: a – a ball with diameter of 25 mm; b, c – examples of insufficient mixture plasticity; d – example of mixture whose consistency corresponds to the consistency of soft plasticine

Методики расчета темпа бетонирования

Для оценки возможного темпа укладки слоев из бетонной смеси конкретного состава и установленной консистенции, соответствующей условиям экструзионного 3D-бетонирования, разработаны и предлагаются две методики – эмпирическая (методика 3) и аналитическая (методика 4).

Методика 3 заключается в оценке роста со временем (с развитием процесса схватывания цемента и бетонной смеси) сопротивления смеси усилию вдавливания индентора (рис. 5) в ее массив.

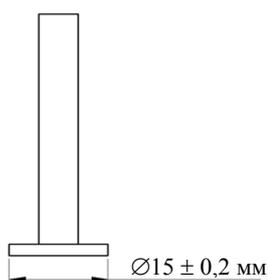


Рис. 5. Индентор для оценки изменений пластической прочности водозатворенной бетонной смеси

Fig. 5. Indenter for assessing changes in plastic strength of water-mixed concrete

В процессе проведения испытаний приготовленную смесь укладывали в кольцо к прибору Вика [16], установленное на стальную пластину. Постукиванием о стол смесь в кольце выравнивали по его верхней грани. Затем кольцо вместе со смесью на пластине устанавливали в рабочую зону разрывной машины Z100 и на верхнюю грань смеси помещали индентор, который вдавливали в массив смеси (скорость погружения 5 мм/мин, глубина погружения ≤ 3 мм). За значение несущей способности смеси принимали ее сопротивление вдавливанию индентора на глубину 1 мм как среднее арифметическое не менее трех определений в разных местах пробы смеси, отличающихся в меньшую и большую стороны не более чем на 10 %. Эту операцию повторяли с определенным временным интервалом, каждый раз перемещая индентор на незатронутую ранее часть верхней грани смеси. Фиксировали изменения (рост) несущей способности смеси $p_{н.с}$ во времени. Соотносили эти изменения с расчетной величиной давления n слоев бетона и требуемой скоростью бетонирования. Должно было соблюдаться условие $p_{н.с} > p$ в любой момент времени. При этом величину давления p , МПа, укладываемого расчетного количества слоев определяли по зависимости

$$p = nmg/(Lb), \quad (1)$$

где n – число слоев, уложенных на основном слое, шт.; m – масса одного слоя, кг, длиной L , мм; g – ускорение свободного падения, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; b – ширина основания слоя (рис. 6), мм.

Массу слоя определяли путем взвешивания свежееотформованного фрагмента слоя длиной $L = 0,5\text{--}1,0$ м. Ширину основания слоя за-

меряли штангенциркулем с точностью до 0,1 мм в трех различных точках уже схватившегося фрагмента слоя, высчитывали среднее арифметическое из трех результатов измерений. Длину фрагмента слоя контролировали рулеткой с точностью до 1 мм.



Рис. 6. Схема фрагмента слоя для расчета по методике 3

Fig. 6. Diagram of layer fragment for calculation according to the method 3

Методика 4 предназначена для аналитического расчета темпа бетонирования по количеству слоев, которые могут быть уложены с учетом изменений пластической прочности смеси во времени. Для ее реализации задавались параметры: ширина слоя B , м; высота слоя h , м; плотность бетонной смеси (при отсутствии фактических данных) 2300 кг/м^3 . Вычисляли массу m , кг, погонного метра слоя, используя схему рис. 7 и следующие зависимости:

$$m = S_{\text{бок}} L \rho_{\text{см}}, \quad (2)$$

$$S_{\text{бок}} = h(\pi h/4 + b), \quad (3)$$

где $S_{\text{бок}}$ – площадь поперечного сечения уложенного слоя, м^2 ; $\rho_{\text{см}}$ – плотность бетонной смеси, кг/м^3 ; b – ширина основания уложенного слоя, м.

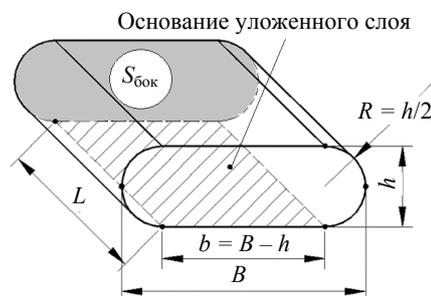


Рис. 7. Схема фрагмента слоя для аналитического способа (методика 4) расчета давления

Fig. 7. Diagram of layer fragment for analytical method (method 4) for calculating pressure

Затем по (1) вычисляли давление на основной слой со стороны вышележащих слоев. На основании этого делали заключение, с каким темпом по количеству укладываемых слоев возможно вести работы с учетом состава и свойств бетонной смеси.

Методика 5, предназначенная для оценки соответствия (пригодности) бетонной смеси конкретного состава по результатам расчета и экспериментального контроля для использования при экструзионном 3D-бетонировании, в сокращенном виде представлена на рис. 8 и в табл. 4.

При необходимости возведения, например, конструкции – элемента колодца (рис. 9) высотой 1020 мм с учетом высоты формируемого слоя 30 мм из бетона состава № 2 (табл. 3), характеризующегося номинальной средней плотностью $\rho_{1,25}^0 \sim 2260 \text{ кг/м}^3$ (в расчетах $\rho = 2300 \text{ кг/м}^3$) и удовлетворяющего положениям методик 1–3 по результатам оценки (расчет в ста-

тье не приводится) технологических свойств водозатворенной смеси (табл. 4), график роста давления на ранее уложенный слой примет вид зависимостей, показанных на рис. 8. Построение кривой роста несущей способности смеси (отражающей способность смеси удерживать начальную форму под воздействием равномерно распределенных нагрузок сжатия) осуществляется эмпирически путем фактических замеров данного показателя на образце смеси по методике 3 с определенным временным интервалом. Кривая роста давления на уложенный слой отражает увеличение давления на нижний уложенный слой бетонной смеси (вызванное воздействием веса вышележащих слоев) в течение времени, которое связано с укладкой на нижний слой каждого последующего слоя (определяется по (1)). Основные показатели приведенного примера расчета (оценки) бетонирования элемента колодца соответствуют данным табл. 5.

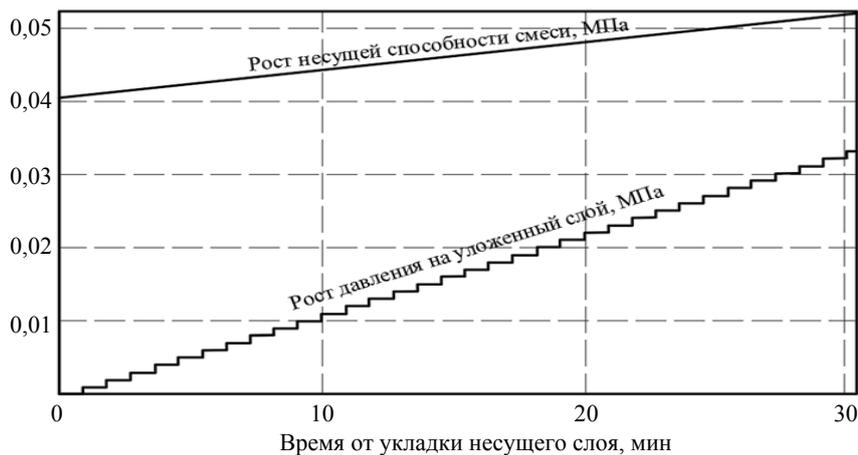


Рис. 8. Оценка соотношения «рост несущей способности смеси – рост давления на ранее уложенный слой»

Fig. 8. Evaluation of the ratio “increase in the bearing capacity of the mixture – an increase in pressure on the previously laid layer”

Таблица 4

Проверка смеси на соответствие заданным требованиям
Checking the mixture for compliance with specified requirements

Характеристика смеси	Требование	Фактическое значение характеристики	Заключение о пригодности смеси к использованию для экструзионного формования
Пластичность (ОК) по методике 1	2–5 мм	3 мм	Пригодна
Способность держать форму (методика 1)	Конус должен лежать монолитно, не рассыпаться и не терять фрагменты	Конус лежит монолитно, не рассыпается и не теряет фрагменты	Пригодна
Консистенция (рис. 4d)	Мягкий пластилин	Мягкий пластилин	Пригодна
Динамика роста несущей способности во времени (методики 3, 4)	Рост несущей способности смеси должен превышать рост давления на уложенный слой	Рост несущей способности смеси превышает рост давления на уложенный слой (рис. 8)	Пригодна

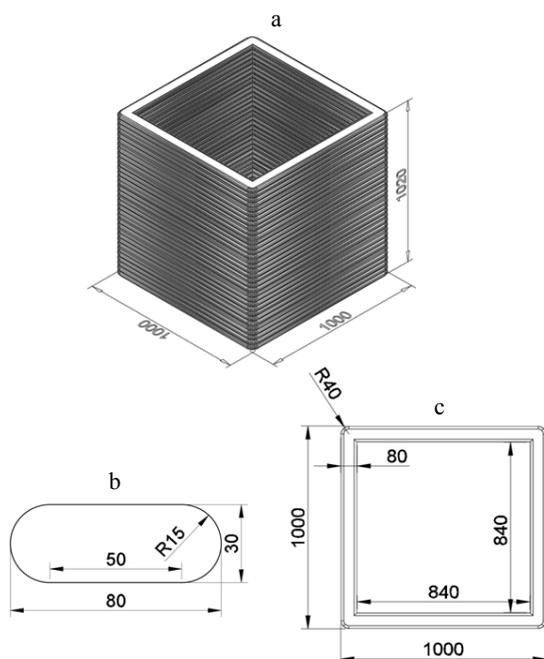


Рис. 9. Возводимая конструкция: а – общий вид колодца; б – размеры слоя бетона; с – размеры колодца в плане

Fig. 9. Structure being erected: a – general view of well; b – dimensions of concrete layer; c – well dimensions in plan

Таблица 5

**Основные показатели
процесса бетонирования элемента колодца**
**Main characteristics
of well element concreting process**

Показатель	Значение
Диаметр круглого сопла экструдера, мм	50
Плотность бетонной смеси, кг/м ³	2300
Высота элемента колодца, мм	1020
Наружный размер элемента колодца в плане, мм	1000
Внутренний размер элемента колодца в плане, мм	840
Радиус закругления углов наружных граней колодца, мм	40
Масса одного метра погонного слоя, кг	5,08
Масса элемента колодца, кг	632,33
Количество слоев бетона, шт.	34
Рекомендуемая скорость возведения, м пог./мин	4
Рекомендуемая скорость выдавливания смеси, м ³ /ч	0,53
Время формования элемента колодца, мин	31,125

ВЫВОДЫ

1. Определены материалы, их необходимые свойства и количественное соотношение для подбора составов сухих смесей, предназначенных для экструзионного 3D-бетонирования при изготовлении строительных изделий и конструкций.

2. Разработаны методики оценки требуемых реологических (технологических) свойств водозатворенных бетонных смесей, базирующиеся на использовании как традиционного стандартизированного оснащения для определения реологических характеристик цементного теста, так и на оригинальном авторском предложении по пенетрационной оценке изменений пластической прочности водозатворенной бетонной смеси во времени.

3. Предложены авторские методики экспериментального и аналитически расчетного определения возможного темпа бетонирования (расчетного количества последовательно укладываемых друг на друга слоев бетонной смеси за единицу времени) с учетом реологических (технологических) характеристик смесей конкретного используемого состава.

4. По совокупности результатов исследований заложены материальные и методологические основы технологического обеспечения производства бетонных работ методом 3D-бетонирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аддитивная технология: описание, определение, особенности применения и отзывы. Аддитивные технологии в промышленности [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://fb.ru/article/231049/additivnaya-tehnologiya-opisanie-opredelenie-osobennosti-primeneniya-i-otzyvyi-additivnyie-tehnologii-v-promyishlennosti>.
2. Обзорная статья по 3D строительным технологиям [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/224299/>.
3. Иванова, Е. А. Методология исследований материалов для строительной 3D-печати / Е. А. Иванова // Перспективы развития аддитивных технологий в Республике Беларусь. Минск: Белор. наука, 2021. С. 15–26.
4. Смеси бетонные. Методы испытаний: СТБ 1545–2005. Введ. 01.07.2005. Минск: Минстройархитектуры, 2005. 24 с.
5. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам: ГОСТ 10180–2012. Введ. 01.07.2013. М.: Стандартинформ, 2018. 36 с.

6. Цементы общестроительные. Технические условия: ГОСТ 31108–2020. Введ. 01.03.2021. М.: Стандартинформ, 2020. 19 с.
7. Цемент. Часть 1. Состав, технические требования и критерии соответствия общестроительных цементов: СТБ EN 197-1–2015. Введ. 01.01.2016. Минск: Госстандарт, 2015. 34 с.
8. Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия: ГОСТ 10178–85. Введ. 01.01.1987. М.: Стандартинформ, 2008. 8 с.
9. Вяжущие гипсовые. Технические условия: ГОСТ 125–2018. Введ. 01.05.2019. М.: Стандартинформ, 2018. 12 с.
10. Микрокремнезем для бетона. Часть 1. Определения, требования и критерии соответствия: СТБ EN 13263-1–2012. Введ. 01.01.2013. Минск: Госстандарт, 2012. 26 с.
11. Песок для строительных работ. Методы испытаний: ГОСТ 8735–88. Введ. 01.07.1989. М.: Стандартинформ, 2018. 34 с.
12. Бабицкий, В. В. Технология заводского производства бетонных и железобетонных изделий. Методические указания к лабораторным работам / В. В. Бабицкий, А. И. Бондарович, П. В. Рябчиков. Минск: БНТУ, 2014. 65 с.
13. Добавки для бетонов. Общие технические условия: СТБ 1112–98. Введ. 01.01.1999. Минск: Минстройархитектуры, 1999. 36 с.
14. Алюминия сульфат технический очищенный. Технические условия: ГОСТ 12966–85. Введ. 01.01.1987. М.: ИПК Изд-во стандартов, 1999. 12 с.
15. Вода для бетонов и растворов. Технические условия: СТБ 1114–98. Введ. 01.01.1999. Минск: Минстройархитектуры, 1999. 20 с.
16. Цементы. Методы определения нормальной плотности, сроков схватывания и равномерности изменения объема: ГОСТ 310.3–76. Введ. 01.01.1978. М.: Изд-во стандартов, 1976. 12 с.
3. Ivanova E. A. (2021) Research Methodology for Materials for Building 3D Printing. *Prospects for the Development of Additive Technologies in the Republic of Belarus*. Minsk, Belorusskaya Nauka Publ., 15–26 (in Russian).
4. STB 1545–2005. Concrete Mixes. Test Methods. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2005. 24 (in Russian).
5. State Standard 10180–2012. Concretes. Methods for Determining the Strength of Control Samples. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 36 (in Russian).
6. State Standard 31108–2020. General Construction Cements. Technical Specifications. Moscow, Standartinform Publ., 2020. 19 (in Russian).
7. STB EN 197-1–2015. Cement. Part 1. Composition, Technical Requirements and Compliance Criteria for General Construction Criteria. Minsk, Gosstandart Publ., 2015. 34 (in Russian).
8. State Standard 10178–85. Portland Cement and Slag Portland Cement. Technical Specifications. Moscow, Standartinform Publ., 2008. 8 (in Russian).
9. State Standard 125–2018. Gypsum Binders. Technical Specifications. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 12 (in Russian).
10. STB EN 13263-1–2012. Microsilica for Concrete. Part 1. Definitions, Requirements and Eligibility Criteria. Minsk, Gosstandart Publ., 2012. 26 (in Russian).
11. State Standard 8735–88. Sand for Construction Work. Test Methods. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 34 (in Russian).
12. Babitskii V. V., Bondarovich A. I., Ryabchikov P. V. (2014) *Technology of Factory Production of Concrete and Reinforced Concrete Products*. Minsk, Belarusian National Technical University. 65 (in Russian).
13. STB 1112–98. Additives for Concrete. General specifications. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 1999. 36 (in Russian).
14. State Standard 12966–85. Technical Purified Aluminum Sulfate. Technical Specifications. Moscow, Publishing House “EPK Izdatelstvo Standartov”, 1999. 12 (in Russian).
15. STB 1114–98. Water for Concretes and Mortars. Technical Specifications. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 1999. 20 (in Russian).
16. State Standard 310.3–76. Cements. Methods for Determining Normal Density, Setting Time and Uniformity of Volume Change. Moscow, Publishing House of Standards, 1976. 12 (in Russian).

Поступила 20.06.2022

Подписана в печать 23.08.2022

Опубликована онлайн 30.09.2022

REFERENCES

1. *Additive Technology: Description, Definition, Application Features and Reviews. Additive Technology in the Industry*. Available at: <https://fb.ru/article/231049/additivnaya-tehnologiya-opisanie-opredelenie-osobennosti-primeneniya-i-otzyivyi-additivnyie-tehnologii-v-promyshlennosti> (in Russian).
2. *Review Article about Technology of 3D Construction*. Available at: <https://habr.com/ru/post/224299/> (in Russian).

Received: 20.06.2022

Accepted: 23.08.2022

Published online: 30.09.2022