

УДК 666.972:532.135

Хренов Георгий Михайлович

аспирант

Email: g.khrenov@mail.ru

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 190005, Россия, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4

Моделирование пластических свойств бетонной смеси¹

Аннотация

Постановка задачи. Цель исследования – разработать математическую модель пластичности мелкозернистой бетонной смеси, позволяющую расчетным путем определять предельную растяжимость смеси известного состава.

Результаты. Основные результаты исследования состоят в получении математической модели пластичности бетонной смеси, которая устанавливает зависимость предельной растяжимости от основных факторов и демонстрирует хорошие статистические показатели, а именно: коэффициент корреляции 0,997; среднюю ошибку аппроксимации 5,7 %.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в получении математической модели, позволяющей расчетным путем определять предельную растяжимость бетонной смеси известного состава, то есть не прибегая к испытанию, что может быть использовано при подборе состава бетонной смеси с целью обеспечения заданной пластичности.

Ключевые слова: бетонная смесь, непрерывное безопалубочное формование, реология, пластичность, предельная растяжимость.

Для цитирования: Хренов Г. М. Моделирование пластических свойств бетонной смеси // Известия КГАСУ. 2021. № 1 (55). С. 49–57. DOI: 10.52409/20731523_2021_1_49.

1. Введение

Существующие сегодня технологии непрерывного безопалубочного формования бетонных и железобетонных изделий и конструкций, такие как слип-формование, виброформование, непрерывное вибропрессование и особенно технология трёхмерной печати, приобретают всё больший научный и практический интерес [1-4]. Для развития и распространения указанных способов формования решается широкий круг технологических и материаловедческих задач, к числу которых можно отнести следующие: снижение расхода цемента, повышение точности позиционирования экструдера, снижение экзотермии, эффективное регулирование реологических характеристик смесей и др. [3-7]. При этом критически важным является решение вопросов, связанных с реологическими и технологическими характеристиками бетонных смесей, без чего невозможно не только улучшение качества продукции и повышение экономической эффективности, но и существование некоторых технологий в принципе [8-12].

Установлено [12], что одной из наиболее актуальных задач является регулирование пластических свойств бетонных смеси, которые отвечают за процесс трещинообразования несхватившегося свежотформованного изделия вследствие внешних механических воздействий. В настоящее время уже сформирована инструментальная база для проведения исследований в данной области, а именно разработан метод и прибор для определения пластичности бетонных смесей по её предельной растяжимости (ϵ^{np} , мм/м), то есть по максимальному относительному удлинению бетонной смеси, при котором не нарушается её сплошность [13]. Однако исчерпывающих представлений о влиянии различных факторов на пластические свойства до сих пор нет.

¹Статья подготовлена по результатам исследования, выполненного в соответствии с Планом фундаментальных научных исследований Минстроя России и РААСН на 2021 год (тема «Развитие научных и практических основ получения строительных изделий и конструкций непрерывным безопалубочным формованием»).

Известно, что характеристику вязко-пластических свойств бетонной смеси во многом определяет цементное тесто, от количества и свойств которого зависит реологические свойства смеси [12]. Несмотря на то, что влияние свойств цемента и характеристик цементного теста на вязкость хорошо известно, их вклад в формирования пластических свойств остаётся недостаточно изученным, многочисленные данные остаются разрозненными, а полученные закономерности не учитывают взаимовлияния факторов. Исходя из этого, сформулирована цель данного исследования – разработать математическую модель пластичности мелкозернистой бетонной смеси, позволяющую расчетным путем определять предельную растяжимость смеси известного состава.

Объект исследования – мелкозернистые бетонные смеси для непрерывного безопалубочного формования.

Предмет исследования – пластические свойства мелкозернистых бетонных смесей для непрерывного безопалубочного формования.

2. Материалы и методы

Разработка математической модели пластичности бетонных смесей осуществлялась методами регрессионного анализа на основе данных, полученных в ранее проведенных исследованиях [14, 15], в которых рассматривалось влияние свойств цемента, водоцементного отношения, объёмной доли цементного теста в смеси (φ^{um} , %) на предельную растяжимость бетонной смеси. На данный момент уже имеются промежуточные результаты и выводы, которые используются в данной статье.

В указанных исследованиях использовались материалы, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Используемые материалы

Показатель	Значение			
Цементы				
Номер цемента	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Марка цемента	ЦЕМ I 52,5 Н	ЦЕМ I 52,5 Н	ЦЕМ I 42,5 Б	ЦЕМ I 42,5 Н
Нормальная плотность, %	25,4	28	30	27,1
Удельная поверхность по Блейну, м ² /кг	390	281	320	292
Средняя активность в возрасте 2 суток, МПа	23,9	17,5	23,1	24,1
Средняя активность в возрасте 28 суток, МПа	52,4	53,1	48,8	49,3
Пески				
Номер песка	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Модуль крупности	2,7	2,4	2,1	2,2
Водопоглощение, %	4,5	5,9	6,7	6,5
Насыпная плотность, кг/м ³	1548	1622	1554	1543
Плотность зерен, кг/м ³	2651	2642	2674	2620
Вода для бетонов и строительных растворов по ГОСТ 23732-2011				

Характеристики песка определялись по ГОСТ 8735-88, водопоглощение песка определялась по методике, предложенной Ю.М. Баженовым и Б.Г. Скрамтаевым [18]. Характеристики цементов определялись в соответствии с требованиями ГОСТ 31108-2016. Предельная растяжимость бетонной смеси определялась по [13]. Объёмная доля цементного теста в смеси определялась по формулам (1)-(2):

$$\varphi^{ur} = 100\% - \varphi^{II}; \quad (1)$$

$$\varphi^{II} = \frac{\Pi}{\rho^{II}} \cdot 100\%; \quad (2)$$

где φ^{ur} – объёмная доля цементного теста в смеси, %; φ^{II} – объёмная доля песка в смеси, %; Π – расход песка на м³ бетонной смеси, кг; ρ^{II} – плотность зёрен песка, кг/м³.

В качестве характеристики пластичности используется предельная растяжимость бетонной смеси, определялась по методике, описанной в [13]. Суть данной методики состоит в экспериментальном определении предельной растяжимости смеси путем изгибания свежееотформованного образца – балки $7 \times 7 \times 28$ см до образования в его растянутой зоне видимых трещин, измерении прогиба образца и пересчете прогиба в относительное удлинение растянутой зоны, что и является предельной растяжимостью смеси.

3. Результаты

Полученные в предыдущих исследованиях [14, 15] экспериментальные данные с использованием цемента № 1, 2, 3 и песков № 1, 2, 3 (табл. 1) можно представить в виде двух полей точек (рис. 1-2).

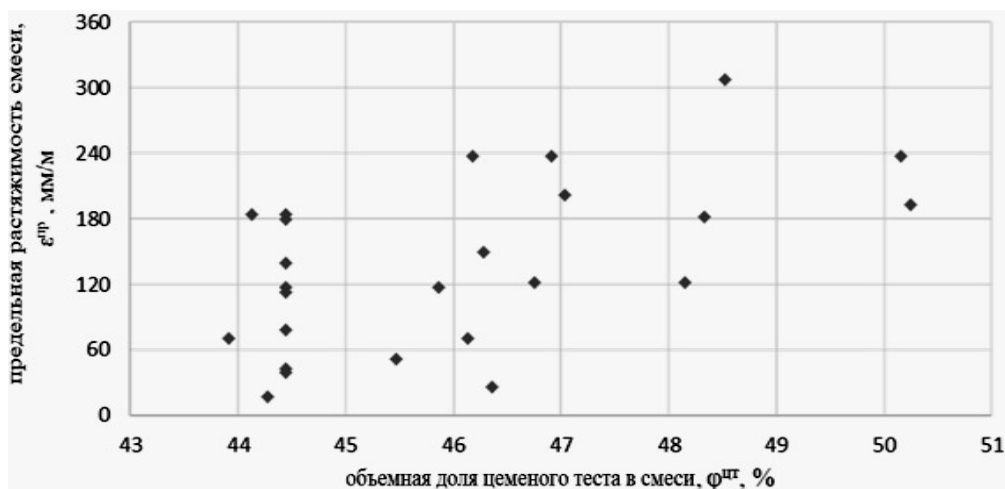


Рис. 1. Экспериментальные значения предельной растяжимости бетонных смесей, ε^{np} , в зависимости от объема цементного теста, $\varphi^{шт}$ (иллюстрация автора)

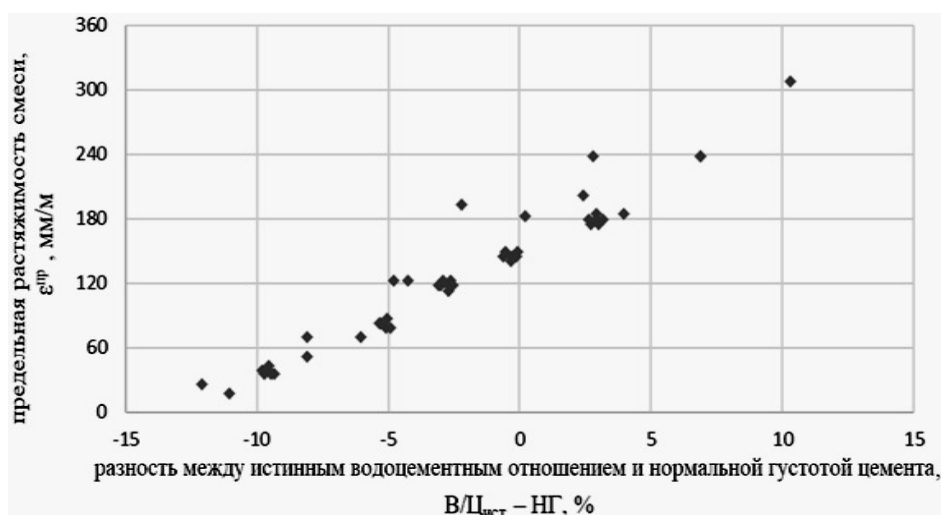


Рис. 2. Экспериментальные значения предельной растяжимости бетонных смесей, ε^{np} , в зависимости от разности водоцементного отношения и нормальной густоты цементного теста ($V/C - НГ$) (иллюстрация автора)

При помощи методов регрессионного анализа была получена регрессионная модель (РМ) пластичности бетонной смеси (3):

$$\varepsilon^{np} = 11,38 \cdot V/C_{ист} - 4,586 \cdot НГ + 12,185 \cdot \varphi^{шт} - 590, \quad (3)$$

где ε^{np} – предельная растяжимость бетонной смеси, мм/м; $V/C_{ист}$ – истинное водоцементное отношение в %; $НГ$ – нормальная густота цементного теста в %; $\varphi^{шт}$ – объёмная доля цементного теста в смеси в %.

Для учета нелинейного характера влияния объемной доли ЦТ в смеси и совместного влияния нормальной плотности цемента и истинного водоцементного отношения, что было установлено в более ранних исследованиях [14, 15], была произведена корректировка РМ с получением усовершенствованной регрессионной модели (УРМ) (4):

$$\varepsilon^{np} = 11,7 \cdot (V/P_{ист} - НГ) + 0,032 \cdot (\varphi^{шт} - 37)^3 + 137, \quad (4)$$

где ε^{np} – предельная растяжимость бетонной смеси, мм/м; $V/P_{ист}$ – истинное водоцементное отношение в %; НГ – нормальная плотность цементного теста в %; $\varphi^{шт}$ – объемная доля цементного теста в смеси в %.

В качестве альтернативы регрессионным моделям, которые чаще всего не отражают физического смысла описываемых процессов и свойств, предлагается так же рассмотреть качественно-количественную модель (ККМ) (5):

$$\varepsilon^{np} = \varepsilon^{шт} \cdot K^{\varphi}, \quad (5)$$

где ε^{np} – предельная растяжимость бетонной смеси, мм/м; $\varepsilon^{шт}$ – предельная растяжимость цементного теста в смеси, мм/м; K^{φ} – коэффициент, учитывающий объемную долю цементного теста в смеси.

Предельная растяжимость цементного теста в смеси зависит от разницы между истинным водоцементным отношением и нормальной плотностью, что описывается с большой точностью (6):

$$\varepsilon^{шт} = 11,7 \cdot (V/P_{ист} - НГ) + 358,4, \quad (6)$$

где $\varepsilon^{шт}$ – предельная растяжимость цементного теста в смеси, мм/м; $V/P_{ист}$ – истинное водоцементное отношение, %; НГ – нормальная плотность цемента, %.

По (7) можно определить значение поправочного коэффициента K^{φ} , который учитывает объемную долю цементного теста в смеси:

$$K^{\varphi} = (0,053 \cdot \varphi^{шт} - 2,2)^2 + 0,38, \quad (7)$$

где K^{φ} – коэффициент, учитывающий объемную долю цементного теста в смеси; $\varphi^{шт}$ – объемная доля цементного теста в смеси в %.

Для проверки адекватности и сравнительной оценки полученных математических моделей был проведен статистический анализ с определением следующих показателей: коэффициента корреляции, средней ошибки аппроксимации, среднего абсолютного отклонения, максимального относительного отклонения, максимального абсолютного отклонения, количества относительных отклонений больше 10 %, количества абсолютных отклонений больше 10 мм/м. Данные показатели определялись путем сравнения экспериментальных значений с расчётными и представлены в табл. 2.

Таблица 2

Статистические показатели полученных математических моделей

Показатель	Величина показателя		
	РМ	УРМ	ККМ
Коэффициент корреляции	0,95	0,99	0,9
Средняя ошибка аппроксимации, %	17	6	59
Среднее абсолютное отклонение, мм/м	18,8	6,82	37,49
Максимальное относительное отклонение, %	86	25	932
Максимальное абсолютное отклонение, мм/м	54,73	48,98	84,78
Число отклонений больше 10%	23 из 50	9 из 50	40 из 50
Число отклонений больше 10 мм/м	24 из 50	9 из 50	42 из 50

4. Обсуждение

В проведенных ранее исследованиях пластических свойств бетонных смесей [14, 15] уже получены некоторые выводы, которые необходимо учитывать при сравнении математических моделей пластичности:

1. Экспериментально установлено, что удельная поверхность цемента не оказывает заметного влияния на предельную растяжимость смеси, однако влияет на коэффициент

выхода смеси. При изменении коэффициента выхода смеси меняются другие факторы, влияющие на пластичность смеси. Так же установлено, что с увеличением нормальной густоты цементного теста предельная растяжимость смеси падает по линейному закону [14].

2. С увеличением В/Ц предельная растяжимость бетонной смеси возрастает по линейному закону. Несмотря на то, что В/Ц оказывает явное влияние на пластичность смеси, в качестве фактора следует рассматривать истинное водоцементное отношение ($V/C_{ист}$, %). Такое решение позволяет учесть влияние водопотребности заполнителей на свойства цементного теста [14].

3. Изменение объёмной доли цементного теста в смеси позволяет регулировать предельную растяжимость в широких пределах, при этом, с увеличением $\phi^{ит}$ нелинейно возрастает ϵ^{np} [15].

Помимо вышеизложенного следует отметить, что корректнее рассматривать совместное влияние нормальной густоты и истинного водоцементного отношения на предельную растяжимость, связано это с их значимым взаимовлиянием. С увеличением нормальной густоты, для сохранения прочих свойств смеси, необходимо увеличивать и истинное водоцементное отношение. В связи с чем целесообразнее рассматривать их разницу ($V/C_{ист} - НГ$, %) [14].

Проведенный статистический анализ и сравнение трех разработанных математических моделей показал, что все они демонстрируют высокий коэффициент корреляции между расчётными и фактическими значениями, при этом наивысший коэффициент корреляции показала усовершенствованная регрессионная модель (4).

Регрессионная модель (3) демонстрирует слабые показатели по количеству отклонений больше 10 % и больше 10 мм/м, а также критически высокую среднюю ошибку аппроксимации (больше 7 %), что делает эту модель непригодной для практического использования. Вероятнее всего, это вызвано тем, что она рассматривает $V/C_{ист}$ и НГ как отдельные факторы, а также не учитывает нелинейное влияние ϕ^{um} , что противоречит полученным ранее выводам.

Полученная ККМ отражает принцип формирования пластичности бетонной смеси, который заключается в наличие пластических свойств у цементного теста, и отсутствии таковых у заполнителя. Заполнитель выступает отошающим компонентом, который снижает объёмную концентрацию цементного теста в смеси и таким образом понижает её способность к бездефектному деформирования. Предельная растяжимость цементного теста в свою очередь зависит не только от нормальной густоты и водоцементного отношения, но и от водопотребности заполнителя, который, абсорбируя воду из ЦТ, снижает его растяжимость. Однако, не смотря на наличие связи математического и физического смысла, такая модель не может быть рекомендована для практического применения, так как демонстрирует неудовлетворительные статистические показатели. Несмотря на высокий коэффициент корреляции, прочие показатели значительно превышают допустимые значения, в частности наблюдается заметное количество отклонений превышающих 10 мм/м и 10 %, а величина некоторых отклонения превышает 900 %.

Усовершенствованная регрессионная модель (4) демонстрирует наилучшие показатели по всем пунктам, а средняя ошибка аппроксимации в 6 % говорит о хорошо подобранной и качественно обчисленной математической модели. Связано это с тем, что она учитывает нелинейное влияние объёма цементного теста и совместное влияние НГ и $V/C_{ист}$ через введённый показатель ($V/C_{ист} - НГ$, %).

Таким образом, среди рассмотренных математических моделей наилучшей сходимостью, согласно основным статистическим показателям, характеризуется усовершенствованная регрессионная модель (4). Это позволяет использовать ее для оценки предельной растяжимости бетонной смеси известного состава, не прибегая к испытанию, что может быть полезным при проектировании состава бетона.

Пример использования математической модели. В качестве примера использования УРМ рассмотрим следующую задачу: рассчитать предельную растяжимость бетонной смеси известного состава (табл. 3).

Таблица 3

Состав мелкозернистой бетонной смеси для примера расчета предельной растяжимости по математической модели пластичности

Компонент	Расход на м ³ бетонной смеси, кг
Цемент № 4 по табл. 1	600
Песок № 4 по табл. 1	1400
Вода по табл. 1	250

Решение:

1) Определим истинное водоцементное отношение по (8):

$$V/P_{\text{ист}} = \frac{V - V^{\text{п}} \cdot \Pi}{\text{Ц}} \cdot 100\% = \frac{160 - 0,065 \cdot 1400}{600} = 26,5\%; \quad (8)$$

где $V/P_{\text{ист}}$ – истинное водоцементное отношение, %; V – расход воды на м³ бетонной смеси, кг; Π – расход песка на м³ бетонной смеси, кг; Ц – расход цемента на м³ бетонной смеси, кг; $V^{\text{п}}$ – водопотребность песка в долях.

2) Определим объемную долю цементного теста в смеси. Точный численный расчёт затруднён по ряду причин. Во-первых, плотность цементного теста сильно зависит от истинного водоцементного отношения и от интенсивности перемешивания смеси, в связи с чем точно рассчитать долю через расход цемента и воды достаточно сложно. Во-вторых, объёмная доля заполнителя, рассчитать которую возможно с большой точностью, не всегда строго связана с долей цементного теста, что может быть вызвано заниженным расходом цемента, не подходящей гранулометрией заполнителя и т.д. Однако, для технологий непрерывного безопалубочного формования характерны смеси с высоким расходом цемента, что позволяет рассчитать долю ЦТ в смеси через долю песка по (1)-(2). При плотности зёрен песка 2620 кг/м³ объёмная доля заполнителя равняется 53,4 %, а объёмная доля ЦТ составляет 46,6 %.

3) Определим предельную растяжимость бетонной смеси с помощью УРМ.

Полученные значения $V/P_{\text{ист}} = 26,5$ % и $\varphi^{\text{тр}} = 46,6$ %, а также НГ для цемента № 4 равную 27,1 % подставляем в (4) и получаем значение предельной растяжимости равное 158 мм/м

Ответ: 158 мм/м

Приведенный способ расчёта предельной растяжимости, основанный на общих представлениях о структуре бетонной смеси и на разработанной математической модели, согласуется с выводами других исследований [14, 15] в этой области и рекомендуется для корректной оценки предельной растяжимости мелкозернистой бетонной смеси известного состава. Однако следует отметить, что справедливость полученной модели подтверждена только для бездобавочных мелкозернистых бетонных смесей, она требует дальнейшего уточнения и развития.

5. Заключение

1. Разработана математическая модель влияния объёмной доли цементного теста и совместного влияния нормальной густоты цементного теста и истинного водоцементного отношения на предельную растяжимость мелкозернистой бетонной смеси (уравнение 4);

2. Полученная модель при сравнении с экспериментальными данными демонстрирует хорошие статистические показатели, а именно: коэффициент корреляции 0,997; среднюю ошибку аппроксимации 6 %, а также согласуется с общими представлениями о структуре и свойствах бетонных смесей и с результатами других исследований пластичности бетонных смесей;

3. Модель можно использовать для оценки предельной растяжимости расчетным путем, то есть не прибегая лабораторному испытанию, что может быть полезно при подборе состава бетонной смеси;

4. Справедливость полученной модели установлена лишь для бездобавочных мелкозернистых бетонных смесей, она требует дальнейшего уточнения и развития, в том числе для смесей, модифицированных различными минеральными и химическими добавками.

Список библиографических ссылок

1. Вагнер Е. С., Супруненко Е. Ю. Безопалубочное формование как перспективная технология производства ЖБИ // Достижения ВУЗовской науки. 2014. № 9. С. 108–113.
2. Копша С. П., Заикин В. А. Технология безопалубочного формования – ключ к модернизации промышленности и снижению себестоимости жилья // Технологии бетонов. 2013. № 11. С. 29–33.
3. Asprone D., Auricchio F., Menna C. 3D-printing of reinforced concrete elements: Technology and design approach // J. Construction and Building Materials. 2018. № 165 P. 218–231. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.018.
4. Duballeta R., Baverela O., Dirrenberger J. Classification of building systems for concrete 3D printing // J. Automation in Construction. 2017. Vol. 83 P. 247–258. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.08.018.
5. Khalil N., Aouad G., Rémond S. et al. Use of calcium sulfoaluminate cements for setting control of 3D-printing mortars // J. Construction and Building Materials. 2017. Vol. 157. P. 382–391. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.109.
6. Paul S. C., Tay Y. W. D., Panda B., et al. Fresh and hardened properties of 3D-printable cementitious materials for building and construction // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2018. № 18 (1). P. 311–319. DOI: 10.1016/j.acme.2017.02.008.
7. Perrot A., Rengeard D., Pierre A. Structural build-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques // J. Materials and Structures. 2016. Vol. 49. P. 1213–1220. DOI: 10.1617/s11527-015-0571-0.
8. Славчева Г. С., Артамонова О. В. Реологическое поведение дисперсных систем для строительной 3D-печати: проблема управления и возможности арсенала «нано» // Нанотехнологии в строительстве. 2018. Том 10. № 3. С. 107–122.
9. Рыжов Д. И. Применение наномодифицированных добавок для железобетонных изделий // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 6(53). С. 146–150.
10. Мосаков Б. С., Пухаренко Ю. В. Задачи технологической механики как составной части строительного материаловедения // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 2 (55). С. 127–131.
11. Хренов Г. М., Рерих А. В. Дисперсное армирование как возможный инструмент регулирования пластичности бетонных смесей // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения: материалы Международных академических чтений. 2019. С. 45–53.
12. Пухаренко Ю. В., Хренов Г. М. Задачи технологической механики в развитии способов безопалубочного формования // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 6 (65). С. 152–157.
13. Хренов Г. М. Метод определения пластичности бетонных смесей // Вестник гражданских инженеров. 2018. № 2 (67). С. 147–154.
14. Хренов Г. М. Влияние тонкости помола цемента на пластичность бетонной смеси // Актуальные проблемы строительства : сб. ст. 71-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых в 3-х ч. 2018. Ч. 2. С. 87–92.
15. Хренов Г. М. Влияние объемной доли цементного теста на пластичность бетонной смеси // Архитектура-строительство-транспорт: материалы 74-й научной конференции профессорско-преподавательского состава университета в 2-х ч. 2018. Ч. 1. С. 138–141.
16. Баженов Ю. М. Технология бетона. М. : АСВ, 2007. 528 с.

Khrenov Georgy Mikhailovich

post-graduate student

Email: g.khrenov@mail.ru

Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

The organization address: 190005, Russia, St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya st., 4

Modelling of concrete mixture plastic properties

Abstract

Problem statement. The purpose of the study is to develop a mathematical model of the plasticity of a fine-grained concrete mixture, which allows calculating the ultimate tensile strength of the mixture of known composition.

Results. The main results of the study are obtaining a mathematical model of the plasticity of the concrete mixture, which establishes the dependence of the ultimate tensile strength on the main factors and demonstrates good statistical indicators, namely: the correlation coefficient is 0,997; the average approximation error is 5,7 %.

Conclusions. The significance of the results for the construction industry consists in obtaining a mathematical model that allows calculating the ultimate tensile strength of a concrete mixture of known composition without resorting to testing, which can be used in designing the composition of a concrete mixture in order to ensure given plasticity.

Keywords: concrete mixture, continuous formwork-free shaping, rheology, plasticity, ultimate tensile strength.

For citation: Khrenov G. M. Modelling of concrete mixture plastic properties // Izvestija KGASU. 2021. № 1 (55). P. 49–57. DOI: 10.52409/20731523_2021_1_49.

References

1. Wagner E. S., Suprunenko E. Yu. Formworkless molding as a promising technology for the production of reinforced concrete products // Dostizheniya vuzovskoy nauki. 2014. № 9. P. 108–113.
2. Kopsha S. P., Zaikin V. A. Technology of form-less molding – the key to modernizing the industry and reducing the cost of housing // Technologii betonov. 2013. № 11. P. 29–33.
3. Asprone D., Auricchio F., Menna C. 3D-printing of reinforced concrete elements: Technology and design approach // J. Construction and Building Materials. 2018. № 165 P. 218–231. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.018.
4. Duballeta R., Baverela O., Dirrenberger J. Classification of building systems for concrete 3D-printing // J. Automation in Construction. 2017. Vol. 83 P. 247–258. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.08.018.
5. Khalil N., Aouad G., Rémond S. et al. Use of calcium sulfoaluminate cements for setting control of 3D-printing mortars // J. Construction and Building Materials. 2017. Vol. 157. P. 382–391. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.109.
6. Paul S. C., Tay Y. W. D., Panda B. Fresh and hardened properties of 3D-printable cementitious materials for building and construction // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2018. № 18 (1). P. 311–319. DOI: 10.1016/j.acme.2017.02.008.
7. Perrot A., Rängeard D., Pierre A. Structural build-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques // J. Materials and Structures. 2016. Vol. 49. P. 1213–1220. DOI: 10.1617/s11527-015-0571-0.
8. Slavcheva G. S., Artamonova O. V. Rheological behavior of dispersed systems for construction 3D-printing: the problem of control and the possibilities of the «nano» arsenal // Nanotechnologii v stroitel'stve. 2018. Vol. 10. № 3. P. 107–122.
9. Ryzhov D. I. Application of nanomodified additives for reinforced concrete products // Vestnik grazhdanskich inzhenerov. 2015. № 6 (53). P. 146–150.
10. Mosakov B. S., Pukharenko Yu. V. Problems of technological mechanics as an integral part of building materials science // Vestnik grazhdanskich inzhenerov. 2016. № 2 (55). P. 127–131.
11. Khrenov G. M., Roerich A. V. Dispersed reinforcement as a possible tool for regulating plasticity of concrete mixtures // Bezopasnost stroitel'nogo fonda Rossii. Problemy i resheniya: Materials of International Academic Readings. 2019. P. 45–53.

12. Pukharenko, Yu. V., Khrenov G. M. Problems of Technological Mechanics in the Development of Form-Free Forming Methods // Vestnik grazhdanskich inzhenerov. 2017. № 6 (65). P. 152–157.
13. Khrenov G. M. Method for determining the plasticity of concrete mixtures // Vestnik grazhdanskich inzhenerov. 2018. № 2 (67). P. 147–154.
14. Khrenov G. M. Influence of the fineness of cement grinding on the plasticity of concrete mixture // Actualnii problemie stroitelstva: materials of the 71st All-Russian scientific-practical conference of students, graduate students and young scientists in 3 parts. 2018. Part 2. P. 87–92.
15. Khrenov G. M. Effect of the volume fraction of cement paste on the plasticity of concrete mixture // Architectura-stroitelstvo-transport: materials of the 74th scientific conference of the university faculty in 2 parts. 2018. Part 1. P. 138–141.
16. Bazhenov Yu. M. Concrete technology. M. : ASV, 2007. 528 p.