УДК 666.972:532.135

© Г. М. Хренов, аспирант
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: g.khrenov@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-2-147-154

© G. M. Khrenov, post-graduate student
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: g.khrenov@mail.ru

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛАСТИЧНОСТИ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ¹

METHOD OF DETERMINING THE CONCRETE MIXTURE PLASTICITY

Рассмотрена разработка метода определения пластичности малоподвижных бетонных смесей, используемых при непрерывном безопалубочном формовании. Предложен оригинальный способ определения пластичности путем изгибания свежесформованного несхватившегося образца до образования трещин на наружной поверхности. Для осуществления предложенного метода сконструирован и изготовлен прибор, отличительной чертой которого является гибкая оснастка, позволяющая изгибать образец, обеспечивая равномерное растяжение бетонной смеси на значительном участке наружной поверхности образца, что подтверждено экспериментально. Введен параметр оценки пластичности «предельная растяжимость бетонной смеси», а также разработана и отлажена методика проведения испытания по определению данного параметра. Проведены первые исследования по влиянию расхода цемента и наномодифицированного пластификатора на пластичность мелкозернистой бетонной смеси, подтверждающие работоспособность и точность разработанного метода.

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

The article is devoted to the development of a method of determining the plasticity of low-mobile concrete mixtures used in continuous formless molding. An original technique of assessing the plasticity is proposed, involving the bending of a freshly molded unset sample until cracking starts on the external surface. To implement the proposed method, an instrument is designed and manufactured, a distinctive feature of which is flexible equipment that allows bending the sample, providing uniform stretching of the concrete mixture on a significant portion of the external surface of the sample, which is confirmed experimentally. The parameter of plasticity evaluation «ultimate tensibility of concrete mix» is introduced, and the test procedure for determining this parameter has been developed. The first studies on the effect of cement consumption and nano-modified plasticizer on the plasticity of fine-grained concrete mixture confirming the operability and accuracy of the developed method were carried out.

Keywords: continuous formless molding, low-mobile concrete mixture, rheology, plasticity, ultimate tensibility of concrete mix.

Введение

В настоящее время технологии непрерывного безопалубочного формования получили сильное развитие по всему миру и продолжают активно совершенствоваться. Способствуют этому очевидные преимущества данных способов формования, такие как низкая металлоемкость производства, высокая степень автоматизации и роботизации технологических процессов, яркий экономический эффект с сохранением высоко-

го качества продукции [5, 6, 10–13]. Уже сейчас совокупность всех способов непрерывного безопалубочного формования позволяет выпускать широкую номенклатуру изделий, а с учетом развития аддитивных технологий в обозримом будущем не видится вообще каких-либо ограничений по геометрии бетонных и железобетонных изделий и конструкций. Однако, несмотря на перечисленные достоинства, указанные технологии наделены и недостатками, такими как повышенный расход цемента, высокая экзотермия, недостаточное качество поверхности и т. д. [10, 11].

¹ Результаты, приведенные в данной статье, получены в ходе реализации научного проекта при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации и Комитета по науке и высшей школе Правительства Санкт-Петербурга.

Одной из наиболее актуальных проблем при непрерывном безопалубочном формировании является процесс трещинообразования свежесформованных несхватившихся изделий в результате внешних механических воздействий. Установлено [9], что за наличие или отсутствие данного явления в определенных условиях формирования отвечает главным образом пластичность — фундаментальное реологическое свойство малоподвижных бетонных смесей.

Целенаправленное управление свойствами бетонных смесей осуществляется при помощи различных моделей, за формирование и развитие которых отвечают отдельные области науки: реология бетонных смесей, технологическая механика. Современные технологические модели не позволяют не только управлять пластичностью бетонных смесей, но и даже оценивать ее^{2,3} [3, 4, 7, 8]. Причиной тому может быть ограниченная связь данных моделей с реологическими представлениями [1, 2], однако и в реологии бетонных смесей не удается найти исследований, посвященных пластическим свойствам [3, 4, 8]. Другими словами, сегодня нет ни инструментальной базы, ни моделей, ни даже рекомендаций по управлению пластичностью бетонных смесей [9], что вместе с современными задачами относительно безопалубочных способов формирования и формирует **цель данной работы**: разработать метод определения пластичности малоподвижных бетонных смесей и сконструировать прибор для его осуществления.

Принцип определения пластичности бетонных смесей

На основе представлений о механизме образования трещин в теле свежесформованного изделия [9], в соответствии с которыми трещины возникают и развиваются в результате деформаций растяжения от различных механических воздействий, очевидно, что для определения пластичности необходимо моделировать процесс растяжения свежесформованной и уплотненной бетонной смеси. В качестве параметра оценки пластичности в данном случае может выступать то относительное удлинение бетонной смеси, при котором произошел разрыв сплошно-

сти. При этом для получения достоверных и воспроизводимых результатов должны быть соблюдены следующие условия:

- 1) достаточная база испытания. База испытаний должна соответствовать возможностям распространенных и доступных измерительных инструментов, таких как линейка и штангенциркуль;
- 2) деформация бетонной смеси по всей длине базы должна быть максимально равномерна;
- 3) процесс трещинообразования должен быть отчетливо виден.

В связи с данными условиями моделирование процесса растяжения бетонной смеси путем ее линейного удлинения не представляется возможным по следующим причинам. Во-первых, при линейном удлинении бетонной смеси необходимо прикладывать распределенную нагрузку, поскольку деформации растяжения в бетонной смеси распространяются не более чем на 20 мм от места приложения нагрузки (по результатам предварительных исследований). Во-вторых, в местах приложения нагрузки для растяжения будут образовываться структурные дефекты, провоцирующие образование и развитие трещин вблизи точек приложения нагрузок. Поэтому для моделирования растяжения бетонной смеси путем ее линейного удлинения необходимо разработать и изготовить прибор сложной конструкции, что не гарантирует соблюдения третьего условия достоверности и воспроизводимости получаемых данных.

С учетом вышесказанного предлагается не растягивать свежесформованный образец, а равномерно его изгибать (рис. 1). В данном случае в качестве измеряемой величины служит прогиб образца h , который можно легко измерить с достаточной точностью. Равномерный изгиб обеспечивает равномерность растяжения бетонной смеси по наружной поверхности образца, а открытая наружная сторона позволяет наглядно наблюдать процесс образования и раскрытия трещин, что и позволяет выполнить все три условия достоверности и воспроизводимости результатов.

Прибор для определения пластичности бетонной смеси

Конструкция прибора должна обеспечивать возможность осуществления предложенного ме-

² ГОСТ 10181–2014. Смеси бетонные. Методы испытаний. М.: Стандартинформ, 2015. 25 с.

³ ГОСТ 7473–2010. Смеси бетонные. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2011. 20 с.

Рис. 1. Принципиальная схема испытания

тогда, что выражается в соблюдении следующих условий:

- 1) возможность точно измерять величину прогиба образца;
- 2) управлять скоростью изменения прогиба;
- 3) испытывать бетонные смеси с различной крупностью заполнителя;
- 4) уплотнять бетонную смесь до состояния, приближенного к состоянию при непрерывном безопалубочном формовании.

В соответствии с предъявленными требованиями был сконструирован и изготовлен (рис. 2) необходимый прибор.

Главной отличительной чертой данного прибора является гибкая оснастка, изготовленная из листовой оцинкованной стали толщиной 0,8 мм. Наружные габариты оснастки 70×70×280 мм. Данный элемент воспринимает перемещение штока средней частью, при этом установленные по краям оснастки стропы препятствуют его перемещению. Таким образом, линейное перемещение штока преобразуется в изгибание оснастки, которая выполняет функцию передачи собственных деформаций к телу отформованного образца и обеспечивает равномерное растяжение его наружной поверхности.

Гипотезы и допущения

Важнейшим условием осуществления разрабатываемого метода является равномерное растяжение бетонной смеси на значительном участке, исходя из чего и формируется следующая гипотеза: на значительном участке наружной поверхности свежеотформованного образца в процессе его изгибания происходит равномерное растяжение бетонной смеси.

Для проверки данной гипотезы был поставлен следующий эксперимент.

В соответствии со схемой (рис. 3) в тело свежеотформованного образца было установлено

Рис. 2. Прибор для определения пластичности бетонной смеси: 1 — станина прибора; 2 — силовой элемент; 3 — вороток; 4 — стропы; 5 — съемная форма; 6 — винтовой шток; 7 — поверхность скольжения; 8 — гибкая оснастка

Рис. 3. Схема расположения пикетов в теле свежеотформованного образца (вид сверху)

14 пикетов. Для проверки равномерности деформации в процессе изгиба штангенциркулем измерялось расстояние между пикетами. Полученные данные представлены в табл. 1.

Анализируя полученные данные, можно заключить, что на участке от 2-го до 13-го пикета до образования трещин бетонная смесь растягивается равномерно. После образования двух трещин расстояние менялось лишь между 5-м и 6-м пикетами и между 9-м и 10-м пикетами, то есть в тех местах, где и произошел разрыв сплошности. В соответствии с полученными данными можно с уверенностью сказать, что бетонная смесь на участке формирования и образования трещин деформируется равномерно до разрыва сплошности. При этом величина участка составляет 230 мм, что достаточно для соблюдения всех указанных ранее требований.

С учетом особенностей сконструированного прибора и представлений о механизме формирования и развития трещин в теле свежеотформованного изделия предложенный метод имеет следующие допущения:

1) трение между образцом и поверхностью скольжения не провоцирует и не препятствует процессу трещинообразования;

2) скорость изменения прогиба в пределах, соблюдаемых без дополнительных средств (от 0,5 до 1,5 мм/с), не влияет на величину относительного удлинения, при котором образуются трещины.

Параметр оценки пластичности бетонных смесей и методика проведения испытания

Предлагается ввести параметр, отражающий относительные деформации растяжения, необходимые для возникновения трещин. Обзор литературных источников [3, 4, 8] не позволил найти подходящего по смыслу параметра для бетонной смеси среди существующих. Однако для оценки способности бетона деформироваться без образования трещин используется параметр «предельная растяжимость бетона», что наиболее близко по смыслу к предлагаемому методу определения пластичности. В связи с этим предлагается ввести параметр «предельная растяжимость бетонной смеси» для оценки относительных деформаций растяжения бетонной смеси, при которых нарушается сплошность.

Предельная растяжимость бетонной смеси ($\epsilon^{пр}$ в мм/м) — это то относительное удлинение бетонной смеси, при котором происходит разрыв ее сплошности.

Однако предложенный метод предполагает в качестве измеряемой величины критический прогиб образца $h^{кр}$ (тот прогиб, при котором образовались трещины), а значит необходимо разработать модель по преобразованию измеренно-

Таблица 1

Расстояния между пикетами при различных прогибах

Прогиб, мм	Расстояние между пикетами, мм												
	1 и 2	2 и 3	3 и 4	4 и 5	5 и 6	6 и 7	7 и 8	8 и 9	9 и 10	10 и 11	11 и 12	12 и 13	13 и 14
0	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
5	20,4	20,7	20,7	20,7	20,7	20,7	20,7	20,7	20,7	20,7	20,7	20,7	20,4
15	21,2	22,1	22,2	22,1	22,1	22,2	22,2	22,2	22,1	22,2	22,1	22,2	21,2
20	21,6	22,9	22,9	22,8	22,9	22,9	22,8	22,9	22,9	22,9	22,9	22,8	21,6
Образовались две трещины при прогибе 22 мм													
25	21,8	23,2	23,2	23,1	25,5	23,2	23,2	23,2	25,6	23,1	23,2	23,2	21,8

го критического прогиба в предельную растяжимость.

Для этого решим упрощенную задачу (рис. 4).

В представленной задаче известны следующие величины: $AB = 280$ мм — размер большей стороны гибкой оснастки; $AB = \text{const}$ на протяжении всего испытания (изменяется форма, но длина постоянна); $BC = DA = 70$ мм — размер боковой стороны гибкой оснастки, также постоянен на протяжении всего испытания (как размер, так и форма); $DD' = CC' = 25$ мм = const — зона, в которой бетонная смесь не деформируется; $L = 230$ мм — база испытания (участок равномерного растяжения); $L' = 280$ мм — длина отрезка DC до начала испытания. Величина $h^{\text{кр}}$ является аргументом. Необходимо выразить $\epsilon^{\text{пр}}$ в мм/м через $h^{\text{кр}}$ (критический прогиб) в мм.

Решение:

$$\mu^{\text{пр}} = \frac{D'C' - L}{L} 1000 \text{ мм}; \quad (1)$$

$$D'C' = DC - (L' - L); \quad (2)$$

$$DC = \frac{\pi \cdot R^{OC} \cdot \alpha^\circ}{180^\circ}; \quad (3)$$

$$R^{OC} = R^{OB} + BC; \quad (4)$$

$$R^{OB} = \frac{AB \cdot 180^\circ}{\pi \cdot \alpha^\circ}; \quad (5)$$

$$h^{\text{кр}} = R^{OB} (1 - \cos \frac{\alpha^\circ}{2}); \quad (6)$$

$$h^{\text{кр}} = \frac{AB \cdot 180^\circ}{\pi \cdot \alpha^\circ} (1 - \cos \frac{\alpha^\circ}{2}); \quad (7)$$

В уравнении (7) невозможно аналитически выразить угол α через величину прогиба $h^{\text{кр}}$, а

Рис. 4. Схема к упрощенной задаче пересчета критического прогиба в предельную растяжимость

значит, и невозможно аналитически выразить $\epsilon^{\text{пр}}$ через $h^{\text{кр}}$. Поэтому решим данное уравнение с помощью одного из приближенных численных методов. Разложим косинус угла в ряд Тейлора с двумя членами (количество членов ряда назначено по результатам предварительных вычислений) и получим:

$$\cos \frac{\alpha^\circ}{2} \approx 1 - \frac{(\frac{\alpha^{\text{рад}}}{2})^2}{2} + \frac{(\frac{\alpha^{\text{рад}}}{2})^4}{24}. \quad (8)$$

Следует отметить, что угол в уравнении (8) до знака приближенного равенства измеряется в градусах, а после — в радианах. Поэтому при подстановке уравнения (8) в уравнение (7) угол в знаменателе переведем в радианы:

$$h^{\text{кр}} = \frac{AB}{\alpha^{\text{рад}}} (1 - (1 - \frac{(\frac{\alpha^{\text{рад}}}{2})^2}{2} + \frac{(\frac{\alpha^{\text{рад}}}{2})^4}{24})). \quad (9)$$

В полученном уравнении выражать α через $h^{\text{кр}}$ нецелесообразно. Найдем α при известном $h^{\text{кр}}$. Пусть $h^{\text{кр}} = 20$ мм. Тогда, решив уравнение (9), $\alpha = 0,5754$ рад. Продолжим решать задачу. Переведем α из радиан в градусы:

$$\alpha^\circ = \frac{180^\circ \cdot \alpha^{\text{рад}}}{\pi} = \frac{180^\circ \cdot 0,5754 \text{ рад}}{\pi} = 32,97^\circ. \quad (10)$$

Далее решим уравнения (1)–(7) в обратном порядке:

$$R^{OB} = \frac{AB \cdot 180^\circ}{\pi \cdot \alpha^\circ} = \frac{280 \text{ мм} \cdot 180^\circ}{\pi \cdot 32,9^\circ} = 486,62 \text{ мм}; \quad (11)$$

$$R^{OC} = R^{OB} + BC = 486,62 \text{ мм} + 70 \text{ мм} = 556,62 \text{ мм}; \quad (12)$$

$$DC = \frac{\pi \cdot R^{OC} \cdot \alpha^\circ}{180^\circ} = \frac{\pi \cdot 556,62 \text{ мм} \cdot 32,97^\circ}{180^\circ} = 320,28 \text{ мм}; \quad (13)$$

$$D'C' = DC - (L' - L) = 320,28 \text{ мм} - (280 \text{ мм} - 230 \text{ мм}) = 270,28 \text{ мм}; \quad (14)$$

$$\epsilon^{\text{пр}} = \frac{D'C' - L}{L} 1000 \text{ мм} = \frac{270,28 \text{ мм} - 230 \text{ мм}}{230 \text{ мм}} 1000 \text{ мм} = 175,12 \frac{\text{мм}}{\text{м}}. \quad (15)$$

Таким образом, получена величина относительного удлинения при $h^{\text{кр}} = 20$ мм. Рассчитаем таким же образом $\epsilon^{\text{пр}}$ для $h^{\text{кр}} = 1 \dots 33$ мм с шагом 1 мм и полученные данные занесем в табл. 2.

Таблица 2

Соответствие $\varepsilon^{пр}$ и $h^{кр}$

$h^{кр}$, мм	$\varepsilon^{пр}$, мм/м	$h^{кр}$, мм	$\varepsilon^{пр}$, мм/м	$h^{кр}$, мм	$\varepsilon^{пр}$, мм/м
1	9	12	105	23	202
2	17	13	113	24	211
3	26	14	122	25	220
4	35	15	131	26	229
5	43	16	140	27	238
6	52	17	149	28	247
7	61	18	157	29	256
8	70	19	166	30	265
9	78	20	175	31	274
10	87	21	184	32	283
11	96	22	193	33	293

Полученная таблица позволяет перевести критический прогиб образца в предельную растяжимость бетонной смеси.

С учетом всего вышесказанного сформулирована следующая методика определения предельной растяжимости бетонной смеси:

1) подготовка прибора к испытанию: гибкая оснастка устанавливается на поверхность скольжения и закрепляется при помощи строп к основному корпусу прибора; на гибкую оснастку надевается съемная форма и выставляется на поверхности скольжения таким образом, чтобы ось винтового штока проходила через центр внутренней и наружной поверхности формы; поверхность скольжения, а также внутренняя поверхность гибкой оснастки и съемной формы увлажняются водой;

2) в подготовленный прибор укладывается испытуемая бетонная смесь в три слоя. Каждый слой штыкуется 20 раз. После укладки и уплотнения смеси верхняя поверхность заглаживается и выравнивается по уровню со съемной формой мастерком. Интенсивными ударами (15 ударов) штыковкой по верхним торцам стенок съемной формы создается механическое воздействие (подобие вибрационному воздействию);

3) аккуратно и плавно съемная форма снимается движением вверх, при этом гибкая оснастка придерживается;

4) осуществляется визуальная проверка отформованного изделия. В случае наличия дефектов предыдущие операции производятся заново;

5) движением воротка шток приводится в касание с гибкой оснасткой;

6) испытание: вращением воротка шток приводится в движение и провоцируется изгибание гибкой оснастки и образца с постоянной скоростью изменения прогиба от 0,5 до 1,5 мм/с, при этом осуществляется визуальный контроль наружной поверхности образца; вращение воротка прекращается в тот момент, когда на наружной поверхности образца образовалась трещина и раскрылась примерно на 1 мм;

7) если трещина образовалась на удалении более чем 85 мм от середины наружной поверхности, результат испытания считается недействительным;

8) фиксируется прогиб образца в мм. Полученное значение критического прогиба подставляется в табл. 2 и определяется соответствующее ему значение предельной растяжимости бетонной смеси в мм/м;

9) завершение испытания: гибкая оснастка снимается с образца; бетонная смесь удаляется с поверхности скольжения; все детали прибора очищаются от бетонной смеси, цементного теста.

Разработанная методика проведения испытания позволяет определять предельную растяжимость бетонных смесей, используемых при непрерывном безопалубочном формовании, что и является прямым отражением их пластических свойств.

Пример использования разработанного метода

В рамках диссертационного исследования автора был поставлен следующий эксперимент по определению влияния расхода цемента и пластификатора на пластичность мелкозернистой бетонной смеси.

Было разработано 18 равноподвижных (по распылу конуса на встряхивающем столе) составов (табл. 3) мелкозернистой бетонной смеси с различным расходом цемента и пластифицирующей наномодифицированной добавки «Макромер П-163». Для каждого состава определялась предельная растяжимость в соответствии с разработанным методом, полученные результаты представлены в табл. 3 и на рис. 5.

Анализируя полученные данные, можно сделать следующие выводы. Во-первых, несмотря на одинаковый показатель распыла конуса, на

Таблица 3

Предельная растяжимость бетонных смесей различного состава

№ п/п	Ц/П	Расход пластификатора, %	$h^{кр}$, мм	$\epsilon^{пр}$, мм/м
1	1/3	0,0	16,0	140,0
2	1/3	0,2	17,5	153,0
3	1/3	0,4	19,5	170,5
4	1/3	0,6	21,0	184,0
5	1/3	0,8	23,0	202,0
6	1/3	1,0	24,0	211,0
7	1/2	0,0	20,0	175,0
8	1/2	0,2	21,0	184,0
9	1/2	0,4	22,5	197,5
10	1/2	0,6	24,0	209,5
11	1/2	0,8	25,0	220,0
12	1/2	1,0	25,5	224,5
13	1/1	0,0	26,0	229,0
14	1/1	0,2	26,5	233,5
15	1/1	0,4	27,0	238,0
16	1/1	0,6	27,5	242,5
17	1/1	0,8	28,0	247,0
18	1/1	1,0	28,0	247,0

Рис. 5. Зависимость предельной растяжимости бетонной смеси от расхода наномодифицированного пластификатора и цемента

блюдается существенное изменение пластических свойств при изменении расхода цемента и (или) пластификатора, что подчеркивает работоспособность разработанного метода. Во-вторых, установлено, что управлять пластическими свойствами можно в широких пределах даже при незначительном изменении исходной рецептуры бетонной смеси, что говорит о целесообразности дальнейших исследований в данной области. Также следует отметить, что по совокупности проведенных испытаний, в том числе и пробных,

разработанный метод определения пластичности малоподвижных бетонных смесей отличается высокой воспроизводимостью и точностью получаемых результатов.

Заключение

Подводя итог данной работы, можно заключить следующее:

1. Разработан оригинальный метод определения пластических свойств малоподвижных бетонных смесей, заключающийся в изгибании свежееотформованного образца до образования трещин на наружной растянутой поверхности.

2. Сконструирован и изготовлен прибор для осуществления вышеуказанного метода, отличающийся наличием гибкой оснастки, позволяющей изгибать свежееотформованный образец с равномерным растяжением значительного участка одной из его сторон.

3. Введен параметр оценки пластичности «предельная растяжимость бетонной смеси», отражающий то относительное удлинение бетонной смеси, при котором происходит разрыв ее сплошности.

4. Сформулирована и отлажена методика проведения испытания по определению предельной растяжимости бетонной смеси, экспериментально подтверждена гипотеза о равномерности растяжения значительного участка наружной поверхности свежееотформованного образца. Приняты необходимые допущения.

5. Получены первые результаты по влиянию расхода цемента и наномодифицированного пластификатора на пластические свойства мелкозернистой бетонной смеси, которые, помимо прочего, подтверждают работоспособность разработанного метода.

Другими словами, поставленная цель работы достигнута в полном объеме, а именно разработан метод определения пластичности малоподвижных бетонных смесей, отличающийся оригинальностью, точностью и позволяющий получать воспроизводимый результат. Не вызывает сомнений, что результат представленной работы, являясь инструментальной базой, позволяет проводить широкие исследования в области пластичности бетонных смесей, которые будут способствовать более активному развитию и распространению технологий непрерывного безопалубочного формования.

Библиографический список

1. Banfill P. F. G. Rheology of fresh cement and concrete // *Rheology review* 2006. Pp. 61–130.
2. Laskar A. I. Study of rheological behavior of high-performance concrete: PhD Thesis. Indian institute of technology. Guwahati, March 2008. 203 p.
3. Баженов Ю. М. Технология бетонов. М.: АСВ, 2007. 528 с.
4. Блещик Н. П. Структурно-механические свойства и реология бетонной смеси и прессвакуумбетона. Минск: Наука и техника, 1977. 232 с.
5. Вагнер Е. С., Супруненко Е. Ю. Безопалубочное формование как перспективная технология производства ЖБИ // *Достижения вузовской науки*. 2014. № 9. С. 108–113.
6. Копица С. П., Заикин В. А. Технология безопалубочного формования — ключ к модернизации промышленности и снижению себестоимости жилья // *Технологии бетонов*. 2013. № 11. С. 29–33.
7. Мосаков Б. С., Пухаренко Ю. В. Задачи технологической механики как составной части строительного материаловедения // *Вестник гражданских инженеров*. 2016. № 2 (55). С. 127–131.
8. Мосаков Б. С. Основы технологической механики тяжелых бетонов. Новосибирск: СГУПС, 2017. 186 с.
9. Пухаренко Ю. В., Хренов Г. М. Задачи технологической механики в развитии способов безопалубочного формования // *Вестник гражданских инженеров*. 2017. № 6 (65). С. 152–157.
10. Рыжов Д. И. О долговечности бетонов из наномодифицированных смесей // *Вестник гражданских инженеров*. 2013. № 2 (37). С. 146–151.
11. Рыжов Д. И. Применение наномодифицированных добавок для железобетонных изделий // *Вестник гражданских инженеров*. 2015. № 6 (53). С. 146–150.
12. Селяев В. П., Уткина В. Н. Железобетонные конструкции, изготовленные методом безопалубочного формования // *Технологии бетонов*. 2011. № 5–6. С. 45–47.
13. Уткин В. В., Чумерин Ю. Н. Современная технология строительной индустрии. М.: Русский издательский дом, 2008. 100 с.

References

1. Banfill P. F. G. Rheology of fresh cement and concrete. *Rheology review*, 2006, pp. 61–130.
2. Laskar A. I. Study of rheological behavior of high-performance concrete. PhD Thesis. Indian institute of technology. Guwahati, March 2008, 203 p.
3. Bazhenov Yu. M. *Tekhnologiya betonov* [Technology of concrete]. Moscow, ASV Publ., 2007, 528 p.

4. Bleshchik N. P. *Strukturno-mekhanicheskie svoystva i reologiya betonnoy smesi i pressvakuumbetona* [Structural-mechanical properties and rheology of the concrete mix and vacuum-treated compression]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1977, 232 p.

5. Vagner E. S., Suprunenko E. Yu. *Bezopalubochnoe formovanie kak perspektivnaya tekhnologiya proizvodstva ZhBI* [Formless molding as a promising technology for the production of concrete products]. *Dostizheniya vuzovskoy nauki – Advances of university science*, 2014, no. 9, pp. 108–113.

6. Kopsha S. P., Zaikin V. A. *Tekhnologiya bezopalubochnogo formovaniya — klyuch k modernizatsii promyshlennosti i snizheniyu sebestoimosti zhilya* [Technology of cold forming as a key to the modernization of the industry and lower the cost of housing]. *Tekhnologii betonov – Technology of concrete*, 2013, no. 11, pp. 29–33.

7. Mosakov B. S., Pukhareno Yu. V. *Zadachi tekhnologicheskoy mekhaniki kak sostavnoy chasti stroitel'nogo materialovedeniya* [Tasks of technological mechanics as an integral part of construction materials]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2016, no. 2 (55), pp. 127–131.

8. Mosakov B. S. *Osnovy tekhnologicheskoy mekhaniki tyazhelykh betonov* [Basics of the mechanics of heavy concrete]. Novosibirsk, SGUPS Publ., 2017, 186 p.

9. Pukhareno Yu. V., Khrenov G. M. *Zadachi tekhnologicheskoy mekhaniki v razvitii sposobov bezopalubochnogo formovaniya* [Problems of technological mechanics in development of techniques of formless molding]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 6 (65), pp. 152–157.

10. Ryzhov D. I. *O dolgovechnosti betonov iz nanomodifitsirovannykh smesey* [About the durability of concrete from nanomodified mixtures]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2013, no. 2 (37), pp. 146–151.

11. Ryzhov D. I. *Primenenie nanomodifitsirovannykh dobavok dlya zhelezobetonnykh izdeliy* [Application of nanomodified additives in the manufacturing of reinforced concrete products]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2015, no. 6 (53), pp. 146–151.

12. Selyaev V. P., Utkina V. N. *Zhelezobetonnye konstruktzii, izgotovlennye metodom bezopalubochnogo formovaniya* [Reinforced concrete structures made by the method of formwork molding]. *Tekhnologii betonov – Technology of Concrete*, 2011, no. 5–6, pp. 45–47.

13. Utkin V. V., Chumerin Yu. N. *Sovremennaya tekhnologiya stroitel'noy industrii* [Modern technology of the construction industry]. Moscow, Russkiy izdatel'skiy dom Publ., 2008, 100 p.