УДК 666.972; 532.135

DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-5-119-125

© Г. М. Хренов, ассистент

© G. M. Khrenov, assistant lecturer

© В. И. Морозов, д-р техн. наук, профессор

© V. I. Morozov, Dr. Sci. Tech., Professor

© М. И. Жаворонков, канд. техн. наук, доцент

© M. I. Zhavoronkov, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)

(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: g.khrenov@mail.ru

E-mail: g.khrenov@mail.ru

© Т. М. Петрова, д-р техн. наук, профессор

© T. M. Petrova, Dr. Sci. Tech., Professor

(Петербургский государственный университет
путей сообщения им. Александра I,
Санкт-Петербург, Россия)

(Emperor Alexander I St. Petersburg
State Transport University,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: petrova@pgups.ru

E-mail: petrova@pgups.ru

РОЛЬ ЗАПОЛНИТЕЛЯ В ФОРМИРОВАНИИ ПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ¹

THE ROLE OF THE AGGREGATE IN THE FORMATION OF THE PLASTIC PROPERTIES OF CONCRETE MIXTURES

Исследуется влияние заполнителя на пластичность бетонных смесей, используемых при непрерывном безопалубочном формовании. Приведен обзор существующих представлений о влиянии заполнителя на реологию смесей и об их пластических свойствах, описание используемых материалов и методик, эксперимента и анализ полученных результатов. Экспериментально установлены два механизма влияния заполнителя на пластичность бетонной смеси. За счет сорбции воды из цементного теста заполнитель при любой своей объемной концентрации снижает его предельную растяжимость и, как следствие, пластичность всей смеси. При превышении объемной доли 41 % заполнитель еще и отощает в достаточной степени пластичный компонент смеси — цементное тесто, тем самым снижая предельную растяжимость смеси, что усиливает влияние от осушения теста.

Ключевые слова: бетонная смесь, реология, пластичность, предельная растяжимость, заполнитель.

The article presents the results of the research aimed at identifying the influence of the aggregate on the plasticity of concrete mixtures used in formless molding. The authors provide a brief overview of the existing concepts regarding the effect of the aggregate on the rheology of mixtures and their plastic properties. There is offered a description of the materials and techniques used, as well as the experiment and analysis of the results obtained. There have been experimentally established two mechanisms of the influence of the aggregate on the plasticity of the concrete mixture. Due to the sorption of water from the cement paste, the aggregate, at any of its volumetric concentrations, reduces its ultimate tensibility and, as a consequence, the plasticity of the entire mixture. When the volume fraction of 41 % is exceeded, the aggregate also depletes the sufficiently plastic component of the mixture — cement paste — thereby reducing the ultimate tensibility of the mixture, which enhances the effect of drying the paste.

Keywords: concrete mix, rheology, plasticity, ultimate tensibility, aggregate.

Введение

Изучение реологических свойств бетонных смесей для технологий непрерывного безопалубочного

формования в последнее время вызывает все больший научный и практический интерес [1–4], связанный в первую очередь с перспективами развития аддитивных способов получения бетонной продукции [3, 4]. В числе прочих одним из наиболее значимых является вопрос улучше-

¹ Статья 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»).

ния пластичности смесей во избежание растрескивания в результате деформирования [5].

Исследования пластических свойств бетонных смесей для непрерывного безопалубочного формования начались совсем недавно, однако уже существует необходимый инструментарий для оценки пластичности по предельной растяжимости [6], понятен вклад цемента и цементного теста в формирование пластических свойств [7, 8] и построены первые математические модели предельной растяжимости смеси [9, 10]. Несмотря на это, полученные знания являются разрозненными и трудно обобщаются, остаются открытыми многие вопросы, в том числе и роль заполнителя в формировании пластических свойств бетонных смесей, в определении которой и состоит **цель данной работы**.

Влияние заполнителя на реологию бетонной смеси

Заполнитель занимает в бетонной смеси и в бетоне до 80 % объема и оказывает существенное влияние на все их свойства [11]. С точки зрения реологии, бетонная смесь представляет собой гетерогенную систему, деформирование и течение которой возможно только за счет вязко-пластичных свойств цементного теста в ней. Зерна заполнителя из плотных горных пород в этом смысле уместно рассматриваются как абсолютно твердые тела, не деформирующиеся, а только меняющие свое местоположение при течении смеси. При этом их наличие и количество в смеси влияют на реологию различными механизмами [12–14].

Занимая большую часть объема, заполнитель уменьшает количество вязко-пластичного компонента смеси, а именно цементного теста. При этом возрастает вязкость смеси, что проявляется снижением ее подвижности. Такой механизм замещения является определяющим практически для всех свойств и смеси, и бетона, поскольку заполнитель отличается по своим свойствам и от цементного теста, и от цементного камня. Однако существенное значение имеют как объем заполнителя, так и площадь и свойства его поверхности [12, 13].

Гетерогенность бетонной смеси обусловлена не только большим числом зерен заполнителя различного размера, но и появлением вблизи них контактных зон, в которых цементное тесто

взаимодействует с их поверхностью. Во-первых, заполнитель сорбирует часть воды из цементного теста, осушая его и делая более вязким, во-вторых, цементное тесто когезирует с зернами, что влияет на связность смеси [12, 13].

О влиянии заполнителя на пластичность смеси пока известно мало, лишь то, что с увеличением его количества пластичность снижается. По аналогии с вязкостью можно предположить, что заполнитель снижает пластичность бетонной смеси как минимум двумя способами: замещением объема и осушением цементного теста. Это предположение и является **рабочей гипотезой** данного исследования.

Пластичность цементного теста

По результатам исследований последних лет [7–9] установлено, что предельная растяжимость цементного теста нормальной густоты составляет $360 \text{ мм/м} \pm 3 \%$ вне зависимости от свойств цемента. Наиболее значимым фактором [14, 15], влияющим на пластичность, является разница между водоцементным отношением и нормальной густотой (В/Ц – НГ, %), с увеличением которой предельная растяжимость цементного теста возрастает по линейному закону с угловым коэффициентом 11,7.

Механизм влияния воды на предельную растяжимость остается неустановленным; можно предположить, что с увеличением количества воды растет количество гелевой составляющей, которая способна деформироваться, а объем твердых фаз (нерастворившиеся зерна цемента), неспособных деформироваться, сокращается, что и приводит к большей растяжимости всей системы. Этим объясняется корреляция между вязкостью цементного теста и его пластичностью и почему предельная растяжимость теста нормальной густоты всегда одинакова, ведь по схожему механизму вода влияет и на вязкость цементного теста.

Используемые в исследовании материалы и методики

В исследовании использовались бездобавочный портландцемент марки ЦЕМ I 42,5 Н (табл. 1) и карьерные пески нормального гранулометрического состава (табл. 2). Основные характеристики сырьевых материалов определялись по действующим государственным стан-

Таблица 1

Основные характеристики используемого цемента

Показатель	Значение
Нормальная густота, %	25,4
Удельная поверхность по Блейну, м ² /кг	390
Средняя активность в возрасте 2 суток, МПа	23,9
Средняя активность в возрасте 28 суток, МПа	52,4

Таблица 2

Основные характеристики используемых песков

Показатель	Маркировка песка		
	П 1	П 2	П 3
Модуль крупности	2,7	2,4	2,1
Водопотребность, %	4,5	5,9	6,5
Насыпная плотность, кг/м ³	1548	1622	1554
Плотность зерен, кг/м ³	2651	2642	2674

дартам, водопотребность песков — по методике Баженова–Скрамтаева [11].

Пластичность бетонной смеси определялась по оригинальной методике через предельную растяжимость ($\epsilon^{\text{пр}}$, мм/м) [6], суть которой состоит в изгибании свежесформованного образца балки до образования трещин в растянутой зоне при помощи прибора оригинальной конструкции, измерении критического прогиба, пересчете прогиба в относительное удлинение растянутой зоны, которое равняется предельной растяжимости.

Эксперимент

Для проверки рабочей гипотезы были приготовлены и испытаны на предельную растяжимость составы смесей с широким варьированием расхода песка, от 0 до 1444 кг на кубический метр. Смесей приготавливали в лабораторном растворосмесителе *Matest E-095*, перемешивали в течение 2 мин. Часть смеси сразу отбирали для определения плотности (ρ_0 , кг/м³) в сосуде вместимостью 1 л, полученные значения использовались для расчета фактических составов. Испытание на предельную растяжимость проводилось через 10 мин от затворения смеси и продолжалось не более 5 мин. Все полученные составы и результаты испытаний представлены в табл. 3 и на рис. 1.

Анализ результатов

Полученные экспериментальные значения подтверждают предположение о снижении пластичности смеси при введении в нее заполнителя. На рис. 1 отчетливо наблюдаются два участка: первый участок от 0 до 41 % объемной доли заполнителя, второй — от 41 до 58 %. Оба участка являются линейными, но отличаются угловыми коэффициентами, –1,88 на первом и –20,7 на втором, при этом между ними наблюдается резкий переход, все это косвенно подтверждает существование минимум двух механизмов влияния заполнителя на пластичность смеси.

В соответствии с рабочей гипотезой, одним из механизмов влияния заполнителя на пластичность является осушение цементного теста. Зерна заполнителя, попадая в смесь в любом количестве, сорбируют часть воды из теста, в результате чего его предельная растяжимость снижается по установленным ранее зависимостям [7], а значит, снижается пластичность и у всей смеси. Можно с уверенностью сказать, что такой механизм действует на всем интервале экспериментирования.

Получение второго участка на рис. 1, отличного от первого, косвенно свидетельствует о существовании второго механизма воздействия заполнителя на смесь, а именно замещения пластичного компонента. Как известно, при деформировании бетонной смеси именно цементное тесто деформируется и позволяет сохранять при этом сплошность среды. Заполнитель же выступает в роли отошающей добавки, снижая количество теста и способность к деформированию без нарушения сплошности. Можно предположить, что на первом участке этот механизм не оказывает существенного влияния, поскольку заполнителя слишком мало, чтобы препятствовать деформированию цементного теста, а на втором участке он отчетливо наблюдается, усиливая воздействие от осушения теста.

Все вышеизложенное можно проверить расчетным путем. Зная водопотребность заполнителя, можно рассчитать то количество воды, которое сорбировалось из цементного теста, и рассчитать для каждого состава **истинное водоцементное отношение** ($V/P_{\text{ист}}$, %) — отношение массы воды, оставшейся в цементном тесте после смачивания заполнителя, к массе цемента. В предыдущих исследованиях уже установле-

Таблица 3

Результаты испытаний

№ состава	Используемый песок	Расход материалов на м ³ смеси, кг			ρ_0 , кг/м ³	ϵ^{np} , мм/м
		Цемент	Песок	Вода		
1	П 1	1376	275	349	2000	355
2		1117	670	284	2071	331
3		1037	830	263	2130	324
4		896	1076	228	2200	298
5		848	1187	215	2250	234
6	П 1	753	1356	191	2300	96
7		722	1444	183	2349	52
8	П 2	1233	493	313	2039	342
9		1149	689	292	2130	318
10		963	963	245	2171	283
11		896	1076	228	2200	274
12		788	1261	200	2249	152
13		753	1356	191	2300	67
14	П 3	1376	275	349	2000	343
15		1233	493	313	2039	324
16		1037	830	263	2130	293
17		963	963	245	2171	274
18		848	1187	215	2250	193
19		788	1261	200	2249	140
20		722	1444	183	2349	9

Рис. 1. Предельная растяжимость смеси при различной концентрации заполнителя:
ЦТ НГ — цементное тесто нормальной плотности

но [7], что предельная растяжимость цементного теста зависит от В/Ц линейно с угловым коэффициентом 11,7, а значит, можно осуществить поправку на различное $V/C_{ист}$, привести все зна-

чения предельной растяжимости к одинаковому истинному водоцементному отношению. Что и было сделано, полученные результаты представлены на рис. 2.

Рис. 2. Значение предельной растяжимости бетонной смеси при различной доле заполнителя и постоянном $B/C_{\text{ист}} = 25,4 \%$

Результаты поправки экспериментальных значений подтверждают предположения, описанные ранее. Исключив влияние заполнителя на содержание воды в цементном тесте, предельная растяжимость смеси падает только при превышении концентрации заполнителя 41 %. При меньших концентрациях заполнитель не влияет на предельную растяжимость смеси за счет замещения объема, а при больших снижает ее нелинейно.

Таким образом, можно говорить о существовании двух независимых механизмов влияния заполнителя на пластичность цементного теста: осушение цементного теста и снижение его предельной растяжимости, а значит, и пластичности смеси; замещение объема теста.

Заключение

В результате проведенных лабораторных и математических экспериментов подтверждена гипотеза о существовании двух механизмов влияния заполнителя на пластичность бетонной смеси. При этом получены следующие выводы:

1) заполнитель при любой его объемной концентрации выступает в роли осушителя цементного теста, что приводит к снижению истинного водоцементного отношения, от которого линейно зависит предельная растяжимость с угловым коэффициентом 11,7;

2) заполнитель выступает в роли отошующей добавки, замещает объем цементного теста —

единственного компонента смеси, способного к деформированию без разрыва сплошности, что и приводит к снижению пластичности бетонной смеси. Однако такой механизм воздействия отчетливо наблюдается только при возрастании объемной доли заполнителя свыше 41 %.

Библиографический список

1. Вагнер Е. С., Супруненко Е. Ю. Безопалубочное формирование как перспективная технология производства ЖБИ // Достижения вузовской науки. 2014. № 9. С. 108–113.
2. Копица С. П., Заикин В. А. Технология безопалубочного формирования — ключ к модернизации промышленности и снижению себестоимости жилья // Технологии бетонов. 2013. № 11. С. 29–33.
3. Славчева Г. С., Шведова М. А., Бабенко Д. С. Анализ и критериальная оценка реологического поведения смесей для строительной 3D-печати // Строительные материалы. 2018. № 12 (766). С. 34–40.
4. Славчева Г. С., Артамонова О. В. Реологическое поведение дисперсных систем для строительной 3D-печати: проблема управления и возможности арсенала «нано» // Нанотехнологии в строительстве. 2018. Т. 10, № 3. С. 107–122.
5. Пухаренко Ю. В., Хренов Г. М. Задачи технологической механики в развитии способов безопалубочного формирования // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 6 (65). С. 152–157.

6. Хренов Г. М. Метод определения пластичности бетонных смесей // Вестник гражданских инженеров. 2018. № 2 (67). С. 147–154.

7. Хренов Г. М. Влияние объемной доли цементного теста на пластичность бетонной смеси // «Архитектура – строительство – транспорт»: материалы 74-й науч. конф. профессорско-преподавательского состава и аспирантов университета (Санкт-Петербург, 3–5 октября 2018 г.). В 2 ч. СПб.: СПбГАСУ, 2018. Ч. 1. С. 138–141.

8. Хренов Г. М. Влияние тонкости помола цемента на пластичность бетонной смеси // «Актуальные проблемы строительства»: материалы 71-й науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (Санкт-Петербург, 4–6 апреля 2018 г.). В 3 ч. СПб.: СПбГАСУ, 2018. Ч. 2. С. 87–92.

9. Хренов Г. М. Влияние цементного теста на пластические свойства бетонных смесей // «Современные материалы и передовые производственные технологии (СМПТ-2019)»: тезисы докладов междунар. науч. конф. (Санкт-Петербург, 25–28 июня 2019 г.). СПб.: Санкт-Петербургский политехн. ун-т Петра Великого, 2019. С. 44.

10. Хренов Г. М. Моделирование пластических свойств бетонной смеси // Известия Казанского гос. архит.-строит. ун-та. 2021. № 1 (55). С. 49–57.

11. Баженов Ю. М. Технология бетонов. М.: АСВ, 2007. 528 с.

12. Блещик Н. П. Структурно-механические свойства и реология бетонной смеси и прессвакуумбетона. Минск: Наука и техника, 1977. 232 с.

13. Мосаков Б. С. Основы технологической механики тяжелых бетонов. Новосибирск: СГУПС, 2017. 186 с.

14. Мосаков Б. С., Пухаренко Ю. В. Задачи технологической механики как составной части строительного материаловедения // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 2 (55). С. 127–131.

15. Хренов Г. М., Рерих А. В. Дисперсное армирование как возможный инструмент регулирования пластичности бетонных смесей // «Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения»: материалы Междунар. академических чтений (Курск, 15 ноября 2019 г.). Курск: Курский гос. ун-т, 2019. С. 45–53.

References

1. Vagner E. S., Suprunenko E. Yu. *Bezopalubochnoe formovanie kak perspektivnaya tekhnologiya proizvodstva ZhBI* [Formless molding as a promising technology for precast concrete products' manufacturing]. *Dostizheniya vuzovskoy nauki – Achievements of University Science*, 2014, no. 9, pp. 108–113.

2. Kopsha S. P., Zaikin V. A. *Tekhnologiya bezopalubochnogo formovaniya — klyuch k modernizatsii promyshlennosti i snizheniyu sebestoimosti zhilya* [The technology of formless molding as the key to the modernization of industry and reducing the cost of housing]. *Tekhnologii betonov – Technologies of concrete*, 2013, no. 11, pp. 29–33.

3. Slavcheva G. S., Shvedova M. A., Babenko D. S. *Analiz i kriterial'naya otsenka reologicheskogo povedeniya smesey dlya stroitel'noy 3D-pechati* [Analysis and criteria evaluation of rheological behavior of mixtures for 3D construction printing]. *Stroitel'nye materialy – Building Materials*, 2018, no. 12 (766), pp. 34–40.

4. Slavcheva G. S., Artamonova O. V. *Reologicheskoe povedenie dispersnykh sistem dlya stroitel'noy 3D-pechati: problema upravleniya i vozmozhnosti arsenala «nano»* [Rheological behavior of dispersed systems for construction 3D printing: the problem of management and capabilities of the arsenal of “nano”]. *Nanotekhnologii v stroitel'stve – Nanotechnologies in Construction*, 2018, vol. 10, no. 3, pp. 107–122.

5. Pucharenko 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.

6. Khrenov G. M. *Metod opredeleniya plastichnosti betonnykh smesey* [Method of determining the concrete mixture plasticity]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2018, no. 2 (67), pp. 147–154.

7. Khrenov G. M. *Vliyanie ob'emnoy doli tsementnogo testa na plastichnost' betonnoy smesi* [The influence of the volume fraction of cement paste on the plasticity of concrete mixture]. *Trudy 74-y nauch. konf. professorsko-prepodavatel'skogo sostava i aspirantov universiteta (St. Petersburg, 3–5 oktyabrya 2018 g.) «Arkhitektura — stroitel'stvo — transport»* [Proceedings of the 74-th scientific conference of the faculty and graduate students of the University (St. Petersburg, October 3–5, 2018) “Architecture–construction–transport”]. In 2 pts. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2018, pt. 1, pp. 138–141.

8. Khrenov G. M. *Vliyanie tonkosti pomola tsementa na plastichnost' betonnoy smesi* [The influence of the cement grinding fineness on plasticity of concrete mix]. *Trudy 71-y nauch.-prakt. konf. studentov, aspirantov i molodykh uchenykh (St. Petersburg, 4–6 aprelya 2018 g.) «Aktual'nye problemy stroitel'stva»* [Proceedings of the 71-st scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists (St. Petersburg, April 4–6, 2018) “Actual problems of construction”]. In 3 pts. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2018, pt. 2, pp. 87–92.

9. Khrenov G. M. *Vliyanie tsementnogo testa na plasticheskie svoystva betonnykh smesey* [The influence

of cement paste on the plastic properties of concrete mixtures]. *Trudy mezhdunar. nauch. konf. (Sankt-Peterburg, 25–28 iyunya 2019 g.). «Sovremennye materialy i peredovye proizvodstvennye tekhnologii (SMPPT-2019)»* [Proceedings of the International scientific conf. (St. Petersburg, June 25–28, 2019). “Modern materials and advanced production technologies (SMPPT-2019)”]. St. Petersburg, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University Publ., 2019, p. 44.

10. Khrenov G. M. *Modelirovanie plasticheskikh svoystv betonnoy smesi* [Modeling of plastic properties of concrete mixture]. *Izvestiya Kazanskogo Gosudarstvennogo Arkhitekturno-Stroitel'nogo Universiteta – Bulletin of Kazan State University of Architecture and Construction*, 2021, no. 1 (55), pp. 49–57.

11. Bazhenov Yu. M. *Tekhnologiya betonov* [Technology of concrete]. Moscow, ASV Publ., 2007, 528 p.

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

13. Mosakov B. S. *Osnovy tekhnologicheskoy mekhaniki tyazhelykh betonov* [Fundamentals of technological mechanics of heavy concrete]. Novosibirsk, SGUPS Publ., 2017, 186 p.

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

15. Khrenov G. M., Rerikh A. V. *Dispersnoe armirovanie kak vozmozhnyy instrument regulirovaniya plastichnosti betonnykh smesey* [Dispersed reinforcement as a possible tool for regulating the plasticity of concrete mixtures]. *Trudy Mezhdunar. akademicheskikh chteniy (Kursk, 15 noyabrya 2019 g.) «Bezopasnost' stroitel'nogo fonda Rossii. Problemy i resheniya»* [Proceedings of the International. Academic Readings (Kursk, November 15, 2019) “Safety of construction fund of Russia. Problems and solutions”]. Kursk, Kursk State University Publ., 2019, pp. 45–53.