

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>

Russian journal of transport engineering

2020, №2, Том 7 / 2020, No 2, Vol 7 <https://t-s.today/issue-2-2020.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/07SATS220.pdf>

DOI: 10.15862/07SATS220 (<http://dx.doi.org/10.15862/07SATS220>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Украинский И.С., Каменчуков А.В. Динамика набора прочности искусственного камня на основе цементного вяжущего // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2020 №2, <https://t-s.today/PDF/07SATS220.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/07SATS220

For citation:

Ukrainskiy I.S., Kamenchukov A.V. (2020). Dynamics of strength set of artificial stone based on cement binder. *Russian journal of transport engineering*, [online] 2(7). Available at: <https://t-s.today/PDF/07SATS220.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/07SATS220

УДК 625.7/.8

ГРНТИ 67.03

Украинский Илья Сергеевич

ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», Хабаровск, Россия
Доцент кафедры «Автомобильные дороги»
Аспирант

Кандидат технических наук

E-mail: 006012@pnu.edu.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=548294

Каменчуков Алексей Викторович

ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», Хабаровск, Россия
Заведующий кафедрой «Автомобильные дороги»
Кандидат технических наук, доцент

E-mail: 006641@pnu.edu.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=767839

Динамика набора прочности

искусственного камня на основе цементного вяжущего

Аннотация. В статье рассматриваются существующие теории физико-химических процессов, протекающих в искусственном камне на основе цементного вяжущего, влияющих на динамику набора прочности. Исследована математическая модель непрерывно возрастающей прочности цементного камня по логарифмическому закону. Авторами подвергнута сомнению адекватность применения подобных теорий для исключения фактора сроков твердения из экспериментов, направленных на выявление влияния на рост прочности таких мероприятий, как применение поверхностно активных веществ, минеральных добавок, изменения водоцементного отношения и т. д. Авторами предложено как более эффективный инструмент исследовать влияние подобных факторов на динамику изменения прочности цементного камня в целом. Озвучены основные аргументы теории скачкообразного набора прочности и деструкции цементных систем. Для оценки актуальности проблемы авторами был спланирован эксперимент для построения кривых динамики набора прочности искусственного камня на основе цементного вяжущего. В ходе эксперимента были испытаны две партии образцов по шесть серий в каждой в возрасте 3, 7, 14, 28, 56 и 84 суток соответственно. Полученные в ходе эксперимента значения показали значительные перепады в раннем возрасте твердения. На основе опытных данных, в рамках существующей теории набора прочности

искусственного камня на основе цементного вяжущего, были получены теоретические кривые изменения прочности во времени. Результаты моделирования были сопоставлены с результатами эксперимента и между собой. По результатам анализа экспериментальных исследований и теоретических расчетов были выдвинуты аргументы за и против существующих теорий.

Ключевые слова: цементный камень; гидратация цементного вяжущего; адгезионные связи; твердение и деструкция цементного камня; динамика роста прочности цементных систем; логарифмический закон роста прочности бетона; аппроксимация опытных данных

Введение

Процесс твердения и набора прочности искусственного камня с момента затворения цемента водой представляет собой сложную динамическую систему, включающую химические преобразования, фазовые переходы, образование и разрушение адгезионных и кристаллизационных связей [1–3]. Множество внешних и внутренних факторов оказывают влияние на динамику протекания, изменения и преобразования каждого из этих процессов, как в отдельности, так и совместно [4; 5]. Получить математическую модель столь сложного и многофакторного динамического процесса с большим количеством переменных весьма затруднительно. Однако при оценке влияния того или иного параметра на процесс набора прочности цементного камня общепринято использовать логарифмическую регрессионную зависимость в качестве уравнения, описывающего этот процесс. Наиболее распространенным способом оценки прочности искусственного камня на основе цементного вяжущего является проведение лабораторных испытаний разрушающим методом серии образцов одного возраста, полагая, что прочность во времени непрерывно возрастает. Как показывает практика, подобный подход не всегда позволяет дать адекватную оценку изучаемым факторам. Применение некорректных зависимостей для оценки прочности искусственного камня на ранних стадиях твердения, как правило, приводит к завышению уровня прочности материала, то есть выдвигается предположение, что испытываемый материал является более высокого качества, а подобные предположения в рамках строительной практики могут привести к пагубным последствиям и человеческим жертвам [6; 7].

Конечно, теория и практика строительства и строительных материалов не стоят на месте. Отечественные и зарубежные ученые разрабатывают и исследуют новые материалы, добавки и технологии, которые должны уменьшить влияние внешних факторов на процесс набора прочности искусственного камня [1; 3; 4; 8]. Появление новых структурных моделей [9], расширение экспериментальной базы за счет применения новых методов исследования и получения уточненных регрессионных зависимостей [10–12] позволит повысить точность прогнозирования прочностных свойств искусственного камня на основе цементного вяжущего. Таким образом, вопрос изучения динамики, физико-механических и химических особенностей процесса набора прочности искусственного камня на основе цементного вяжущего – это вопрос по-прежнему актуальный, несмотря на большое количество работ, и исследований отечественных и зарубежных ученых.

Теоретические основы процесса набора прочности искусственного камня

Цемент является основой искусственного камня. Как показывают исследования оценки энергетического состояния цемента в процессе твердения, он представляет собой нестабильную, неустойчивую в термодинамическом отношении систему [13]. Важным фактором химической активности клинкерных минералов являются изоморфные примеси в их кристаллических решётках [14]. Наибольшее участие в формировании структуры

искусственного камня на основе цементного вяжущего принимают активные центры поверхности частиц вяжущего материала. Эти частицы служат своеобразным маркером начала процесса гидратации [15; 16]. Модели активных центров могут использоваться для оценки активности веществ, имеющих высокую долю ковалентных связей.

При гидратации цементного вяжущего возникают тонкодисперсные системы (нано уровень), о чем свидетельствуют работы многих ученых [2; 8; 17]. В работах отмечено, что наибольшими преимуществами по прочности обладают структуры, имеющие высокую удельную поверхность новообразований или содержащие высокодисперсный наполнитель, а также имеющие равномерную микропористость поверхности [18; 19]. Исследования микроструктуры процесса гидратации цемента показали, что кристаллогидраты алюмоферита образуются примерно через 30–40 минут, а поверхность зерна становится гладкой, при этом на крупные частицы налипают более мелкие, возникают агломераты частиц цемента. Первые гидратационные связи между частицами возникают примерно через час, а еще через час на поверхности зёрен цемента образуется гель [20].

После гидратационного твердения в течение 28 суток внешний гель гидросиликата кальция (C-S-H) является совокупностью частиц с волокнистым строением [21], а при активации вяжущего щелочными добавками на поверхности появляется пластинчатое строение C-S-H. Введение различных пластификаторов приводит к увеличению скорости формирования и роста кристалл-гидратов. Использование суперпластификаторов приводит к изменению морфологии гидратных новообразований, классическое фибриллярное строение поверхности зёрен цемента преобразовывается в глобулярную структуру [22].

В то же время большое количество центров кристаллизации и быстрый рост кристаллогидратов приводит к возникновению внутренних напряжений, деструкции и реструктуризации кристаллической решетки, что обуславливает резкие скачки и падения прочности цементного камня в раннем возрасте твердения.

Существующая теория [23; 24], опирающаяся на значительную экспериментальную базу, утверждает следующее: прочность цементного камня непрерывно возрастает во времени по некоторому логарифмическому закону, приблизительную оценку которого можно получить по результату одного испытания в виде

$$R_n = R_{28} \frac{\lg n}{\lg 28}, \quad (1)$$

где R_n – прочность бетона на n сутки, а R_{28} – прочность бетона на 28 сутки; либо по результату двух испытаний в разном возрасте в виде

$$R_n = R_k + (R_m - R_k) \frac{\lg n - \lg k}{\lg m - \lg k}, \quad (2)$$

где R_m и R_k – прочности в возрасте m и k суток, определенные экспериментально (как правило $k = 3, 7$ или 14 суток, а $m = 28$ суток), R_n – расчетная прочность в возрасте n суток. В обобщенном случае зависимость, согласно [25] имеет вид

$$R = A + B(\lg M), \quad (3)$$

где A и B – коэффициенты, учитывающие дополнительные условия, M – степень зрелости бетона.

Формула (3) позволяет получить коэффициенты для различных условий твердения, различных составов раствора, бетона и других смесей на основе цементного вяжущего, по серии испытаний в более чем трех возрастах. Все эти зависимости были получены экспериментально в ходе определения прочности на сжатие образцов из цементобетона.

Несмотря на это, выше указанные зависимости принято распространять и на цементно-песчаные растворы, что не совсем корректно.

Рядом исследователей [5; 8; 11; 26–29] был отмечен скачкообразный рост прочности искусственного камня на основе цементных вяжущих. В ходе экспериментов было установлено, что рост прочности не является непрерывно возрастающим, на экспериментальной кривой скачки прочности сменяются падением. Мнения исследователей о причине такой динамики расходятся. Ряд исследователей полагает, что данные перепады объясняются нормальным распределением случайной величины (результатов испытаний) вдоль некоторой теоретической кривой (формулы 1–3); другие авторы выдвигают гипотезы о циклическом характере структурных изменений в цементном камне в процессе твердения, физико-химических, электрохимических и других процессов, упомянутых выше. Во втором случае влияние указанных процессов значительно в цементно-песчаном растворе, чем в бетоне, в виду большей доли цементного камня в структуре материала. При этом оценку качества цементного вяжущего по показателю прочности принято проводить именно на цементно-песчаном растворе.

Независимо от причин скачкообразного роста прочности, влияние его на объективность оценки показателя прочности очевидно. Поскольку прочность оценивается по результатам испытаний серии образцов в одном возрасте твердения (28 суток), в случае выпадения скачка прочности на это испытания результаты будут завышенными, и наоборот, если на 28 суток произойдет падение прочности, результаты будут занижены.

Исследования процесса набора прочности балочек из цементно-песчаного раствора

Для предварительной оценки актуальности проблемы был спланирован эксперимент для построения кривых динамики набора прочности искусственного камня на основе цементного вяжущего. Были изготовлены две партии образцов согласно ГОСТ 30744 по шесть серий в каждой, на разных цементах и с разным водоцементным отношением. Для простоты назовем их партия №1 и партия №2. Серии образцов были испытаны в возрасте 3, 7, 14, 28, 56 и 84 суток. По результатам испытаний были получены теоретические зависимости по формулам 1–3. Поскольку в формуле 2 величины k и m строго не регламентируются, в ходе анализа результатов были получены все возможные варианты данной зависимости, а в статье приводятся лишь те, в которых средняя ошибка аппроксимации минимальна. В партии № 2 три зависимости получили весьма близкие значения (k и m 3 и 14, 7 и 14, 3 и 7 соответственно). Зависимость по формуле 3 была получена путем аппроксимации экспериментальных данных. Результаты испытаний представлены в таблицах 1 и 2, а также на графиках 1 и 2.

Таблица 1

Результаты испытаний балочек из цементно-песчаного раствора (Партия 1)

Возраст образцов, сут.	Результаты испытаний, МПа	Теоретическая зависимость		Результаты аппроксимации
		формула 1	формула 2 ($k = 3$ $m = 56$)	
3	74,15333333	29,07912872	74,15333333	68,95407089
7	112,15333333	51,50622497	93,08099532	88,35437684
14	80,3	69,85311248	108,565108	104,2251444
28	88,2	88,2	124,0492207	120,0959119
56	139,53333333	106,5468875	139,53333333	135,9666794
84	168,5066667	117,2791287	148,5909586	145,2504833
Средняя ошибка аппроксимации, %		30,32	17,44	18,42

Разработано автором

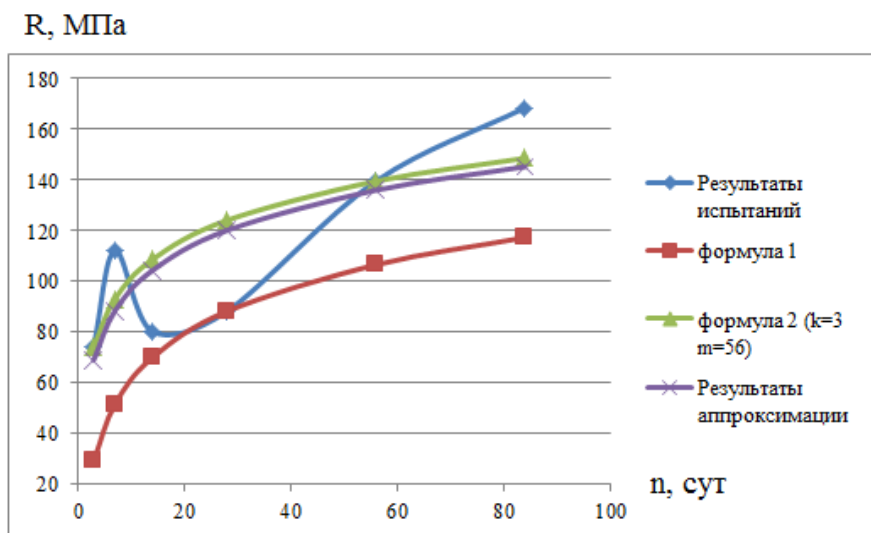


Рисунок 1. Динамика набора прочности балочек из цементно-песчаного раствора (Партия 1) (разработано автором)

Таблица 1

Результаты испытаний балочек из цементно-песчаного раствора (Партия 2)

Возраст образцов, сут.	Результаты испытаний, МПа	Теоретическая зависимость				Результаты аппроксимации
		формула 1	формула 2 (k = 7 m = 14)	формула 2 (k = 3 m = 14)	формула 2 (k = 3 m = 7)	
3	154,4	64,52137744	150,9800363	154,4	154,4	145,3363612
7	182,64	114,2830865	182,64	184,1788658	182,64	177,5527252
14	208,54	154,9915432	208,54	208,54	205,7422	203,9078983
28	195,7	195,7	234,44	232,9011342	228,8445	230,2630714
56	224,133	236,4084568	260,34	257,2622684	251,9467	256,6182446
84	320,3	260,2213774	275,4905288	271,5126184	265,4607	272,0350326
Средняя ошибка аппроксимации, %		24,26	8,69	8,31	7,97	9,68

Разработано автором

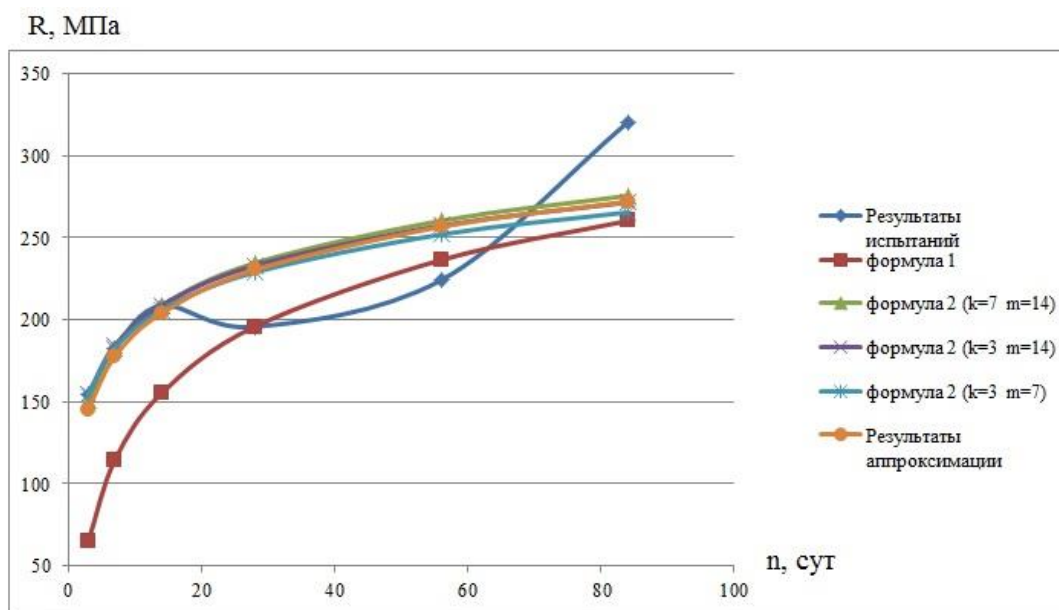


Рисунок 2. Динамика набора прочности балочек из цементно-песчаного раствора (Партия 2) (разработано автором)

Заключение

В результате аппроксимации методом наименьших квадратов получены теоретические зависимости изменения прочности песчано-цементного раствора:

Партия 1

$$R_n = 43,7995 + 22,89668(\ln(n))$$

Партия 2

$$R_n = 103,5644 + 38,02248(\ln(n))$$

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Зависимость, полученная по формуле 1 имеет слабую сходимость с опытными данными и не дает адекватной оценки динамики набора прочности.
2. Зависимость, полученная по формуле 2 имеет высокую сходимость с опытными данными, практически совпадает с результатами аппроксимации, однако для ее получения не всегда годятся результаты испытания образцов в раннем возрасте твердения (партия №1), что делает ее не удобной для применения в прогнозе динамики набора прочности. Для выбора параметров k и m необходимо провести более 2 испытаний, при этом, имея в наличии достаточное количество испытаний, можно получить логарифмическую регрессию путем аппроксимации экспериментальных данных, и применение упрощенной формулы теряет всякий смысл.
3. В обеих партиях образцов определение прочности в возрасте 28 суток дало заниженный результат, что ставит под сомнение адекватность стандартной методики оценки показателя прочности цементных вяжущих.
4. Для получения упрощенной расчетной формулы, обеспечивающей высокую сходимость теоретических и экспериментальных данных, необходимо прежде всего применять методику испытаний, гарантирующую исключение скачкообразного изменения прочности цементного камня. Для этого, в свою очередь, необходимо выявить истинные причины подобной динамики.

В качестве основного, можно отметить вывод о том, что данная проблема требует дальнейшего исследования с большим объемом опытных данных и с применением современных методик оценки структурных изменений и физико-химических процессов, протекающих в ходе набора прочности искусственного камня на основе цементного вяжущего.

ЛИТЕРАТУРА

1. Братошевская В.В. Влияние влажности на напряженное состояние в структурах цементного камня и бетона / В.В. Братошевская, В.Н. Мирсоянов, Р.В. Мирсоянов // Современная наука: актуальные проблемы и пути их решения. 2015. № 1 (14). С. 18–21.
2. Макридин Н.И. Фазовый состав и механические свойства модифицированной гидратационной структуры цементного камня многолетнего твердения / Н.И. Макридин, О.В. Тараканов, И.Н. Максимова, И.А. Суров // Приволжский научный журнал. 2014. № 4 (32). С. 127–133.

3. Петрова Т.М. Теоретические основы прогнозирования влияния водоцементного отношения на величину ранней прочности пластифицированного цементного камня / Т.М. Петрова, А.Ф. Серенко // Вестник гражданских инженеров. 2009. № 1 (18). С. 61–64.
4. Бердов Г.И. Влияние вида и количества минеральных добавок на прочность цементного камня / Г.И. Бердов, Л.В. Ильина // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2010. № 9. С. 87–91.
5. Макридин Н.И. Фактор времени в формировании конструкционной прочности модифицированной структуры цементного камня / Н.И. Макридин, И.Н. Максимова // Сухие строительные смеси. 2012. № 4. С. 37–40.
6. Снежков Д.Ю., Леонович С.Н. Повышение достоверности контроля прочности бетона неразрушающими методами на основе их комбинирования / Д.Ю. Снежков, С.Н. Леонович // Промышленное и гражданское строительство. – 2018. – № 1. – С. 25–32.
7. Теория и практика судебной строительно-технической экспертизы / А.Ю. Бутырин – М.: ОАО «Изд. дом «Городец», 2006.
8. Королев А.С. Применение физической модели сфералитно-решетчатой структуры при прогнозировании прочности цементного камня и бетона // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2008. № 25 (125). С. 9–15.
9. Коровкин М.О. Влияние аутогенной усадки на кинетику твердения бетона / М.О. Коровкин, Н.А. Ерошкина // Образование и наука в современном мире. Инновации: Пензенский государственный университет архитектуры и строительства. 2016. №6–2. С. 239–244.
10. Максимова И.Н. Комплексная оценка механического поведения модифицированной структуры цементного камня разного возраста / И.Н. Максимова, Н.И. Макридин, Ю.П. Скачков, Е.А. Тамбовцева // Региональная архитектура и строительство. 2014. № 3. С. 29–36.
11. Максимова И.Н. Регрессионные зависимости основных свойств цементного камня при изменении его структуры и возраста / И.Н. Максимова, Н.И. Макридин, Е.А. Тамбовцева, В.Т. Ерофеев // Региональная архитектура и строительство. 2015. № 2 (23). С. 37–44.
12. Максимова И.Н. Комплексная оценка параметров качества структуры и механики разрушения цементного камня / И.Н. Максимова, В.Т. Ерофеев, Н.И. Макридин, Ю.В. Полубарова // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2015. № 3 (675). С. 14–22.
13. Mchedlov-Petrossyan O.P. Energetic state and diagnostics of cement materials / O.P. Mchedlov-Petrossyan, V.L. Chernyavski // Cemento. – 1993. – Vol. 90. – № 2. – P. 85–92.
14. Бойкова А.И. Изоморфные примеси в решётках клинкерных фаз – главный фактор их химической активации / А.И. Бойкова // Цемент. – 1986. – № 9. – С. 3–6.
15. Степанова И.Н. Возможность воздействия на активность поверхности цементных минералов / И.Н. Степанова, Л.С. Лукина // Цемент. – 1992. – № 6. – С. 75–78.

16. Шабров А.А. Эволюция активных центров в процессе твердения вяжущих веществ / А.А. Шабров, М.С. Гаркави // Цемент. – 2000. – № 1. – С. 17–19.
17. Лотов В.А. Нанодисперсные системы в технологии строительных материалов и изделий / В.А. Лотов // Изв. Томск. политехн. ун-та. – 2007. – Т. 311. – № 3. – С. 84–88, 141–142.
18. Комохов П.Г. Процессы твердения минеральных вяжущих в аспекте структурной механики бетона / П.Г. Комохов // Современ. пробл. строит. материаловед.: 2 Акад. чтения Рос. акад. архит. и строит. наук: Матер. междунар. науч.-техн. конф., [Казань, 1996]. – Казань, 1996. – Ч. 1 – С. 3–8.
19. Makro-Mikro-Nano – Nanotechnologie fur die Bindemittel- und Betonentwicklung / Middendorf Bernhard // Betonwerk + Fertigteil-Techn. – 2005. – Vol. 71. – N 2. – P. 18, 19.
20. Lei Wei Guo. Microstructure and flow behavior of fresh cement paste / Lei Wei Guo, Struble Leslie J. // J. Amer. Ceram. Soc. – 1997. – Vol. 80. – N 8. – P. 2021–2028.
21. Girao A.V. Imposition, morphology and nanostructure of C-S-H in 70 % white Portland cement – 30 % fly ash blends hydrated at 550 / A.V. Girao, I.G. Richardson, R. Taylor, R.M.D. Brydson // Cem. and Concr. Res. – 2010. – Vol. 40. – N 9. – P. 1350–1359.
22. Fratini Emiliano. Hydration water and microstructure in calcium silicate and aluminate hydrates / Emiliano Fratini, Francesca Ridi, Sow-Hsin Chen, Piero Baglioni // J. Phys.: Condens. Matter. – 2006. – Vol. 18. – N 36. – P. 2467–2483.
23. Баженов Ю.М. Технология бетона: Учеб пособие для технол. спец. строит. вузов. 2-ое изд., перераб. – М.: Высш. шк., 1987. – 415 с.
24. Миронов С.А. Теория и методы зимнего бетонирования. Изд. 3-е, перераб. и доп. М., Стройиздат, 1975. 700 с.
25. Райхель В., Глатте Р. Бетон. В 2-х ч. Ч. 2. Изготовление. Производство работ. Твердение / Пер. с нем. Л.А. Феднера; Под ред. В.Б. Ратинова. – М.: Стройиздат, 1981. – 112 с.
26. Максимова И.Н. Влияние наногидросиликатов кальция, модифицированных апротонными кислотами, на формирование прочности дисперсно-кристаллитной структуры цементного камня / И.Н. Максимова, Н.И. Макридин, И.А. Суров // Региональная архитектура и строительство. 2014. № 2. С. 63–68.
27. Пшеничный Г.Н. Скачкообразность твердения и деструкция цементных бетонов // Технологии бетонов. 2011. № 1–2. С. 37–42.
28. Пшеничный Г.Н. О «стадийности» твердения и деструкции цементных систем // Технологии бетонов. 2012. № 3–4 (68–69). С. 55–59.
29. Пшеничный Г.Н. Периодичность сбросов прочности цементных бетонов: миф или реальность // Безопасность труда в промышленности. 2015. № 3. С. 60–65.

Ukrainskiy Ilya Sergeevich

Pacific national university, Khabarovsk, Russia
E-mail: 006012@pnu.edu.ru

Kamenchukov Aleksey Viktorovich

Pacific national university, Khabarovsk, Russia
E-mail: 006641@pnu.edu.ru

Dynamics of strength set of artificial stone based on cement binder

Abstract. The article discusses the existing theories of physical and chemical processes occurring in artificial stone based on cement binder, which affect the dynamics of strength gain. The mathematical model of continuously increasing strength of cement stone according to the logarithmic law is investigated. The authors have questioned the adequacy of the application of such theories in the study of the impact on the growth of strength of such measures as the use of surfactants, mineral additives, changes in the water-cement ratio, etc. The authors propose to investigate the influence of such factors on the dynamics of changes in the strength of cement stone as a whole. The main arguments of the theory of hopping strength set and destruction of cement systems are mentioned. To assess the relevance of the problem, the authors planned an experiment to construct curves for the dynamics of strength gain of artificial stone based on a cement binder. During the experiment, two batches of samples were tested with six series each. Samples were tested at the age of 3, 7, 14, 28, 56 and 84 days. The values obtained during the experiment showed significant differences in the early age of hardening. Based on experimental data, within the framework of the existing theory of strength set of artificial stone based on cement binder, theoretical curves of strength change over time were obtained. The simulation results were compared with the results of the experiment and with each other. Based on the results of the analysis of experimental studies and theoretical calculations, arguments for and against existing theories were put forward.

Keywords: cement stone; hydration of cement binder; adhesive bonds; hardening and destruction of cement stone; dynamics of strength growth of cement systems; logarithmic law of concrete strength growth; approximation of experimental data

REFERENCES

1. Bratoshevskaya V.V., Mirsoyanov V.N., Mirsoyanov R.V. (2015). The effect of humidity on the stress state in the structures of cement stone and concrete. *Modern Science: Actual Problems and Solutions*, 1(14), pp. 18–21 (in Russian).
2. Makridin N.I., Tarakanov O.V., Maksimova I.N., Surov I.A. (2014). Phase composition and mechanical properties of the modified hydration structure of cement stone of many years hardening. *Volga Scientific Journal*, 4(32), pp. 127–133 (in Russian).
3. Petrova T.M., Serenko A.F. (2009). The theoretical basis for predicting the effect of water-cement ratio on the value of the early strength of plasticized cement stone. *Bulletin of civil engineers*, 1(18), pp. 61–64 (in Russian).
4. Berdov G.I., Il'ina L.V. (2010). The influence of the type and amount of mineral additives on the strength of cement stone. *International Journal of Applied and Basic Research*, 9, pp. 87–91 (in Russian).

5. Makridin N.I., Maksimova I.N. (2012). The time factor in the formation of structural strength of the modified structure of cement stone. *Dry construction mixtures*, 4, pp. 37–40 (in Russian).
6. Snezhkov D.Yu., Leonovich S.N. (2018). Improving the reliability of control of concrete strength by non-destructive methods based on their combination. *Industrial and Civil Engineering*, 1, pp. 25–32 (in Russian).
7. Butyrin A.Yu. (2006). Teoriya i praktika sudebnoy stroitel'no-tekhnicheskoy ehkspertizy. [*Theory and practice of judicial construction and technical expertise.*] Moscow: OAO Gorodets Publishing House.
8. Korolev A.S. (2008). The use of a physical model of a spherical-lattice structure in predicting the strength of cement stone and concrete. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Construction and Architecture*, 25(125), pp. 9–15 (in Russian).
9. Korovkin M.O., Eroshkina N.A. (2016). The influence of autogenous shrinkage on the kinetics of concrete hardening. *Education and Science in the Modern World. Innovation: Penza State University of Architecture and Construction*, 6–2, pp. 239–244 (in Russian).
10. Maksimova I.N., Makridin N.I., Skachkov Yu.P., Tambovtseva E.A. (2014). A comprehensive assessment of the mechanical behavior of the modified structure of cement stone of different ages. *Regional architecture and construction*, 3, pp. 29–36 (in Russian).
11. Maksimova I.N., Makridin N.I., Tambovtseva E.A., Erofeev V.T. (2015). Regression dependences of the main properties of cement stone with a change in its structure and age. *Regional Architecture and Construction*, 2(23), pp. 37–44 (in Russian).
12. Maksimova I.N., Erofeev V.T., Makridin N.I., Polubarova Yu.V. (2015). A comprehensive assessment of the quality parameters of the structure and mechanics of the destruction of cement stone. *Bulletin of higher education. Building*, 3(675), pp. 14–22 (in Russian).
13. Mchedlov-Petrosyan O.P., Chernyavski V.L. (1993). Energetic state and diagnostics of cement materials. *Cemento*, 2(90), pp. 85–92.
14. Boykova A.I. (1986). Isomorphic impurities in the lattices of clinker phases – the main factor in their chemical activation. *Cement*, 9, pp. 3–6 (in Russian).
15. Stepanova I.N., Lukina L.S (1992). Possibility of influencing surface activity of cement minerals. *Cement*, 6, pp. 75–78 (in Russian).
16. Shabrov A.A., Garkavi M.S. (2000). The evolution of active centers in the process of hardening binders. *Cement*, 1, pp. 17–19 (in Russian).
17. Lotov V.A. (2007). Nanodispersed systems in the technology of building materials and products. *Bulletin of Tomsk Polytechnic University*, 3(311), pp. 84–88, 141–142 (in Russian).
18. Komokhov P.G. (1996). Protsessy tverdeniya mineral'nykh vyazhushchikh v aspekte strukturnoy mekhaniki betona. [*Hardening processes of mineral binders in the aspect of structural mechanics of concrete.*] Kazan: Russian Academy of Architecture and Building Sciences, pp. 3–8.

19. Makro-Mikro-Nano (2005). Nanotechnologie für die Bindemittel- und Betonentwicklung. Middendorf Bernhard. *Betonwerk + Fertigteil-Techn*, 2(71), p. 18, 19.
20. Lei Wei Guo, Struble Leslie J. (1997). Microstructure and flow behavior of fresh cement paste. *J. Amer. Ceram. Soc.*, 8(80), pp. 2021–2028.
21. Girao A.V., Richardson I.G., Taylor R., Brydson R.M.D. (2010). Imposition, morphology and nanostructure of C-S-H in 70 % white Portland cement – 30 % fly ash blends hydrated at 550. *Cem. and Concr. Res.*, 9(40), pp. 1350–1359.
22. Emiliano Fratini, Francesca Ridi, Sow-Hsin Chen, Piero Baglioni (2006). Hydration water and microstructure in calcium silicate and aluminate hydrates. *J. Phys.: Condens. Matter.*, 36(18), – 2006. pp. 2467–2483.
23. Bazhenov Yu.M. (1987). *Tekhnologiya betona. [Concrete technology.]* Moscow: Higher School, p. 415.
24. Mironov S.A. (1975). *Teoriya i metody zimnego betonirovaniya. [Theory and methods of winter concreting.]* Moscow: Stroyizdat, p. 700.
25. Raykhel' V., Glatte R. (1981). *Concrete. In 2 parts. Part 2. Production. Manufacturing jobs. Hardening.* [Russ. ed.: Beton. V 2-kh chastyakh. Chast' 2. Izgotovlenie. Proizvodstvo rabot. Tverdenie. Authorized transl. by L.A. Fedner; Ed. by V.B. Ratinov. Moscow: Stroyizdat, p. 112].
26. Maksimova I.N., Makridin N.I., Surov I.A. (2014). The influence of calcium nanohydrosilicates modified with aprotic acids on the formation of the strength of the dispersed-crystalline structure of cement stone. *Regional Architecture and Construction*, 2, pp. 63–68 (in Russian).
27. Pshenichnyy G.N. (2011). Hardening jumps and destruction of cement concrete. *Concrete Technologies*, 1–2, pp. 37–42 (in Russian).
28. Pshenichnyy G.N. (2012). About the "staged" hardening and destruction of cement systems. *Concrete Technologies*. 2012. № 3–4 (68–69). С. 55–59 (in Russian).
29. Pshenichnyy G.N. (2015). The frequency of cement strength concrete discharges: myth or reality. *Occupational safety in industry*, 3, pp. 60–65 (in Russian).