
В ЛАБОРАТОРИЯХ ВУЗОВ

IN HIGHER SCHOOL LABS

Известия вузов. Строительство. 2021. № 11. С. 134–144.

ISSN 0536-1052

News of Higher Educational Institutions. Construction. 2021; (11): 134–144.

ISSN 0536-1052

Научная статья

УДК 691.555

DOI: 10.32683/0536-1052-2021-755-11-134-144

К ВОПРОСАМ ВЗАИМОСВЯЗИ СТРУКТУРЫ ДОБАВОК-ПЛАСТИФИКАТОРОВ С ВЕЛИЧИНОЙ ВЛАЖНОСТНОЙ УСАДКИ ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ

**Евгений Иванович Шмитько, Наталья Анатольевна Белькова,
Юлия Валерьевна Макушина**

Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

Аннотация. Рассмотрена взаимосвязь величины влажностной усадки модифицированных добавками-пластификаторами цементных систем со структурой и вещественным составом этих добавок. Установлено, что в зависимости от величины вещественного состава добавки изменяется величина дипольного момента, являющегося характеристикой электрических свойств молекул. Показано, что чем выше величина дипольного момента молекул добавок, тем больше их водоредуцирующий и пластифицирующий эффект. Установлено, что вещественный состав добавок является определяющим в прогнозировании величины усадочных деформаций. Наименьшие значения влажностной усадки получены для систем с добавками на основе поликарбоксилатных эфиров, наибольшие – для систем с добавками на основе нафталинсульфонатов и меламинсульфонатов. Величина влажностной усадки также коррелирует с величиной дипольного момента. В диапазоне величин дипольных моментов от 6 до 10 (и более) единиц при его увеличении значения влажностной усадки цементного камня снижаются. То есть величина дипольного момента может выступать как одна из характеристик добавок-пластификаторов.

Ключевые слова: добавки-пластификаторы, усадочные деформации, дипольный момент, водоредуцирующий эффект, цементный камень, модель молекулы

Для цитирования: Шмитько Е.И., Белькова Н.А., Макушина Ю.В. К вопросам взаимосвязи структуры добавок-пластификаторов с величиной влажностной усадки цементных систем // Известия вузов. Строительство. 2021. № 11. С. 134–144. DOI: 10.32683/0536-1052-2021-755-11-134-144.

© Шмитько Е.И., Белькова Н.А., Макушина Ю.В., 2021

Original article

TO ISSUES OF INTERACTION OF STRUCTURE OF ADDITIVES-PLASTICIZERS WITH VALUE OF MOISTURE SHRINKAGE OF CEMENT SYSTEMS

Evgeny I. Shmitko, Natalya A. Belkova, Yuliya V. Makushina
Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract. The relationship of moisture shrinkage value of cement systems modified with additives-plasticizers with structure and material composition of these additives is considered. It was found that depending on the value of the material composition of the additive, the value of the dipole moment, which is a characteristic of the electrical properties of molecules, varies. It has been shown that the higher the amount of dipole moment of additive molecules, the greater their water reducing and plasticizing effect. It was found that the material composition of additives is decisive in predicting the value of shrinkage deformations. The lowest values of moisture shrinkage are obtained for systems with additives based on polycarboxylate esters, the largest – for systems with additives based on naphthalene sulfonates and melamine sulfonates. The humidity shrinkage value also correlates with the dipole moment value. In the range of values of dipole moments from 6 to 10 (and more) units, when it increases, the values of moisture shrinkage of cement stone decrease. That is, the magnitude of the dipole moment may act as one of the characteristics of the plasticizer additives.

Keywords: plasticizer additives, shrinkage strains, dipole moment, water reducing effect, cement stone, model of molecule

For citation: Shmitko E.I., Belkova N.A., Makushina Yu.V. To issues of interaction of structure of additives-plasticizers with value of moisture shrinkage of cement systems. *News of Higher Educational Institutions. Construction.* 2021; (11): 134–144. (In Russ.). DOI: 10.32683/0536-1052-2021-755-11-134-144.

Влажностная усадка цементных бетонов является одним из основных свойств, влияющих на долговечность железобетонных конструкций. Механизмы проявления материалами деформаций усадки были изучены и изложены в работах А.Е. Шейкина, А.Е. Десова, Е.М. Чернышова, Г.С. Славчевой и др. [1–4]. Согласно этим исследованиям в процессе обезвоживания и испарения влаги происходит изменение баланса внутренних сил: капиллярных стягивающих и сил поверхностного натяжения (расклинивающих), зависящего от состава и структуры материала.

Главная особенность структуры цементных бетонов заключается в высокой степени ее неоднородности. Исследованиями Е.М. Чернышова [5, 6] предложено выделять в структуре строительных материалов несколько масштабных уровней, в частности: микрокомпозиционный – структура цементного камня; мезокомпозиционный – структура цементно-песчаного раствора; макрокомпозиционный – структура бетона как система из заполнителя и цементно-песчаного раствора. Для нас наибольший интерес представляет микрокомпозиционный уровень. К основным технологическим факторам, обеспечивающим формирование структуры цементного камня, относятся характеристики используемого цемента, характеристики применяемых добавок, параметры технологии изготовления изделий (уплотнения и твердения).

Основные закономерности влажностной усадки для чистых (бездобавочных) и для модифицированных добавками цементных систем были изучены

в работах [7–11]. Так, в исследованиях [11] было установлено, что введение добавок-пластификаторов различного состава приводит к значительным изменениям в структуре цементного камня: общая пористость цементного камня снижается с 10,6 до 7,8 %, увеличивается количество тонкодисперсных капиллярных пор, отвечающих за величину влажностной усадки. Это влечет значительное повышение чувствительности материалов к изменению влажности окружающей среды. Таким образом, вопросы прогнозирования величины влажностной усадки модифицированных цементных систем являются весьма актуальными.

В наших работах [12, 13] проведены исследования влияния вида добавок-пластификаторов на показатель влажностной усадки цементного камня и установлено, что химический состав, строение и принцип действия суперпластификаторов являются определяющими. Было предложено разделить добавки-пластификаторы на два больших блока (по показателю величины поверхностного натяжения): в первый блок входят добавки на основе лигносульфонатов и поликарбоксилатных эфиров, во второй – на основе нафталинсульфонатов и меламинсульфонатов.

Однако результаты исследований ученых касаются только качественной оценки влияния вида и химического состава добавок на структуру и свойства цементного камня [13–16]. Современные технологии предполагают разработку методов выявления взаимосвязи между строением (структурой) органического соединения и проявляемыми им свойствами.

Исследованиями [14, 15] было установлено, что эффективность поверхностно-активных веществ (к ним относятся и добавки-пластификаторы) определяется природой активных групп, изменение которых приводит к преобразованию энергии взаимосвязи добавок с гидратированными частицами цемента и, следовательно, влиянию ее на свойства цементных композиций.

В исследованиях П.И. Юхневского, В.С. Солдатова и др. [17–19] была разработана и предложена методика оценки пластифицирующей эффективности добавок по показателю дескриптора молекулярной структуры (например, по величине дипольного момента молекул).

Целью настоящих исследований было выявление взаимосвязи между величиной дипольного момента добавок-пластификаторов различного вещественного состава и величиной влажностной усадки цементного камня.

В исследованиях использовались добавки-пластификаторы, относящиеся к четырем основным используемым группам: «Реопласт NSL 10» (группа модифицированных лигносульфонатов), «ПФМ-НЛК» (группа нафталинсульфонатов), «Зикамент ФФ» (группа меламинсульфонатов), ГПМ-У (группа поликарбоксилатных эфиров).

Для каждого вида пластификатора, согласно их структурной формуле, проводились построения моделей молекул и с помощью программного пакета WinMoras 7.21 осуществлялись квантово-химические расчеты с использованием полупирического модельного Гамильтониана MNDO(d) [20]. Затем оценивался водоредуцирующий эффект добавок-пластификаторов по ГОСТ 30459–2008 и его соответствие величине дипольного момента молекул.

Далее проводились исследования влияния вида добавки на величину усадочных деформаций цементного камня и ее корреляцию с величиной

дипольного момента молекул. Испытания выполнялись в соответствии с ГОСТ 24544–2020.

Для изготовления образцов использовался цемент класса ЦЕМ I 42,5Н производства «Осколцемент». Значения отношений В/Ц были приняты по результатам наших предыдущих исследований [21] и составили 0,25; 0,3; 0,4. Расходы добавок приняты как по результатам наших исследований, так и по рекомендациям производителей каждого конкретного вида добавки.

В таблице представлены результаты моделирования структуры молекул добавок-пластификаторов и расчета величины дипольных моментов молекул.

По результатам моделирования и расчетов установлено, что для пластификаторов на основе лигносульфонатов характерны минимальные значения величины дипольного момента (4,7). Максимальные значения соответствуют пластификаторам на основе поликарбоксилатных эфиров. У пластификаторов на основе нафталинсульфонатов и меламинсульфонатов находятся в пределах 6,5–7,5.

Если сопоставить эти данные с полученными ранее результатами исследований о влиянии вещественного состава добавок на величину их поверхностного натяжения [21], то добавки на основе нафталинсульфонатов и меламинсульфонатов отнесены нами ко второму блоку и им соответствуют близкие

Характеристики и структура молекул добавок пластифицирующего действия
Characteristics and structure of molecules of plasticizing additives

Тип добавки	Марка	Структурная формула	Модель молекулы	Дипольный момент молекулы
Лигносульфонат (LS)	Полипласт П-1 Реопласт NSL 10 Зика Пластимент Лигапан Б-3 ЛСТМ-2			4,7
Нафталин-сульфонат (NS)	С-3 СП НКНС 40-03 ПФМ-НЛК Полипласт СП-1 Кризо Флюид Ломар Д			6,9
Меламин-сульфонат (MS)	Зикамент ФФ Химком Ф-1 СП 10-03 Конпласт М1 Мелмент			7,3
Поликарбоксилатный эфир (PCE)	Криопласт П ГПМ-У Вискокрит-20ШЕ Зика Вискокрит-3 Аддимент ФМ 40			10,6

Примечание. ● – C; ● – H; ● – O; ● – S; ● – Na; ● – N.

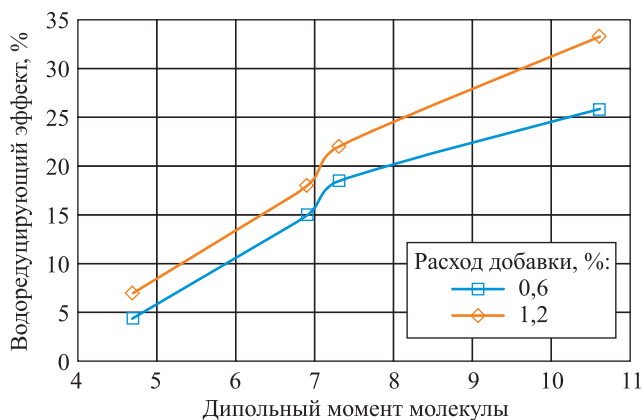


Рис. 1. Изменение величины дипольного момента добавок-пластификаторов от величины дипольного момента молекул

Fig. 1. Change in the magnitude of the dipole moment of plasticizer additives from the magnitude of the dipole moment of molecules

значения величины дипольного момента. В первый блок были отнесены добавки на основе лигносульфонатов и поликарбоксилатных эфиров, для которых величина дипольного момента молекул очень сильно отличается. Это можно объяснить различием в механизме действия добавок: для добавок на основе поликарбоксилатов помимо электростатического характерен еще и стерический эффект за счет особенностей структуры этих добавок (наличия больших боковых цепей).

Результаты исследований взаимосвязи величины дипольного момента с водоредуцирующим эффектом для двух значений расхода добавки (0,6 и 1,2 % от массы цемента) представлены на рис. 1. Установлено, что водоредуцирующий эффект практически линейно зависит от величины дипольного момента.

Наименее этот эффект проявляется для добавки Реопласт NSL 10 (на основе лигносульфонатов), в наибольшей степени – для добавки ГПМ-У (на основе поликарбоксилатных эфиров): 6,9 и 33,3 % соответственно (для расхода добавки 1,2 % от массы цемента). Эти данные коррелируют с исследованиями, проведенными П.И. Юхневским [17]. Если рассмотреть полученные результаты с точки зрения классификации добавок по ГОСТ 24211–2008, то добавка Реопласт NSL 10 будет относиться к пластифицирующим (снижение водопотребности смеси составило менее 7 % даже для расхода 1,2 % от массы цемента). Добавки ПФМ-НЛК и Зикамент ФФ (имеющие близкие значения дипольного момента) являются водоредуцирующими (величина снижения водопотребности находится в пределах от 7 до 20 %). И только добавка ГПМ-У с величиной дипольного момента более 10 единиц будет относиться к суперводоредуцирующим даже при небольших расходах (0,6 % от массы цемента) – снижение водопотребности составило 26 %.

На рис. 2 представлены результаты исследования влияния вида добавок на процесс влажностной усадки цементного камня с различными отношениями В/Ц.

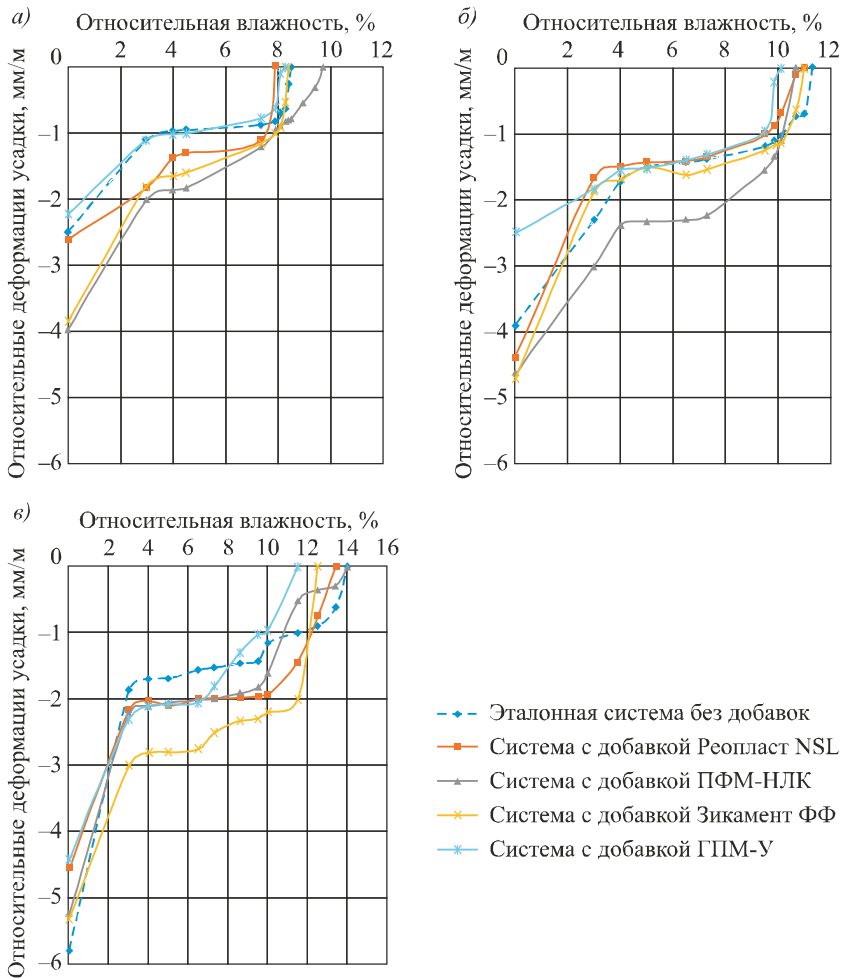


Рис. 2. Кривые усадки цементного камня
 а – В/Ц = 0,25; б – В/Ц = 0,3; в – В/Ц = 0,4
 Fig. 2. Shrinkage curves of cement stone
 а – V/C = 0,25; б – V/C = 0,3; в – V/C = 0,4

Согласно полученным данным, минимальные значения величины усадки наблюдаются для цементного камня с добавкой ГПМ-У при всех значениях В/Ц отношений. Так, при В/Ц = 0,25 величина усадочных деформаций составила 2,23 мм/м, что ниже, чем у бездобавочной системы (2,5 мм/м). При повышении отношения В/Ц до 0,4 этот показатель снизился с 5,8 до 4,4 мм/м. Что касается добавки Реопласт NSL 10 (отнесенной к первому блоку добавок вместе с добавками на основе поликарбоксилатных эфиров), то при В/Ц, равных 0,25 и 0,3, отмечено некоторое повышение значений усадочных деформаций относительно бездобавочной системы (до 2,6 и 4,4 мм/м соответственно). При В/Ц = 0,4 усадка снижается до 4,5 мм/м (примерно на 20 %).

Для систем с добавками ПФМ-НЛК и Зикамент ФФ, отнесенными ко второму блоку, значения усадочных деформаций при В/Ц = 0,25 значительно превышают (на 50–60 %) величину усадки, полученную для бездобавочной эталонной системы. При В/Ц = 0,3 этот разрыв становится менее значитель-

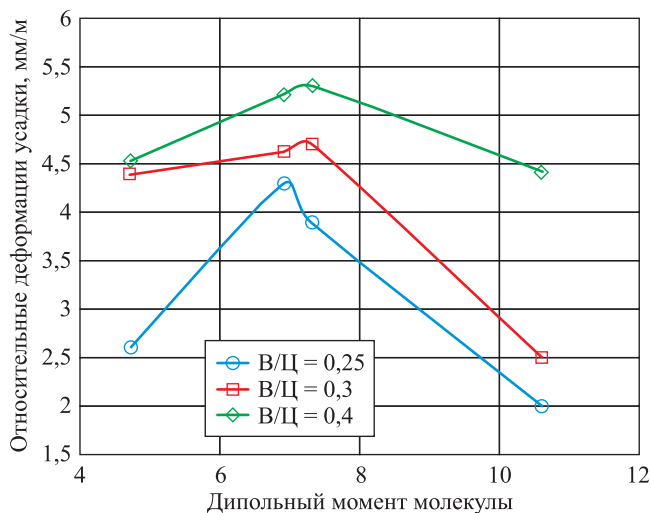


Рис. 3. Зависимость величины усадочных деформаций от значения дипольного момента молекул добавок-пластификаторов

Fig. 3. Dependence of the magnitude of shrinkage deformations on the value of the dipole moment of the molecules of plasticizer additives

ным (до 15 %), и, наконец, при $V/C = 0,4$ величина усадки у систем с этими добавками на 15–20 % ниже, чем у эталона.

Теперь обратимся к результатам, представленным на рис. 3. Добавкам, имеющим небольшое значение дипольного момента (4,6), соответствуют относительно небольшие значения величины усадочных деформаций для всех значений V/C отношений. Повышение значения дипольного момента до 6–7 приводит к увеличению значений усадки на 15–60 % в зависимости от исходного V/C отношения (это характерно для добавок на основе нафталинсульфонатов и меламинасульфонатов). При достижении значений дипольного момента 10,0 (для добавок на основе поликарбоксилатных эфиров) и выше величина усадочных деформаций снижается примерно на 20–80 %. То есть отсутствует четкое разделение исследованных типов добавок на два блока: добавкам на основе лигносульфонатов и поликарбоксилатных эфиров, отнесенным к первому блоку по показателю поверхностного натяжения, соответствуют минимальное и максимальное значения дипольного момента молекул. При этом для добавок второго блока (величины дипольного момента находятся в пределах 6–7 единиц) значения усадочных деформаций довольно близки.

Если рассмотреть полученные результаты через призму показателя водоредуцирующей способности, то (как показывают вышеизложенные исследования) добавки ПФМ-НЛК, Зикамент ФФ и ГПМ-У относятся к классу водоредуцирующих и для них прослеживается четкая зависимость: повышение величины дипольного момента молекул приводит к снижению величины усадочных деформаций. Добавка Реопласт NSL 10 относится к пластифицирующим, чему соответствует и величина дипольного момента ее молекул, этим и можно объяснить ее «выпадение» из общей картины. Также необходи-

мо сделать следующую ремарку: все расчеты проведены для обобщенной структурной формулы добавок, что вносит свои возмущения в общую картину исследований.

В целом можно сделать общий вывод: показатель дипольного момента молекул можно использовать в качестве обобщенной характеристики пластифицирующих добавок, предопределяющих не только их основные (пластифицирующие и водоредуцирующие) свойства, но и величину усадочных деформаций. При этом величина дипольного момента должна быть рассчитана для каждой конкретной марки добавки с учетом ее точной химической формулы и может быть использована производителями добавок в качестве одного из параметров идентификации и прогнозирования их свойств.

Список источников

1. Шейкин А.Е., Бруссер М.И. Структура и свойства цементных бетонов. М.: Стройиздат, 1979. 343 с.
2. Десов А.Е. Некоторые вопросы теории усадки бетона // Ползучесть и усадка бетона и железобетонных конструкций. Состояние проблемы и перспективы развития. М.: Стройиздат, 1978. С. 211–255.
3. Чернышов Е.М., Славчева Г.С. Управление эксплуатационной деформируемостью и трещиностойкостью макропористых (ячеистых) бетонов. Ч. 1. Контекст проблемы и вопросы теории // Строит. материалы. 2014. № 1-2. С. 105–112.
4. Чернышов Е.М., Славчева Г.С. Физико-химическая природа взаимосвязи свойств строительных материалов с их влажностным состоянием // Academia. 2008. № 1. С. 87–92.
5. Чернышов Е.М. Материаловедение и технология строительных композитов как система научного знания и предмет развития исследований. Ч. 2. Развитие и эволюция научного знания о конгломератных строительных композитах как структурированных системах // Изв. вузов. Строительство. 2020. № 1. С. 57–77.
6. Чернышов Е.М., Макеев А.И. К развитию теории конструирования и синтеза структур конгломератных строительных композитов // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования Российской академии архитектуры и строительных наук по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2019 г.: сб. науч. тр. РААСН. М., 2020. С. 482–502.
7. Калиновская Н.Н., Котов Д.С., Щербицкая Е.В. Усадочные деформации модифицированного бетона. Причины и способы устранения // Вестн. Полоцк. гос. ун-та. Серия Ф. 2018. № 8. С. 82–87.
8. Slowik V., Schmidt M., Fritsch R. Capillary pressure in fresh cement based materials and identification of the air entry value // Cement & Concrete Composites. 2008. № 30. P. 557–565.
9. Соловьев В.И., Ткач Е.В., Серова Р.Ф., Ткач С.А., Тоимбаева Б.М., Сейдинова Г.А. Исследование пористости цементного камня, модифицированного комплексными органоминеральными модификаторами // Фундаментальные исследования. 2014. № 8-3. С. 590–595.
10. Крамар Л.Я., Трофимов Б.Я., Черных Т.Н., Орлов А.А. Современные суперпластификаторы для бетонов, особенности их применения и эффективность // Строит. материалы. 2016. № 10. С. 21–25.
11. Корчунов И.В., Торшин А.О., Курдюмова С.Е., Дмитриева Е.А., Потапова Е.Н. Влияние эффективных водоредуцирующих добавок на свойства цемента // Сухие строит. смеси. 2017. № 2. С. 31–35.

12. Макушина Ю.В., Шмитько Е.И., Белькова Н.А. Пути оптимизации качества цементных бетонов по показателю влажностной усадки // Химия, физика и механика материалов. 2020. № 4. С. 50–65.
13. Шмитько Е.И., Макушина Ю.В., Белькова Н.А., Милохин И.В. Влажностная усадка бетона: влияние состава и структуры применяемых пластифицирующих добавок // Вестн. Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2020. № 1. С. 128–135.
14. Баженев Ю.М., Демьянова В.С., Калашиников В.И. Модифицированные высококачественные бетоны. М.: Изд-во АСВ, 2006. 368 с.
15. Каприелов С.С., Травуш В.И., Шейнфельд А.В. Модифицированные бетоны нового поколения в сооружениях ММДЦ «Москва-Сити» // Строит. материалы. 2006. № 10. С. 8–12.
16. Батраков В.Г., Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Силина Е.С. Модифицированные бетоны в практике современного строительства // Пром. и гражд. стр-во. 2002. № 9. С. 23–25.
17. Юхневский П.И., Зеленковский В.М., Солдатов В.С. Квантово-химические расчеты структурных и энергетических характеристик молекул полиметиленафталинсульфатного суперпластификатора цементных систем С-3 // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. 2011. Т. 55, № 1. С. 71–74.
18. Юхневский П.И. Критериальная оценка добавок-пластификаторов бетонных смесей для прогноза их эффективности // Изв. вузов. Строительство. 2012. № 5. С. 36–43.
19. Юхневский П.И. О взаимосвязи характеристик молекулярной структуры химических добавок-пластификаторов с их эффективностью в цементных композициях // Наука и техника. 2012. № 1. С. 48–52.
20. Thiel W. Advances in chemical physics. 1996. Vol. 93. P. 703–757.
21. Шмитько Е.И., Белькова Н.А., Макушина Ю.В. Влияние поверхностно-активных веществ на влажностную усадку бетонов // Строит. материалы. 2018. № 4. С. 48–51.

References

1. Sheykin A.E., Brusser M.I. Structure and properties of cement concrete. Moscow: Stroyizdat, 1979. 343 p. (In Russ.).
2. Desov A.E. Some questions of concrete shrinkage theory. Creep and shrinkage of concrete and reinforced concrete structures. Status of the problem and prospects for development. Moscow: Stroyizdat, 1978. P. 211–255. (In Russ.).
3. Chernyshov E.M., Slavcheva G.S. Control of operational deformability and crack resistance of macroporous (cellular) concrete. P. 1. Context of the problem and questions of theory. *Stroitel'nyye materialy = Construction materials*. 2014; (1-2): 105–112. (In Russ.).
4. Chernyshov E.M., Slavcheva G.S. Physicochemical nature of interaction of properties of building materials with their humidity stat. *Academia*. 2008; (1): 87–92. (In Russ.).
5. Chernyshov E.M. Materials science and technology of construction composites as a system of scientific knowledge and subject of research development. P. 2. Development and evolution of scientific knowledge of conglomerate building composites as structured systems. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo = News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2020; (1): 57–77. (In Russ.).
6. Chernyshov E.M., Makeev A.I. Towards the development of the theory of construction and synthesis of structures of conglomerate building composites. Fundamental, search and applied research of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2019. Collection of scientific works of RAACS. Moscow, 2020. P. 482–502. (In Russ.).

7. Kalinovskaya N.N., Kotov D.S., Shcherbitskaya E.V. Shrinkage strains of modified concrete. Causes and Solutions. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F = Bulletin of Polotsk State University. Series F*. 2018; (8): 82–87. (In Russ.).
8. Slowik V., Schmidt M., Fritsch R. Capillary pressure in fresh cement based materials and identification of the air entry value. *Cement & Concrete Composites*. 2008; (30): 557–565.
9. Solov'ev V.I., Tkach E.V., Serova R.F., Tkach S.A., Toimbaeva B.M., Seydinova G.A. Study of porosity of cement stone modified with complex organomineral modifiers. *Fundamental'nyye issledovaniya = Fundamental research*. 2014; (8-3): 590–595. (In Russ.).
10. Kramar L.Ya., Trofimov B.Ya., Chernykh T.N., Orlov A.A. Modern superplasticizers for concrete, features of their application and efficiency. *Stroitel'nyye materialy = Construction materials*. 2016; (10): 21–25. (In Russ.).
11. Korchunov I.V., Torshin A.O., Kurdyumova S.E., Dmitrieva E.A., Potapova E.N. Effect of effective water reducing additives on cement properties. *Sukhiye stroitel'nyye smesi = Dry building mixtures*. 2017; (2): 31–35. (In Russ.).
12. Makushina Yu.V., Shmitko E.I., Belkova N.A. Ways to optimize the quality of cement concrete by humidity shrinkage. *Khimiya, fizika i mekhanika materialov = Chemistry, Physics and Mechanics of Materials*. 2020; (4): 50–65. (In Russ.).
13. Shmitko E.I., Makushina Yu.V., Belkova N.A., Milokhin I.V. Moisture shrinkage of concrete: influence of composition and structure of applied plasticizing additives. *Vestnik Inzhenernoy shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta = Bulletin of the Engineering School of the Far Eastern Federal University*. 2020; (1): 128–135. (In Russ.).
14. Bazhenov Yu.M., Dem'yanova V.S., Kalashnikov V.I. Modified high-quality concrete. Moscow, 2006. 368 p. (In Russ.).
15. Kaprielov S.S., Travush V.I., Sheynfel'd A.V. Modified concretes of a new generation in structures MMDC «Moscow-City». *Stroitel'nyye materialy = Construction materials*. 2006; (10): 8–12. (In Russ.).
16. Batrakov V.G., Kaprielov S.S., Sheynfel'd A.V., Silina E.S. Modified concrete in the practice of modern construction. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo = Industrial and civil engineering*. 2002; (9): 23–25. (In Russ.).
17. Yukhnevskiy P.I., Zelenkovskiy V.M., Soldatov V.S. Quantum-chemical calculations of structural and energy characteristics of polymethylene naphthalene sulfate superplasticizer molecules of cement systems S-3. *Doklady Natsional'noy akademii nauk Belarusi = Reports of the National Academy of Sciences of Belarus*. 2011; 55 (1): 71–74. (In Russ.).
18. Yukhnevskiy P.I. Benchmark evaluation of concrete mixture plasticizer additives to predict their effectiveness. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo = News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2012; (5): 36–43. (In Russ.).
19. Yukhnevskiy P.I. On the relationship of molecular structure characteristics of chemical additives-plasticizers with their effectiveness in cement compositions. *Nauka i tekhnika = Science and technology*. 2012; (1): 48–52. (In Russ.).
20. Thiel W. Advances in chemical physics. 1996. Vol. 93. P. 703–757.
21. Shmitko E.I., Belkova N.A., Makushina Yu.V. Effect of surfactants on wet shrinkage of concrete. *Stroitel'nyye materialy = Construction materials*. 2018; (4): 48–51. (In Russ.).

Информация об авторах

Е.И. Шмитько – доктор технических наук, профессор
Н.А. Белькова – кандидат технических наук, доцент
Ю.В. Макушина – аспирант

Information about the authors

E.I. Shmitko – DSc, Professor

N.A. Belkova – PhD, Ass. Professor

Yu.V. Makushina – Post-graduate Student

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 16.09.2021

Одобрена после рецензирования 18.10.2021

Принята к публикации 25.10.2021

The article was submitted 16.09.2021

Approved after reviewing 18.10.2021

Accepted for publication 25.10.2021