

Научная статья
УДК 66. 022.3: [628.4:663.1]:69
DOI: 10.14529/build240106

ВЛИЯНИЕ ИЗВЕСТНЯКА В ЦЕМЕНТЕ НА СТРУКТУРУ И МОДУЛЬ УПРУГОСТИ ТЯЖЁЛОГО БЕТОНА

Л.Я. Крамар, *kramar-l@mail.ru*
М.В. Мордовцева, *mariamordovtseva@mail.ru*
К.В. Шулдяков, *shuldiakovkv@susu.ru*
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. В России в начале XXI века были активизированы работы по адаптации российских строительных стандартов к европейским. В связи с этим принятое в Советском Союзе решение не вводить в вяжущие добавки известняк в новом ГОСТ 31108 «Цементы общестроительные. Технические условия» было отменено. И в 2003 году российским ГОСТом был разрешен выпуск ЦЕМ II/A-I с содержанием известняка от 6 до 20 %, а в 2016 году – введен еще и ЦЕМ II/B-I с содержанием известняка от 21 до 35 %. Однако ранее исследованиями школы В.В. Тимашева было доказано, что применение добавки известняка в дозировке до 5 % положительно влияет на фазовый состав цементного камня и вносит только стабилизирующий эффект при его увеличении до 10 %. Введение добавки известняка в цемент свыше 10 % начинает существенно влиять на фазовый состав гидратов, модуль упругости и коэффициент Пуассона бетона, поэтому применять его в составе цемента свыше 5 % следует только после дополнительных испытаний конкретного состава бетона, предназначенного для эксплуатации в строго заданных условиях.

Ключевые слова: известняк, цемент, цементный камень, структура, бетон, модуль упругости, коэффициент Пуассона

Для цитирования. Крамар Л.Я., Мордовцева М.В., Шулдяков К.В. Влияние известняка в цементе на структуру и модуль упругости тяжёлого бетона // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2024. Т. 24, № 1. С. 40–49. DOI: 10.14529/build240106

Original article
DOI: 10.14529/build240106

EFFECT OF LIMESTONE IN CEMENT ON THE STRUCTURE AND MODULUS OF ELASTICITY OF CONCRETE

L.Ya. Kramar, *kramar-l@mail.ru*
M.V. Mordovtseva, *mariamordovtseva@mail.ru*
K.V. Shuldyakov, *shuldiakovkv@susu.ru*
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The beginning of the 21st century in Russia was marked by the intensification of activities aimed at adapting Russian construction standards to European ones. In this connection, they cancelled the decision taken in the Soviet Union not to introduce limestone additives into binders in the new GOST 31108 “Cements for general construction. Technical conditions”. Moreover, in 2003 the Russian GOST allowed the production of CEM II/A-I with limestone content from 6 to 20%, and in 2016 – introduced also CEM II/B-I with limestone content from 21 to 35%. However, earlier, the studies of V.V. Timashev’s school proved that the use of limestone additive in the dosage up to 5% positively affects the phase composition of cement stone and makes only a stabilizing effect when it is increased to 10%. The introduction of limestone admixture in cement above 10% starts to significantly affect the phase composition of hydrates, elastic modulus and Poisson's ratio of concrete, therefore it should be used in cement composition above 5% only after additional tests of concrete composition intended for operation in strictly specified conditions.

Keywords: limestone, cement, cement stone, structure, concrete, modulus of elasticity, Poisson's ratio

For citation. Kramar L.Ya., Mordovtseva M.V., Shuldyakov K.V. Effect of limestone in cement on the structure and modulus of elasticity of concrete. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2024;24(1):40–49. (in Russ.). DOI: 10.14529/build240106

Введение

Технология бетона за рубежом и в России особенно активно развивается со второй половины XX века и наращивает темпы в XXI. Значительная часть возводимых бетонных сооружений, как правило, эксплуатируется в условиях с повышенной и высокой агрессивностью окружающей среды, к ним относят подземные сооружения, покрытия дорог и аэродромов, конструкции промышленных зданий, общественных сооружений и других объектов. Для современного строительства необходима разработка и получение долговечных конструкционных материалов, отличающихся высокой стойкостью к различным воздействиям среды эксплуатации. Получить такие строительные материалы невозможно без применения добавок различного назначения в производстве бетона, позволяющих управлять его структурой и техническими свойствами.

При производстве строительных материалов активно применяют добавки, способствующие целенаправленному формированию структуры цементного камня в бетоне и обеспечивающие ему в каждом конкретном случае необходимые свойства и долговечность [1–7]. К таким добавкам относят суперпластификаторы первого и второго поколения, позволяющие значительно снизить водоцементное отношение, пористость бетона и, соответственно, повышать его долговечность [5, 8–10]. В комплексе с суперпластификаторами применяют модификаторы структуры цементного камня, которые изменяют его фазовый состав, способствуя повышению стойкости бетона к агрессивным воздействиям различных сред эксплуатации. Такими добавками являются высокоактивные кремнеземы: тонкомолотый доменный гранулированный шлак, микрокремнезем, золы рисовой шелухи, ячменя, сапропелей и др. [11–16]. В настоящее время в производстве строительных материалов предпочтение отдают комплексным добавкам, включающим пластификаторы, модификаторы и активаторы твердения цемента, позволяющие управлять фазовым составом цементного камня, структурой бетона и их свойствами при одновременной экономии расхода цемента как самой затратной составляющей.

Кроме решения технологических проблем, являющихся одним из важных путей развития строительных материалов на основе цемента, необходимо при его производстве решать вопросы снижения загрязнения окружающей среды, в том числе и снижать выбросы в атмосферу CO_2 , выделяющегося в большом количестве при производстве цемента. Одним из путей уменьшения выбросов CO_2 в атмосферу в цементной промышленности может быть снижение расхода цемента в бетоне или введение в него при помоле некоторого количества известняка. Известно, что в Европейских странах допускается при производстве некоторых бетонов использование цементов с добавками из-

вестняка до 27 % [16]. В Европе считают, что это позволяет одновременно снижать стоимость цемента, улучшать некоторые технические свойства получаемого бетона и сокращать выбросы CO_2 в атмосферу. Было также установлено, что такие цементы несколько снижают водопотребность, расслаиваемость, водоотделение, усадки цементного камня, одновременно повышая его плотность и однородность. Согласно Х. Тейлору, введение известняка в цемент оказывает на него «частично химическое и частично физическое воздействие» [16]. Добавка известняка в количестве 5...10 % в цементе, взаимодействуя с алюминатами, образует вместо этtringита четырёхкальциевый монокарбонатный гидроалюминат. Это приводит к ускорению гидратации цемента и снижению количества вводимого в цемент гипса. Дальнейшее увеличение в цементе количества известняка в лучшем случае переводит его в разряд наполнителя, а увеличение его количества в цементе до 35 %, принятое современным ГОСТ 31108-2020, не только малоэффективно, но и вредно при производстве ответственных и долговечных изделий из бетона, так как уменьшение количества связующего в нем в первую очередь снижает его технические характеристики и долговечность.

В МХТИ им. Д.И. Менделеева еще с середины XX века активно и основательно изучали влияние карбонатных добавок, таких как кальцит, доломит и магнезит, на технические свойства цемента и бетона. П.П. Будниковым с соавторами еще в 1959 г., было установлено, что качество цемента с добавками известняка зависит от следующих факторов: количества вводимого известняка, тонкости его помола и равномерности распределения его частиц в цементе. Также было установлено, что известняк целесообразно использовать в цементе с повышенным содержанием C_3A , так как это позволяет несколько увеличить прочность цементного камня [17]. Дальнейшие исследования В.М. Колбасова, А.С. Пантелеева, В.С. Савина, Ю.М. Бутта, В.В. Тимашева и Ю.И. Бенштейна также подтвердили, что взаимодействие карбонатов кальция и магния, как правило, происходит с алюмосодержащими составляющими цемента, с образованием непрерывного ряда твердых растворов $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCO}_3\cdot 12\text{H}_2\text{O} - 3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{Ca}(\text{CO}_3)_2\cdot 32\text{H}_2\text{O}$ [18–22]. Было установлено, что в процессе твердения таких материалов вначале проявляются метастабильные образования типа $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 0,25\cdot\text{CaCO}_3\cdot 11\text{H}_2\text{O}$ – четырёхкальциевого монокарбонатного гидроалюмината, а далее возможно образование даже $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaCO}_3\cdot (30-32)\cdot\text{H}_2\text{O}$ – шестикальциевого трёхкарбонатного гидроалюмината, которые содержат значительное количество химически связанной воды.

Одновременно было выявлено, что эти гидратные фазы устойчивы только при твердении и эксплуатации в «нормальных условиях», если же применить пропаривание, то моногидраты карбоа-

люминатов кальция распадаются на $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ и CaCO_3 . Следовательно, использование добавки известняка в цементе при тепловой обработке бетонных изделий не гарантирует им долговечность, так как это приведет к перекристаллизации алюминатных образований, что создаст в цементном камне бетона напряжения и вызовет образование трещин и других дефектов. При разных циклических воздействиях на такие бетоны их долговечность может быть довольно низкой. Все это нужно учитывать при использовании в строительстве цементов, содержащих значительное количество добавок известняка.

Изучая особенности цементов и бетонов с карбонатными добавками, многие исследователи отмечают их положительное влияние на свойства бетонной смеси и бетона. Установлено, что введение оптимального количества карбонатных добавок в цемент способствует: 1) некоторому уменьшению в бетонных и растворных смесях водопотребности, расслаиваемости и водоотделения, а также повышению их водоудерживающей способности, пластичности, плотности и однородности; 2) применение в производстве бетонов цемента с добавкой снижает их тепловыделение и усадки, что особенно важно при возведении массивных сооружений; 3) введение известняка в цемент обеспечивает получаемым изделиям светлый цвет, а это важно для отделочных материалов, в том числе для сухих строительных смесей.

Следовательно, если четко знать, с какой целью применяется добавка известняка в производстве строительных изделий и сколько ее потребуется для получения положительного эффекта, то такой подход к делу может только приветствоваться, в других случаях применять такую добавку не следует.

Изучая особенности взаимодействия добавки дисперсного кальцита с цементом, В.В. Тимашев и В.М. Колбасов в 1981 году пришли к принятию следующего решения: не вносить в ГОСТ добавку известняка в выпускаемые цементы [23]. Они пришли к выводу, что карбонатную добавку нужно применять, четко осознавая, в каком количестве и как она будет действовать на свойства бетона, в то время как рядовой потребитель цемента может этого не знать и в основном будет ориентироваться на стоимость.

Однако в 2003 году в России был введен ГОСТ 31108 «Цементы общестроительные. Технические условия», который допускает производство и применение цемента типа ЦЕМ II/A-I с содержанием известняка от 6 до 20 %, а в 2016 году в ГОСТ был введен еще и ЦЕМ II/B-I с содержанием известняка 21–35 %.

После первых изменений ГОСТа в 2003 году в РХТУ им. Д.И. Менделеева были проведены основательные исследования, и в 2008 году С.П. Сивков в своей статье «Термодинамический анализ фазообразования при твердении карбонат-

содержащих цементов» еще раз подтвердил, что карбонаты выступают в качестве активного компонента только при их содержании в цементе до 4 %, а дальнейшее увеличение вводимого в цемент известняка даже до 10 % переводит эту добавку в разряд инертной, которая может только дополнительно стабилизировать этtringит в составе затвердевшего цементного камня [24].

Учитывая все ранее сказанное, необходимы дополнительные исследования влияния разного количества добавки известняка на состав гидратных фаз цементного камня, его физико-химические свойства, а также на упругие свойства тяжелого бетона и его долговечность.

Целью настоящего исследования является изучение влияния содержания известняка в портландцементе от 5 до 30 %, на их гидратацию и твердение, формирование структуры цементного камня, фазовый состав гидратов и их взаимосвязи с модулем упругости и коэффициентом Пуассона бетона.

Материалы и методы исследования

Исследование влияния количества добавки известняка в цементе проводили на цементах по ГОСТ 31108–2020. Использовали 4 типа нормальнотвердеющих цементов класса по прочности 42,5, с разным содержанием добавки известняка: ЦЕМ I – 0 %, ЦЕМ I – 5 %, ЦЕМ II/A-I – 10 %, ЦЕМ II/B-I – 30 %.

В качестве заполнителей для бетона использовали: мелкий заполнитель – средний кварцевый песок, соответствующий ГОСТ 8736-2014; крупный заполнитель – гранодиоритовый щебень фракции 3...10 мм по ГОСТ 8267–93.

Образцы бетона твердели в нормальных условиях до 28 суток. Активность цементов определяли по ГОСТ 30744–2001. Открытую пористость изучали по водопоглощению согласно ГОСТ 12730.3–2020. Прочность бетона контролировали по ГОСТ 10180–2012. Призмную прочность, модуль упругости и коэффициент Пуассона бетонов определяли в 28-суточном возрасте согласно ГОСТ 24452–80.

Исследование особенностей минералогического и фазового состава цементного камня бетона проводили с применением:

– дифференциальной сканирующей калориметрии на микрокалориметре TAM Air фирмы TA Instruments;

– синхронного термического анализа (СТА) на анализаторе Luxx STA 409 PC;

– рентгенофазового анализа (РФА) на рентгеновском аппарате фирмы Rigaku, при $U = 40$ кВт, $I = 30$ мА.

Все полученные результаты по структуре цементного камня и бетона определяли с использованием справочников [25] и открытой базы данных характеристик строительных минералов RRUFF.

Исследовательская часть

Для исследования особенностей процессов гидратации и твердения цементов с разным количеством известняка в начальный период – до 3 суток – использовали метод изотермической калориметрии. По количеству и особенностям тепловыделения при гидратации исследуемых цементов можно установить влияние известняка в количестве 5, 10 и 30 % на процессы его гидратации.

Кинетика тепловыделения цементов с разным количеством добавки известняка представлена на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что гидратация цемента без добавок и с добавками начинается с взаимодействия с водой затворения алюминатов, это подтверждается активным тепловыделением в период от 2 до 10 часов, а наиболее активное взаимодействие силикатных составляющих происходит в период от 8 до 12 часов.

В начальный период гидратации при увеличении содержания добавки известняка в цементе удельный тепловой поток несколько снижается. Введение в цемент 10 % известняка вызывает даже некоторую активацию гидратации трехкальциевого силиката. В последующий период гидратации, через 18–20 часов после затворения цемента водой, у составов без добавки и с добавкой 5 % известняка начинаются процессы перекристаллизации алюминатных фаз, что может вызвать в дальнейшем напряжения в цементном камне. В составах с высоким содержанием известняка такие процессы исключаются. Тепловая энергия у составов с добавкой известняка до 10 % остается на уровне

180 Дж/г, а увеличение количества вводимого известняка до 30 % снижает тепловыделение на 10 %. Полученные результаты тепловыделения при гидратации цементов с разным количеством добавки известняка позволяют предположить, что введение его в цемент до 30 % должно оказывать значительное влияние на прочность на сжатие и на растяжение при изгибе, полученные данные приведены на рис. 2.

Из полученных зависимостей прочности цементно-песчаных образцов от дозировки добавки известняка можно сделать следующие выводы. Введение в цемент до 10 % известняка практически не оказывает влияния на его прочность на сжатие и на растяжение при изгибе. Но увеличение содержания известняка до 30 % приводит к снижению прочности образцов на сжатие до 35 %, а на растяжение при изгибе – на 24 %, что, вероятно, связано с изменением фазового состава гидратов цементного камня и его структуры.

Изучение влияния добавок известняка на пористость цементно-песчаных образцов позволило установить, что его введение в цемент до 10 % практически не влияет на этот показатель. Однако увеличение его дозировки в цементе до 30 % способствует повышению пористости на 10 %.

Данные, полученные при исследовании влияния различных дозировок добавки известняка на содержание гидроксида кальция в цементном камне, приведены на рис. 3.

Изучение фазового состава цементного камня с 5, 10 и 30 % известняка выявило, что при его твердении к 7-м суткам содержание гидроксида

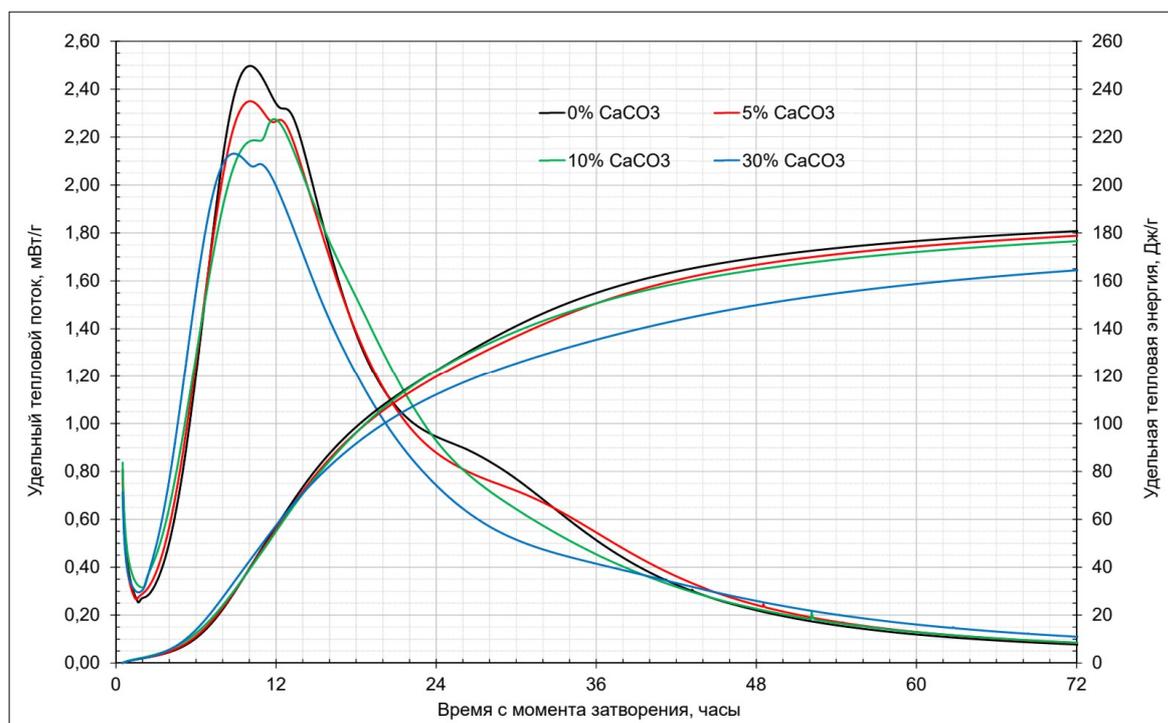


Рис. 1. Интенсивность тепловыделения цемента без добавок и с добавкой известняка в количестве 5,10 и 30 %

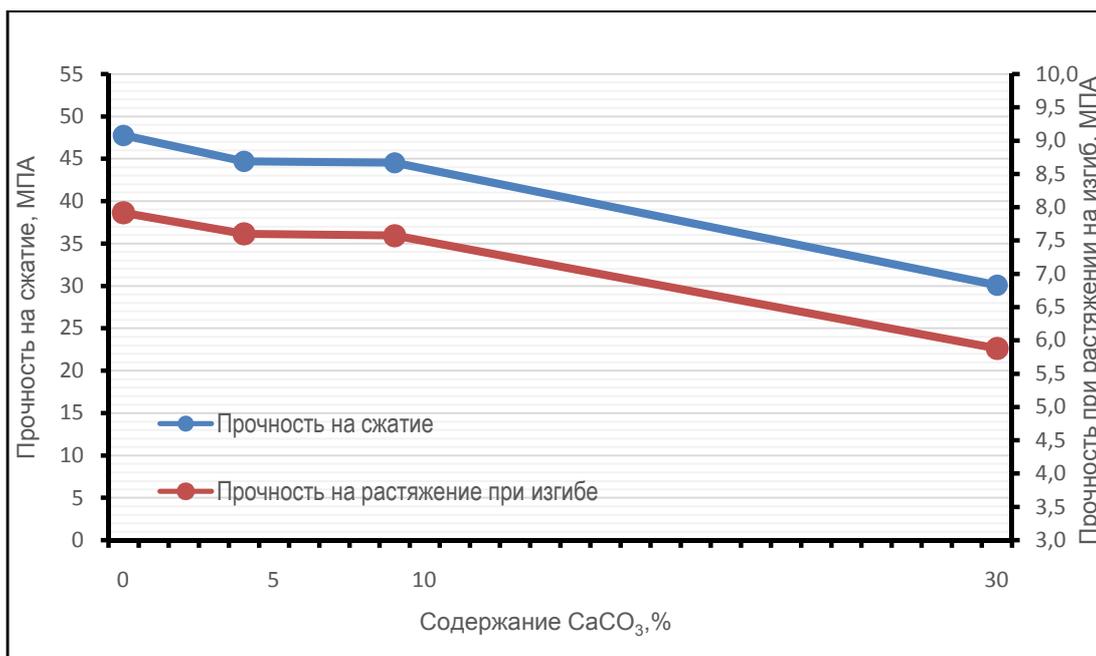


Рис. 2. Влияние содержания известняка в цементе на прочностные характеристики цементно-песчаных образцов

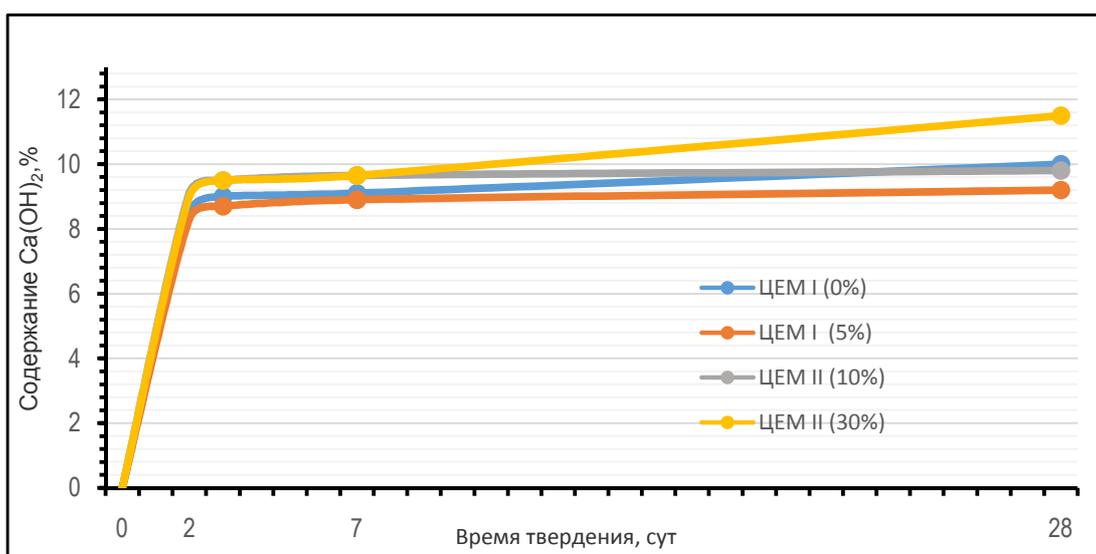


Рис. 3. Изменение содержания Ca(OH)₂ в цементном камне

кальция во всех образцах ЦК примерно одинаковое и составляет $\approx 10\%$.

Однако в составе с 30 % известняка наблюдается увеличение к 28-м суткам содержания Ca(OH)₂ до 11,5 %, что может быть связано с частичным разложением карбоната.

Из полученных данных следует, что введение добавки известняка в цемент практически не вызывает изменения основности гидратных фаз, предположительно они остаются высокоосновными.

Изучение влияния добавок известняка на содержание химически связанной воды в гидратах выявило, что при введении 10 % известняка и особенно 30 % её количество значительно увеличивается (рис. 4). Содержание химически связанной во-

ды в цементном камне характеризует изменения фазового состава гидратов. Из этого следует, что добавка известняка влияет на фазовый состав гидратов и их содержание в цементном камне. По данным исследований школы Ю.М. Бутга и В.В. Тимашева – увеличение химически связанной воды в составе гидратов цементного камня в присутствии карбонатных добавок связано с образованием четырехкальциевого монокарбонатного гидроалюмината или шестикальциевого трехкарбонатного гидроалюмината [23].

Увеличение количества известняка в цементе до 30 % приводит к повышению содержания химически связанной воды до 21 % (прирост по сравнению с цементом без известняка – 6 %). Сле-

довательно, цементный камень с высоким количеством добавки известняка формируется с образованием гидратных фаз с повышенным содержанием химически связанной воды. Среди таких гидратов может быть более стабильный четырехкальциевый монокарбонатный гидроалюминат $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ или возможно шестикальциевый трёхкарбонатный гидроалюминат $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{Ca}(\text{CO}_3) \cdot 32 \cdot \text{H}_2\text{O}$.

Результаты рентгенофазового анализа на рис. 5 позволяют установить следующее.

Из данных, представленных на рис. 5, можно сделать вывод, что увеличение интенсивности пиков $d/n = 3,84, 2,86, 2,49, 2,18$ и $1,87 \text{ \AA}$ свидетельствует о присутствии в цементном камне с известняком четырехкальциевого монокарбонатного гидроалюмината, а также отдельных включений чистого карбоната кальция в составе с 30 % добавки с межплоскостными расстояниями $d/n = 3,029, 2,49, 2,27, 1,86 \text{ \AA}$. Это подтверждает ранее высказанное предположение относительно изменения фазового состава по содержанию химически связанной воды (см. рис. 4).

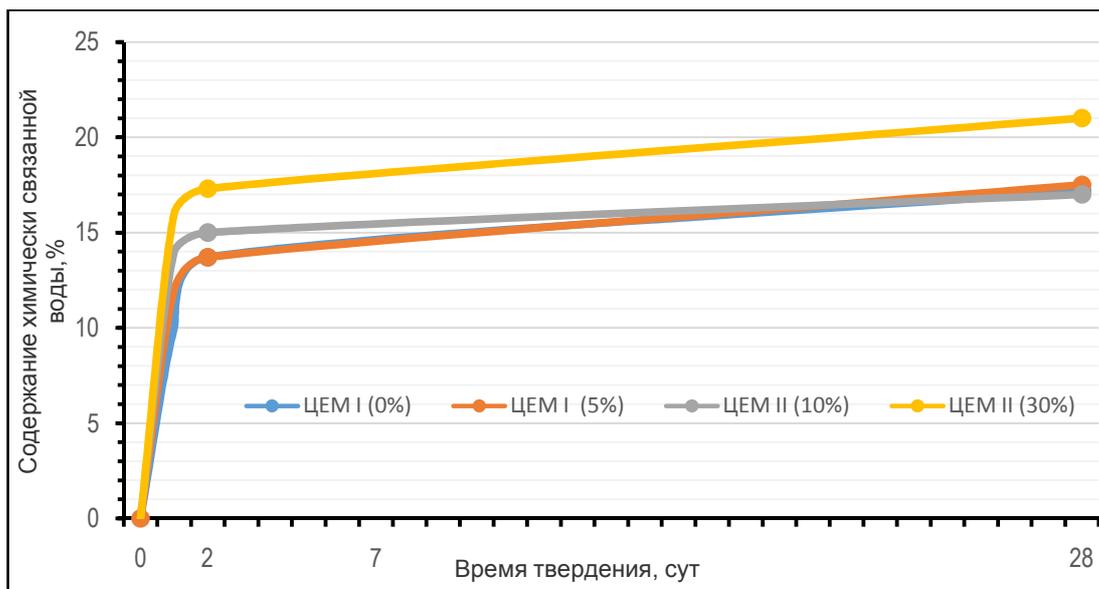


Рис. 4. Содержание в цементном камне химически связанной воды в зависимости от количества добавки известняка и продолжительности нормального твердения

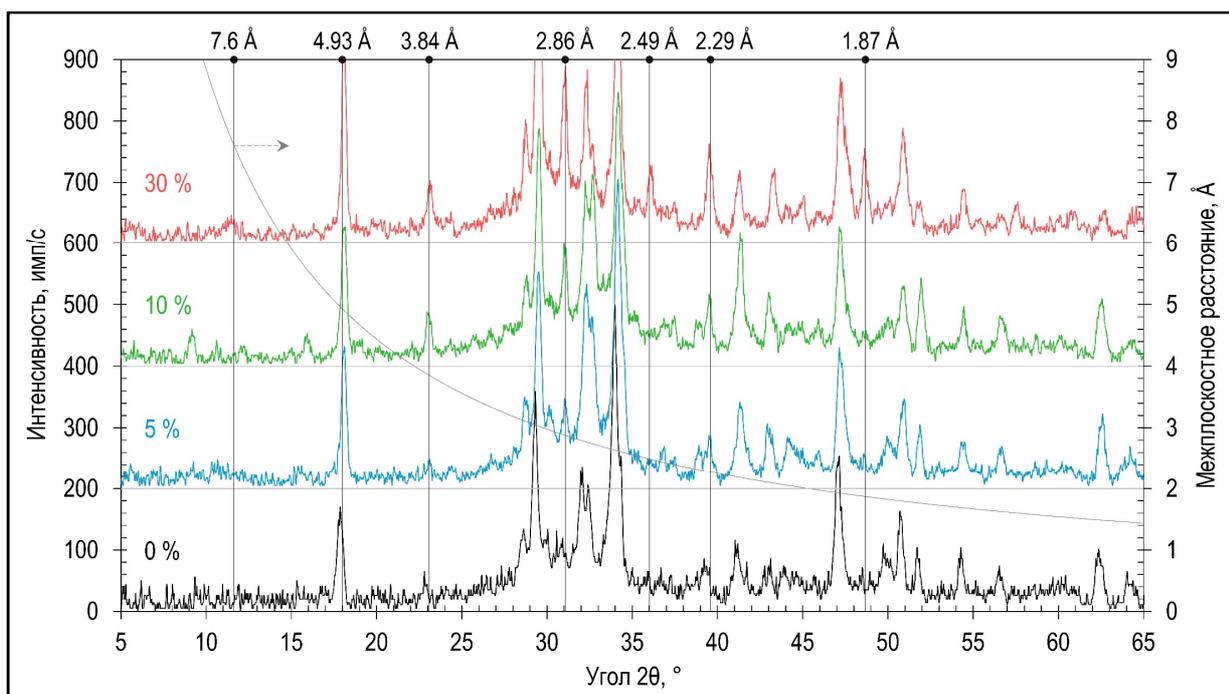


Рис. 5. Рентгенофазовый анализ цементного камня исследуемых составов

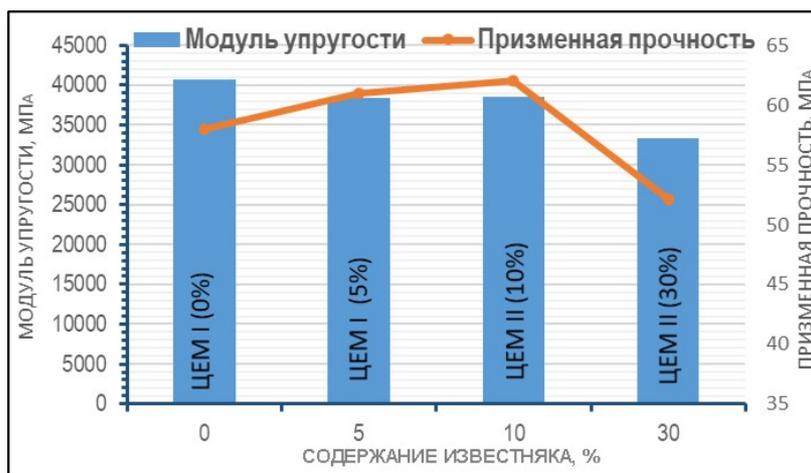


Рис. 6. Влияние добавки известняка в цементе на призменную прочность и модуль упругости бетона

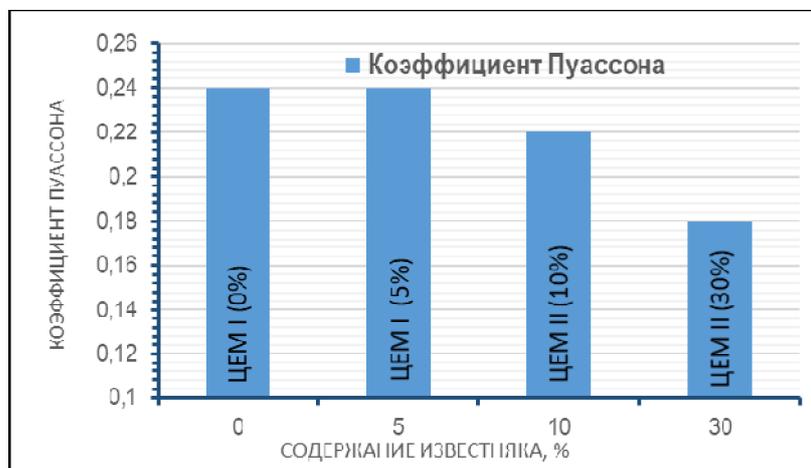


Рис. 7. Влияние добавки известняка в цементе на коэффициент Пуассона бетона

Далее на основе исследуемых цементов, отличающихся только содержанием в них известняка (0, 5, 10 и 30 %), были получены тяжелые бетоны на одинаковом составе бетонных смесей с подвижностью П2. Основные характеристики бетонов в возрасте 28 суток помещены в таблицу.

Кубиковая прочность бетона без добавок и с введением известняка от 5 до 10 % увеличивается на 6,6 и 10 % соответственно. Дальнейшее увеличение в цементе добавки известняка до 30 % снижает прочность бетона до 12 %.

Значения призменной прочности (рис. 6) несколько отличаются от полученных данных по кубиковой прочности на сжатие, но в большей степени снижается призменная прочность бетона с добавкой 30 % известняка. Модуль упругости бетона без добавки и с добавками до 10 % находится примерно на одном уровне и значительно снижается при увеличении добавки известняка до 30 %.

Добавка в цемент известняка в количестве до 10 % приводит к некоторому снижению модуля упругости бетона, в то время как призменная прочность имеет тенденцию к повышению, этот

эффект вероятно связан с некоторым изменением фазового состава гидратов вследствие увеличения в цементном камне гидратов типа четырехкальцевого монокарбонатного гидроалюмината, что подтверждается рентгенофазовым анализом.

Увеличение количества вводимой добавки известняка в цементе до 30 % способствует более активному снижению модуля упругости бетона с 40 до 33,3 ГПа и призменной прочности до 33 МПа. Это также подтверждается значением коэффициента Пуассона (рис. 7), который снижается до 0,18, а также увеличением на рентгенограммах отражений, свидетельствующих о присутствии в цементном камне еще некоторого количества свободного карбоната кальция с $d/n = 2,49; 2,27; 1,86 \text{ \AA}$.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что содержание известняка в составе цемента:

– до 5 % – не вызывает какого-либо значительного изменения основных строительно-технических свойств бетонов, при этом кальцит вступает

ет в реакцию с алюминатами цемента, образуя незначительное количество четырёхкальциевого монокарбонатного гидроалюмината;

– до 10 % – приводит к увеличению образования четырёхкальциевого монокарбонатного гидроалюмината, что вызывает незначительное снижение модуля упругости при небольшом повышении прочности на сжатие;

– до 30 % – приводит к значительному снижению всех перечисленных характеристик, причиной этого является образование существенного количества четырёхкальциевого монокарбонатного гидроалюмината и наличие остатков инертного

кальцита в цементном камне, это в результате приводит к повышению хрупкости материала, о чём и свидетельствует снижение коэффициента Пуассона до 0,18.

Учитывая полученные результаты, можно допустить введение известняка в цемент в количестве от 5 до 10 %. Введение известняка в цемент в дозировке свыше 10 % начинает оказывать влияние на фазовый состав гидратов и снижает технические показатели бетона, поэтому применять его в таких дозировках следует только после дополнительных испытаний конкретного состава бетона для заданных условий.

Список литературы

1. Миронов С.А. Некоторые обобщения по теории и технологии бетона. Труды Международной конференции по проблемам ускорения твердения бетона при изготовлении сборных железобетонных конструкций. М.: Стройиздат, 1968. С. 91–97.
2. Taylor H.F.W. The Calcium Silicates Hydrates. Tokio. 1968. Vol. II, p. 1–26.
3. Людвиг У. Исследования механизма гидратации клинкерных минералов (ФРГ). Шестой международный конгресс по химии цемента. Т. 2. Кн. 1. М.: Стройиздат, 1976. С. 104–121.
4. Глекель Ф.Л. Физико-химические основы применения добавок к минеральным вяжущим. Ташкент: ФАН, 1975.
5. Комар А.А., Бабаев Ш.Т. Комплексные добавки для высокопрочного бетона // Бетон и железобетон. 1981. № 9. С. 16–17.
6. Добролюбов Г., Ратинов В.Б., Розенберг Т.И. Прогнозирование долговечности бетона с добавками. М.: Стройиздат, 1983. 212 с.
7. Ратинов В.Б., Розенберг Т.И. Добавки в бетон. М.: Стройиздат, 1989. 187 с.
8. Кунцевич О.В. Бетоны высокой морозостойкости для сооружений Крайнего Севера. Л.: Стройиздат, 1981 г.
9. Применение суперпластификаторов в бетоне / В.Г. Батраков, Ф.М. Иванов, Е.С. Силина и др. // Обзорная информация ВНИИИС, 1982. Серия 7. Вып. 2. 5 с.
10. Добавки в Бетон: справочное пособие / В.С. Рамачандран, Р.Ф. Фельдман, М. Коллепард и др. М.: Стройиздат, 1988. 570 с.
11. Копаница Н.О., Анисанова Л.А., Макаревич М.С. Тонкодисперсные добавки для наполненных вяжущих на основе цемента // Строительные материалы. 2002. № 9. С. 2–3.
12. Влияние зернового состава и вида наполнителей на свойства строительных растворов / А.И. Кудяков, Л.А. Анисанова, Н.О. Копаница, А.В. Герасимов // Строительные материалы. 2000. № 11. С. 28.
13. Цементные тяжелые бетоны для строительства скоростных автомобильных дорог / Л.Я. Крамар, А.И. Кудяков, Б.Я. Трофимов, К.В. Шулдяков // Вестник Томского государственного университета. 2017. № 4 (63). С. 147–157.
14. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. М.: Стройиздат, 1990. 400 с.
15. Пинскер В.А. Морозостойкость стеновых материалов в условиях Крайнего Севера. Пути и способы повышения эффективности и долговечности бетона и железобетонных конструкций. Л., 1977. С. 19–21.
16. Тейлор Х. Химия цемента: пер. с англ. М.: Мир, 1996. 560 с.
17. Будников П.П., Колбасов В.М., Пантелеев А.С. О взаимодействии $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$ и $4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$ с карбонатами кальция и магния // ДАН СССР, 1959. Т. 129. № 5. С. 1104–1106.
18. Колбасов В.М. О взаимодействии алюмосодержащих клинкерных минералов с карбонатом кальция // Изв. вузов. Химия и химическая технология. 1960. Т. 3, вып. 1. С. 190–203.
19. Бутт Ю.М., Тимашев В.В., Бенштейн Ю.И. Срастание гидроксида кальция с кварцем и кальцитом // Цемент. 1972. № 5. С. 13–14.
20. Пантелеев А.С., Колбасов В.М. Цементы с минеральными добавками-микронаполнителями // в кн. Новое в химии и технологии цемента. М.: Стройиздат, 1962. С. 155–164.
21. Бутт Ю.М., Колбасов В.М., Савин Е.С. Влияние тонкодисперсного карбоната кальция на процесс твердения и состав продуктов гидратации силикатного бетона. // Строительные материалы. 1965. № 3. С. 33–35.
22. Тимашев В.В., Колбасов В.М. Свойства цементов с карбонатными добавками // Цемент. 1981. № 10. С. 10–12.

23. Сивков С.П. Термический анализ фазообразования при твердении карбонатсодержащих цементов // Цемент и его применение. 2008. № 7–8. С. 112–115.
24. Мчедлов-Петросян О.П., Ушеров-Маршак А.В., Урженко А.М. Тепловыделение при твердении вяжущих веществ и бетона. М.: Стройиздат, 1984. 224 с.
25. Горшков В.С., Тимашев В.В., Савельев В.Г. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ. М.: Высшая школа, 1981. 335 с.

References

1. Mironov S.A. *Nekotorye obobshcheniya po teorii i tekhnologii betona. Trudy Mezhdunarodnoy konferentsii po problemam uskoreniya tverdeniya betona pri izgotovlenii sbornykh zhelezobetonnykh konstruksiy* [Some generalizations on the theory and technology of concrete. Proceedings of the International Conference on the Problems of Acceleration of Concrete Curing in the Manufacture of Prefabricated Reinforced Concrete Structures]. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1968. 91–97. (in Russ.)
2. Taylor H.F.W. *The Calcium Silicates Hydrates*. Tokio. 1968. Vol. II, pp. 1–26.
3. Ludwig. У. *Issledovaniya mekhanizma gidratatsii klinkernykh mineralov (FRG). Shestoy mezhdunarodnyy kongress po khimii tsementa*. [Studies on the hydration mechanism of clinker minerals (FRG). Sixth International Congress on Cement Chemistry]. Т. 2. Book 1. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1976, pp. 104–121. (in Russ.)
4. Gleckel F.L. *Fiziko-khimicheskie osnovy primeneniya dobavok k mineral'nykh vyazhushchim* [Physico-chemical bases of application of additives to mineral binders]. Tashkent: FAS Publ.; 1975. (in Russ.)
5. Komar A.A., Babaev Sh.T. [Complex additives for high-strength concrete]. *Beton zhelezobeton* [Concrete reinforced concrete]. 1981;9:16–17. (in Russ.)
6. Dobrolyubov G., Ratinov V.B., Rosenberg T.I. *Prognozirovaniye dolgovechnosti betona s dobavkami* [Prediction of durability of concrete with additives]. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1983. 212 p. (in Russ.)
7. Ratinov V.B., Rosenberg T.I. *Dobavki v beton* [Additives in Concrete]. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1989. 187 p. (in Russ.)
8. Kuntsevich O.V. *Betony vysokoy morozostoykosti dlya sooruzheniy Kraynego Severa*. [Concretes of high frost resistance for constructions of the Far North]. Leningrad: Stroyizdat Publ.; 1981. (in Russ.)
9. Batrakov V.G., Ivanov F.M., Silina E.S. [Application of superplasticizers in concrete]. *Obzornaya informatsiya VNIIS* [Observational Information VNIIS]. 1982;7(2):5. (in Russ.)
10. Ramachandran V.S., Feldman R.F., Kollepari M. *Dobavki v Beton: Spravochnoe posobie* [Additives in Concrete: A Reference Manual]. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1988. 570 p. (in Russ.)
11. Kopanitsa N.O., Anikanova L.A., Makarevich M.S. [Fine additives for filled cement-based binders]. *Stroitel'nye materialy* [Building Materials]. 2002;9:2–3. (in Russ.)
12. Kudyakov A.I., Anikanova L.A., Kopanitsa N.O., Gerasimov A.V. [Influence of grain composition and type of fillers on the properties of mortars]. *Stroitel'nye materialy* [Building Materials]. 2000;11:28 (in Russ.)
13. Kramar L.Ya., Kudyakov A.I., Trofimov B.Ya., Shuldyakov K.V. Cement heavy concretes for highway construction. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Arkhitekturno-stroitel'nogo Universiteta. Journal of construction and architecture*. 2017;4(63):147–157. (in Russ.)
14. Batrakov V.G. *Modifitsirovannyye betony* [Modified concretes]. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1990. 400 p. (in Russ.)
15. Pinsker V.A. *Morozostoykost' stenovykh materialov v usloviyakh Kraynego Severa. Puti i sposoby povysheniya effektivnosti i dolgovechnosti betona i zhelezobetonnykh konstruksiy* [Frost resistance of wall materials in the Far North. Ways and Methods of Increasing the Efficiency and Durability of Concrete and Reinforced Concrete Structures]. Leningrad; 1977. P. 19–21. (in Russ.)
16. Taylor H.F.W. *The Chemistry of Cement*. Academic Press, 1964.
17. Budnikov P.P., Kolbasov V.M., Panteleyev A.S. [On the interaction of $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$ and $4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$ with calcium and magnesium carbonates]. *DAN SSSR* [DAN USSR]. 1959;129(5):1104–1106. (in Russ.)
18. Kolbasov V.M. [On the interaction of aluminous clinker minerals with calcium carbonate]. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [News of higher educational institutions. Chemistry and Chemical Technology]. 1960;3:190–203. (in Russ.)
19. Butt Yu.M., Timashev V.V., Benstein Yu.I. [Fusion of calcium hydroxide with quartz and calcite]. *Cement*. 1972;5:13–14. (in Russ.)
20. Panteleyev A.S., Kolbasov V.M. [Cements with mineral additives-microfillers]. In: *Novoe v khimii i tekhnologii tsementa* [New in chemistry and technology of cement]. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1962. P. 155–164 (in Russ.)
21. Butt Y.M., Kolbasov V.M., Savin E.S. [Influence of fine dispersed calcium carbonate on the process of hardening and composition of hydration products of silicate concrete]. *Stroitel'nye materialy* [Building Materials]. 1965;3:33–35 (in Russ.)

22. Timashev V.V., Kolbasov V.M. [Properties of cements with carbonate additives]. *Cement*. 1981;10:10–12. (in Russ.)
23. Sivkov S.P. [Thermal analysis of phase formation during hardening of carbonate-containing cements]. *Tsement i ego primeneniye* [Cement and its application]. 2008;7–8:112–115. (in Russ.)
24. Mchedlov-Petrosyan O.P., Usherov-Marshak A.V. *Teplovydeleniye pri tverdenii vyazhushchikh veshchestv i betona* [Heat generation during hardening of binders and concrete]. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1984. 224 p. (in Russ.)
25. Gorshkov V.S., Timashev V.G., Savelyev V.V. *Metody fiziko-khimicheskogo analiza vyazhushchikh veshchestv* [Methods of physical and chemical analysis of binders]. Moscow: Higher School; 1981. 335 p. (in Russ.)

Информация об авторах:

Крамар Людмила Яковлевна, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Строительные материалы и изделия», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; kramar-l@mail.ru

Мордовцева Мария Витальевна, аспирант кафедры «Строительные материалы и изделия», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; mariamordovtseva@mail.ru

Шулдяков Кирилл Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные материалы и изделия», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; shuldiakovkv@susu.ru

Information about the authors:

Lyudmila Y. Kramar, Doctor of Engineering, Professor, Department of Building Materials and Products, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; kramar-l@mail.ru

Maria V. Mordovtseva, Post-graduate student, Department of Building materials and products, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; mariamordovtseva@mail.ru.

Kirill V. Shuldyakov, Candidate of Science in Engineering, Associate professor, Department of Building Materials and Products, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; shuldiakovkv@susu.ru

Статья поступила в редакцию 27.11.2023; принята к публикации 11.12.2023.

The article was submitted 27.11.2023; approved after reviewing 11.12.2023.