

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

*Савин А. В., соискатель,
Лесовик В. С., член-корр. РААСН, д-р техн. наук, проф.,
Алфимова Н. И., канд. техн. наук, доц.
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова*

К ПРОБЛЕМЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА*

naukavs@mail.ru

В настоящей работе излагаются результаты теоретических исследований, обобщаются данные, полученные другими исследованиями в области коррозии и защиты арматуры железобетонных конструкций с использованием композиционных вяжущих.

На основании электрохимической теории коррозии металлов рассмотрены условия пассивности стали в бетонах с пониженным содержанием клинкерного фонда, к которым могут быть отнесены бетоны на композиционных вяжущих. Разобран механизм защитного действия бетонов и установлены причины коррозии стальной арматуры в них.

Исследованы основные факторы, влияющие на коррозию и долговечность бетонов на композиционных вяжущих: вид и состав вяжущего, количество клинкерного фонда и суперпластификатора, выявлены ведущие факторы коррозии арматуры в таких бетонах.

Ключевые слова: композиционные вяжущие, техногенное сырье, коррозия, арматура.

Как известно основной вклад в себестоимость бетона и железобетона вносят вяжущие, снижения затрат на которые можно достичь за счет использования тонкомолотых многокомпонентных цементов (ТМЦ) и вяжущих низкой водопотребности (ВНВ), в которых доля клинкерной составляющей может быть существенно снижена путем замены на кремнеземсодержащий компонент.

На базе Белгородского государственного технологического университета разработана оценка качества кремнеземистого компонента как компонента композиционного вяжущего, позволяющая ранжировать все горные породы по эффективности использования в качестве сырья для производства композиционных вяжущих (КВ) [1, 2]. Установлено, что в качестве сырья для получения композиционных вяжущих необходимо использовать определенные горные породы [3]. Из пород магматического происхождения – эффузивные стекловатой структуры; метаморфических – кварцсодержащие породы зеленосланцевой степени метаморфизма; осадочных – силициты из зоны диагенеза и раннего катагенеза и др.

Все это позволило разработать широкую номенклатуру композиционных вяжущих, с применяется сырье как природного, так и техногенного происхождения [4–7 и т.д.].

Однако основным фактором, сдерживающим широкое применение таких вяжущих при производстве железобетонных изделий является то, что вопросы коррозионного поведения

стальной арматуры в бетонах с использованием ТМЦ и ВНВ в которых доля клинкерного компонента составляет менее 50 % не достаточно изучены.

Защита от коррозии является важнейшей мировой проблемой, т.к. по разным статистическим оценкам от 15 до 75 % конструкций подвергаются воздействию агрессивных сред и около 30 % из них требуется защита. Кроме того, по различным экспертным оценкам от 5 до 10 % строительных конструкций ежегодно выходят из строя.

Вопросы качества и долговечности строительных конструкций, как в техническом, так и в экономическом аспекте привлекают все большее внимание строителей. Очевидно, что во многих случаях экономически оправдано увеличение первоначальных затрат на изготовление конструкций и их надежную защиту, если это позволяет сократить число и стоимость ремонтов в процессе эксплуатации. В особенности это относится к железобетонным конструкциям из бетонов на КВ, в которых стальная арматура может быть хорошо защищена бетоном, а последнему можно придать значительную стойкость при попеременном замораживании и оттаивании, намокании и высушивании.

Развитие теории коррозии и защиты арматуры в железобетонных конструкциях получило в работах Москвина В.М., Алексеева С.Н., Артамонова В.С., Бабушкина В.И., Баженова Ю.М., Иванова Ф.М., Розенталя Н.К. и др.

Из зарубежных известны работы Кишитани, Шалон, Штельцеля и др.

К этому направлению примыкают многочисленные исследования химических добавок (Ратинов В.Б., Батраков В.Г., Иванов В.Ф. и др.), используемых для регулирования свойств бетонов, в том числе ингибиторов коррозии стали в бетоне.

Многолетний опыт применения железобетона и наблюдение за состоянием конструкций из него позволяют справедливо считать, что причиной их повреждения в условиях практически неагрессивной или слабоагрессивной среды чаще всего является коррозия арматуры и низкая морозостойкость бетона [8, 9].

Поэтому эффективная и безаварийная эксплуатация конструкций в ряде сред может быть достигнута не увеличением стойкости композита, а повышением способности бетона длительно защищать арматуру.

Однако при современном состоянии развития железобетона длительная защита арматуры в ряде случаев не может быть обеспечена. В связи с этим необходимо иметь представление об основных особенностях коррозионного поведения арматуры, чтобы оценить реальную опасность в процессе эксплуатации конструкций.

Коррозионное разрушение стали может проявляться в виде сплошной (общей) коррозии, которая охватывает всю поверхность металла и бывает равномерной или неравномерной по глубине, или местной коррозией, поражающей лишь отдельные участки поверхности металла (пятна, язвы, коррозионные трещины) [10].

Коррозионную стойкость металла в соответствии с ГОСТ характеризуют показателями потерь по массе [$\text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$] или по глубине поражения (мм/год). Для арматуры железобетонных конструкций эти показатели, как правило, неприемлемы по двум причинам: во-первых, длительное развитие коррозии арматуры даже с малой скоростью приводит к растрескиванию и затем отделению защитного слоя бетона под давлением растущего слоя ржавчины; во-вторых, высокопрочная напрягаемая арматура может хрупко разрушаться под напряжением. В первом случае конструкция теряет часть несущей способности, а ее ремонт трудоемок и обычно малоэффективен в связи с тем, что практически невозможно полностью удалить ржавчину с арматуры перед восстановлением защитного слоя, во втором - происходит внезапное обрушение конструкции.

Скорость коррозии стали в бетоне зависит от степени агрессивности воды – среды, которая для этого случая может оцениваться рН, и содержанием кислорода. Длительная устойчивость

стали в плотных цементных бетонах обеспечивается пассивностью железа в щелочных электролитах [11], щелочность которых должна иметь водородный показатель $\text{pH} \geq 11,8$.

Пассивная пленка на стали разрушается при снижении рН поровой жидкости бетона, например вследствие его карбонизации, наличия в бетоне активных заполнителей, нейтрализующих гидроксид кальция, а также при присутствии (в количестве более критического) хлориды и сульфаты. В работах Алексева С.Н., Розенталя Н.К., Степановой В.Ф. показано, что в атмосферных условиях коррозия стали в бетоне протекает с анодно-омическим контролем и не зависит от скорости диффузии кислорода. Повышение плотности бетона замедляет анодный процесс, но не настолько, чтобы защитить арматуру от коррозии в непассивирующем бетоне. Основным условием первоначальной пассивности стали в бетоне является ее контакт с жидкой фазой бетона, величина рН которой должна быть не ниже 11,8 при условии отсутствия кислотных анионов.

В нормальном плотном бетоне без добавок – стимуляторов коррозии стали, как правило, не происходит активного растворения металла на анодных участках, кинетический переход железа в ионную форму резко заторможен, что обеспечивается высокой щелочностью поровой влаги. Высокая щелочность поровой влаги поддерживается запасом клинкерного флота в цементном камне и длительной его гидратацией.

Однако бетон почти всегда содержит химически и физически связанную воду, т.е. капиллярную и осмотическую.

Количество физически связанной воды в бетоне, которая в отличие от химически связанной может служить электролитом – проводником зарядов между анодными и катодными участками поверхности стали, зависит как от особенностей бетона, так и от среды и условий взаимодействия ее с конструкцией. При погружении в воду, если оно достаточно длительно, может произойти практически полное насыщение капилляров и пор бетона. В этом случае водосодержание тем больше, чем выше пористость бетона.

При одностороннем контакте без напора, т.е. при капиллярном подсосе воды, степень насыщения бетона обычно ниже, так как высота всасывания воды находится в обратной зависимости от сечения капилляров. Давление насыщенного пара над мениском воды в капиллярах радиусом более $1 \cdot 10^{-5}$ см, которые обычно называются макрокапиллярами, практически равно давлению пара над плоской поверхностью, по-

этому такие капилляры не всасывают воду и могут заполняться только под напором воды или при конденсации ее, когда в бетоне образуется точка росы.

Содержание воды в бетоне при эксплуатации конструкций в воздушно-влажной среде зависит от ее относительной влажности. При 100 %-ной влажности воздуха, водосодержание бетона приближается к таковому при капиллярном подсосе. С уменьшением влажности воздуха водосодержание бетона падает. Для стали в бетоне, как и для открытого металла, существует некоторая критическая влажность воздуха, ниже которой пленки влаги не могут обеспечить перемещение ионов между анодными и катодными участками ее поверхности. Такое критическое значение относительной влажности воздуха находится в пределах 50-60 %, если бетон не содержит гигроскопических веществ, например, добавок хлористых солей, которые понижают это значение. Таким образом, в бетоне почти всегда достаточно влаги, необходимой для протекания процесса коррозии стали.

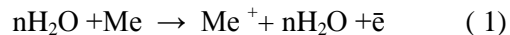
Что касается кислорода, то его недостаток может ограничивать процесс коррозии стали, как показали исследования, лишь при практически полном насыщении бетона водой, когда диффузия кислорода резко замедляется. В бетонах высокой плотности (при $V/C < 0,5$) отмечается замедление коррозии при увеличении относительной влажности воздуха сверх 80-85 %. В большинстве случаев поровое пространство бетона способно пропустить вполне достаточное количество кислорода для поддержания процесса коррозии арматуры.

Защитный слой бетона отделяет арматуру от внешней среды, но не изолирует ее полностью. Поэтому его защитное действие не эквивалентно действию непроницаемого барьера. Бетон проницаем для влаги и кислорода - основных веществ, необходимых для процесса электрохимической коррозии стали.

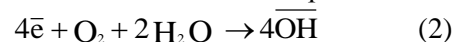
Коррозия металла, по определению Томашова Н.Д., - это «постепенное физико-химическое разрушение под воздействием окружающей среды». Внешняя по отношению к железобетонной конструкции среда воздействует, прежде всего, на бетон и лишь через него - на арматуру. По существу, средой, в которой находится арматура, является бетон. Поэтому необходимо установить его особенности как среды, которая должна определять состояние арматуры, начиная с момента изготовления конструкции.

Известно, что коррозия металлов чаще всего происходит по электрохимическому механизму, для действия которого необходимы следующие условия:

- наличие разности потенциалов между отдельными участками поверхности металла, т.е. электрохимическая неоднородность ее;
- наличие электрохимической связи между этими участками;
- активное состояние поверхности на анодных участках, где металл растворяется по реакции:



- наличие достаточного количества деполляризатора, в частности кислорода, необходимого для ассимиляции на катодных участках поверхности металла избыточных электронов:



Поскольку структура стали и контактного слоя бетона у поверхности неоднородны, то очевидно, что первое условие для арматуры в бетоне выполняется всегда. Так как бетон представляет собой капиллярно-пористое тело с активной и гидрофильной внутренней поверхностью, можно полагать, что второе и четвертое условия протекания коррозионного процесса в бетоне также могут выполняться. Следовательно, отсутствие коррозии стали в бетоне связано с тем, что не выполняется третье условие.

Важной особенностью цементного бетона является щелочность жидкой фазы, нормально насыщенной гидратом окиси кальция. Пористость же бетона способствует активному взаимодействию его со средой.

Как показывают многочисленные исследования, практическое отсутствие коррозии арматуры в бетоне объясняется пассивностью стали в щелочной среде, т.е. неспособностью к растворению по приведенной выше реакции (1). Все известные случаи коррозии арматуры связаны с тем, что по той или иной причине ее поверхность остается активной или не полностью пассивируется при изготовлении конструкции, либо теряет пассивность в процессе эксплуатации.

Томашов Н.Д. определяет пассивность как состояние повышенной коррозионной устойчивости металла или сплава (в условиях, когда с термодинамической точки зрения они являются вполне реакционноспособными), вызванное торможением анодного процесса. Наступление пассивности характеризуется обычно резким облагораживанием электродного потенциала металла. Так, железо, имеющее в активном состоянии потенциал около -0,4 В, может в пассивном состоянии приобрести потенциал до +1В по отношению к нормальному водородному электродному (НВЭ).

На корродирующей поверхности может устанавливаться устойчивый во времени (стационарный) потенциал, который является смешанным, т.е. имеет промежуточное значение между

равновесным (обратимым) потенциалом реакции ионизации металла (1) и потенциалом окислительно-восстановительной реакции (2). На значениях этих потенциалов не влияет состояние поверхности, а окислительно-восстановительный потенциал не зависит также от природы металла. Значение стационарного потенциала определяется равенством плотностей тока этих двух процессов и зависит от свойств поверхности металла. Поэтому смешанные потенциалы часто плохо воспроизводимы.

При определенных условиях корродирующий металл может покрываться беспористым слоем продуктов реакции, например окислом, который будет препятствовать непосредственному воздействию металла и электролита, т.е. наступит пассивное состояние металла. Это состояние возникает при потенциалах выше некоторого определенного значения, которое зависит от природы и состава электролита, особенно от значения рН.

В отличие от Томашова Н.Д., Феттера К. и других сторонников пленочной теории пассивности многие исследователи: Колотыркин Я.М. и другие - развивают адсорбционную теорию. И та, и другая достаточно согласуются с опытом. Однако предпочтение отдается электрохимическому механизму коррозии стали в бетоне.

Многочисленными исследованиями показано, что обычные цементные бетоны обладают достаточно высокими защитными свойствами по отношению к арматуре. В первые сутки после затворения рН жидкой фазы бетона находится в пределах 12,5-13,0 в зависимости от вида цемента и условий твердения. Высокая щелочность поровой влаги поддерживается благодаря наличию значительного количества (до 15%) $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в твердой фазе цементного камня и запаса клинкерного фонда в цементном камне бетона нормального твердения. Ускорение твердения бетона на портландцементе при повышенной температуре не меняет существенно состава жидкой фазы, так как известь выделяется в значительном количестве и при 100 и при 250 °С [12]. Однако, в случае применения композиционных вяжущих, надо считаться с поглощением извести тонкодисперсными кремнеземистыми компонентами.

Поэтому появление КВ нового поколения выдвигают на первый план вопросы, связанные с особенностями защитного действия бетонов на их основе по отношению к стальной арматуре.

В целом, применяемые минеральные добавки, можно разделить на гидравлически активные, характеризующиеся значительной реакционной способностью с большим содержанием в составе метастабильных, главным образом,

стекловатых фаз, таких как: пылевидные золы, пеплы, пемзы, туфы и т.д., и инертные или слабоактивные. Они характеризуются стабилизированным составом и структурой, в нормальных условиях слабо реакционноспособны, к ним относятся: кварцевые пески, кварцитопесчаники, граниты, известняки и т.д. Однако, в процессе совместного помола минеральных добавок с портландцементным клинкером или с цементом и, особенно, в присутствии сухого суперпластификатора, частички добавки значительно диспергируются и активизируются с соответствующим увеличением реакционной способности.

Работы российских и зарубежных исследователей в целом свидетельствуют о том, что введение в бетон различных минеральных добавок, способствует снижению пассивирующего действия бетона по отношению к арматуре. Ряд авторов высказывают предположения о причинах этого явления, однако единого мнения по этому вопросу нет. Так, по данным В.А. Кинда через 28 сут. после затворения цементный камень содержит свободный $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в количестве, зависящим от соотношения клинкера и трепела, причем, уменьшаясь с уменьшением клинкера и повышением трепела. По данным В.С. Ромачандрана в гидратированном цементном тесте присутствует около 20% $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с целью обеспечения резервной основности для защиты стали, однако, опасность снижения рН жидкой фазы бетонов в случае применения пуццолановых добавок несомненна. В исследованиях В.Н. Юнг показано, что при понижении концентрации $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в жидкой фазе усиливается гидролиз зерен клинкера и выделение CaO из высокоосновных гидросиликатов. По данным Лурье И.С. и Хигерович М.И. поглощение CaO добавкой в бетоне сильно замедлено, так как, очевидно, протекает с диффузионным ограничением. Коррозионное состояние арматуры в бетонах на смешанных вяжущих с гидравлически неактивными или слабоактивными компонентами с большим диапазоном их содержания (50 % и более) практически не изучено. Способность добавок связывать $\text{Ca}(\text{OH})_2$ повышается в процессе термообработки и при увеличении дисперсности и активности минеральных добавок [13–16 и др.]. Таким образом, снижение щелочности жидкой фазы бетона на композиционных вяжущих может привести к развитию коррозии стали в бетоне, интенсивность которой будет определяться условиями эксплуатации конструкций. Однако, сопоставлять КВ получаемые совместным помолом цемента, минеральной добавки и суперпластификатора с автономным применением минеральных и органических до-

бавок в бетонных смесях нецелесообразно в силу ряда причин, а именно:

- в процессе совместного помола частицы и минерального компонента, и клинкерных минералов приобретают значительную активность за счет дополнительного диспергирования;

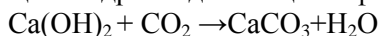
- присутствие в системах ВНВ порошкообразного суперпластификатора трансформирует как химические, так и физические свойства КВ;

- значительная удельная поверхность неактивных и слабоактивных минеральных добавок увеличивает их виртуальную активность в процессе твердения КВ.

Учитывая изложенное можно отметить, что вопросы, связанные со способностью композиционных вяжущих в зависимости от вида не клинкерного компонента, его активности и количества, пассивировать стальную арматуру изучены недостаточно, что ограничивает их применение в железобетонных конструкциях.

Первоначальное пассивирующее действие бетона является необходимым, но недостаточным условием для длительной сохранности стальной арматуры. Длительность пассивирующего действия бетона, т.е. сохранения достаточной щелочности у поверхности арматуры, обеспечивается в основном его плотностью, толщиной защитного слоя и условиями эксплуатации. Капиллярно-пористая структура бетона предполагает неизбежность его взаимодействия с окружающей средой. Из большого числа разновидностей взаимодействий наиболее интересны те, что ведут к потере способности бетона пассивировать сталь. Очевидно, это процессы ведущие к снижению рН жидкой фазы бетона при условии отсутствия депассиваторов стали. Основной причиной снижения рН жидкой фазы бетона является нейтрализация его углекислым газом, имеющимся в атмосфере в количестве 0,03 % по объему, так называемая, карбонизация.

Процесс карбонизации протекает в три ступени : сначала диффундирует CO_2 имеющийся в воздухе, проникая через поверхность бетона в систему пор, затем CO_2 в порах превращается частично в угольную кислоту, и, наконец, вступает в реакцию со щелочными компонентами цементного камня, растворенными в поровой влаге. При этом утрачивается щелочность и защитное действие бетона по отношению к стальной арматуре. Упрощенно можно представить карбонизацию гидроксида кальция в форме



На скорость карбонизации бетона существенно влияет вид цемента. Так, по данным Кишитани [17], относительная глубина карбонизации в бетонах на портландцементе – I; на шла-

копортландцементе – 1,4...2,2, на пуццолановом цементе в зависимости от содержания пуццоланы 5 % - 0,7; 10 % - 0,78; 15 % - 1,14; на цементе с 20 % золы-уноса – 1,9. В своих работах Александрин И.П. отмечал, что чем больше имеется в бетоне щелочных продуктов гидратации, тем больше CO_2 может быть связано и тем медленнее перемещается фронт карбонизации вглубь бетона. В КВ количество щелочных компонентов понижается, в связи с этим бетон на их основе карбонизируется быстрее, чем бетон на чисто клинкерном портландцементе.

В целом, большое содержание щелочных компонентов в бетоне, как правило, имеет для развития карбонизации большее значение, чем малое диффузионное сопротивление, поэтому бетоны на портландцементе, несмотря на малое диффузионное сопротивление, часто имеют меньшую глубину карбонизации, чем бетоны на композиционных вяжущих. На скорость карбонизации бетона влияют такие физические факторы, как влажность и температура. Наибольшая скорость карбонизации бетона наблюдается при относительной влажности воздуха 50...60 %, когда пленочной влаги в порах достаточно для осуществления реакции, и в то же время микрокапиллярные поры не заполнены водой. При относительной влажности воздуха 30 % карбонизация практически прекращается из-за недостатка влаги в бетоне. Влажностные характеристики бетонов имеют большое значение для скорости карбонизации бетонов. В анализируемой литературе практически нет данных о диффузионной проницаемости бетонов на КВ. А так как эта характеристика является важнейшей, с точки зрения прогнозирования длительности защитных свойств бетона по отношению к арматуре, то необходимо выяснить влияние вида, расхода, фазового состава композиционных вяжущих на диффузионную проницаемость бетона.

Таким образом, на основе изложенного выше можно сделать выводы, что:

- бетоны на КВ, как по своей механической прочности, так и по важнейшим техническим свойствам адекватны аналогичным бетонам на обычном портландцементе;

- имманентным свойством композиционных вяжущих является связывание гидроксида кальция дисперсными минеральными добавками с одновременным упрочнением структуры бетона и снижением рН его жидкой фазы;

- способность КВ в зависимости от вида не клинкерного компонента, его активности и расхода пассивировать стальную арматуру требует дальнейшего изучения;

- пониженный запас клинкерного фонда в бетонах на композиционных вяжущих вызывает необходимость изучения вопросов длительной сохранности арматуры в них.

Исследователями, как правило, решаются частные вопросы, без учета влияния совокупности факторов, что не позволяет выявить ведущую причину коррозии стали в бетонах с использованием различных КВ.

Помимо перечисленных выше факторов немаловажное значение имеют и условия эксплуатации конструкций и изделий из армированных бетонов на композиционных вяжущих так как коррозия арматуры, как электрохимический процесс, может протекать лишь в среде электролита (в газоздушных условиях таковой является пленочная влага), то вопрос о влажностном режиме эксплуатации является основным. Поэтому необходимо, кроме выявления ведущего фактора коррозии арматуры и его количественной оценки, решить вопрос о надежной защите арматуры при эксплуатации конструкций в различных влажностных условиях.

**Работа выполнена в рамках реализации ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009-2013 годы, грант № 14.В37.21.1487, тема: «Разработка научных и практических основ создания композиционных вяжущих на основе техногенного сырья с целью производства фибробетона для ремонтных работ» и Программы стратегического развития БГТУ им. В.Г. Шухова на 2012–2016 годы.*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лесовик Р.В., Жерновский И.В. Выбор кремнеземсодержащего компонента композиционных вяжущих веществ // Строительные материалы. 2008. № 8. С. 78–79.
2. Лесовик Р.В. Мелкозернистые бетоны на композиционных вяжущих и техногенных песках: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук // Белгородский государственный технологический университет. Белгород, 2009. 463 с.
3. Лесовик В.С. Повышение эффективности производства строительных материалов с учетом генезиса горных пород: Научное издание. М.: Издательство АСВ, 2009. 526 с.
4. Гридчин А.М., Евтушенко Е.И., Лесовик Р.В. Комплексная переработка и использование техногенного сырья // Рециклинг отходов. 2006. № 4. С. 20.
5. Высококачественные бетоны на техногенном сырье для ответственных изделий и кон-

струкций // Л.А. Сулейманова, Р.В. Лесовик, Е.С. Глаголев, Д.М. Сопин // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2008. № 4. С. 34–37.

6. К проблеме повышения эффективности композиционных вяжущих / В.С. Лесовик, Н.И. Алфимова, Е.А. Яковлев, М.С. Шейченко // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. №1. 2009. С. 30–33.

7. Гридчин А.М., Лесовик Р.В. Особенности производства ВНВ и бетона на его основе с использованием техногенного полиминерального песка // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2002. № 1. С. 36.

8. Изотов В. С. Защитные свойства бетона по отношению к стальной арматуре как функция структуры цементного композита // Известия КГАСУ. Строительные материалы и технологии. 2006. № 1(5). С. 23-27.

9. Долговечность железобетона в агрессивных средах / С.Н. Алексеев, Ф.М. Иванов, С. Модры, П. Шисль. М.: Стройиздат, 1990. 320 с.

10. Москвин В.М., Рояк Г.С. Коррозия бетона при действии щелочей цемента на кремнезём заполнителей. М.: Госстройиздат. 1962. 164 с.

11. Алексеев С.Н. и др. Долговечность железобетона в агрессивных средах. – М.: Стройиздат, 1976. 205 с.

12. Волженский А.В. Влияние дисперсности портландцемента и В/Ц на долговечность камня и бетона // Бетон и железобетон. 1990. №10. С. 16–17.

13. Вишневская Я.Ю. Оптимизация условий твердения композиционных вяжущих в зависимости от генезиса кремнеземсодержащего компонента: Автореф. дис. канд. техн. наук, Белгород, 2011. 24 с.

14. Сулейманова Л.А., Жерновский И.В., Шамшуров А.В. Специальное композиционное вяжущее для газобетонов неавтоклавно-го твердения // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2012. № 1. С. 39–45.

15. Лесовик В.С., Агеева М.С., Иванов А.В. Гранулированные шлаки в производстве композиционных вяжущих // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2011. № 3. С. 29–32.

16. Урханова Л. А., Заяханов М. Е. Вяжущие и бетоны на основе вулканических шлаков // Строительные материалы. 2006. №7. С. 22–24.

17. International Congress on the Chemistry of Cements. 4. 1980. pp. 85–86.