

К.Б. Шарафутдинов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

ПРИМЕНЕНИЕ СУПЕРАБСОРБИРУЮЩИХ ПОЛИМЕРОВ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Использование суперабсорбирующих полимеров в качестве добавки в бетон является актуальной темой исследований. Добавки позволяют влиять на свойства бетона – его усадку, прочность, долговечность, морозостойкость и другие, поэтому становится возможным провести множество исследований с этими добавками. В статье приведены способы применения суперабсорбирующих полимеров в строительстве и перспективы их использования, рассмотрены достижения отечественных и зарубежных ученых, описаны результаты их исследований. Основное внимание уделяется определению оптимального процентного соотношения массы суперабсорбента к массе цемента в объеме бетонной смеси, а также поднимается вопрос о влиянии различных дозировок суперабсорбента на свойства бетонной смеси. Необходимо определять оптимальное процентное соотношение частиц суперабсорбента для каждого типа добавки. Влияние одного количества дозировки добавки будет по-разному влиять на свойства бетонной смеси разных составов. Проанализирована проблема потери прочности при возникновении макропор после реакции суперабсорбента с водой. Рассмотрена возможность залечивания трещин с помощью добавок в бетон, а также возможность создания бетона, способного к самолечению, изготовленного на основе суперабсорбирующих полимеров. Описаны механизмы влияния концентрации суперабсорбента на скорость и качество залечивания трещины, а также возможность применения этой технологии в строительстве, особенно при отделочных и ремонтных работах. В заключение рассмотрены перспективы применения суперабсорбирующих полимеров в строительной сфере, а также возможности и пути для дальнейших исследований в этой области.

Ключевые слова: суперабсорбирующие полимеры, САП, добавки, бетон, цемент, трещины, прочность, пористость.

Суперабсорбирующие полимеры (САП) нашли применение в технологии бетона, благодаря их способности поглощать количество воды во много раз большее своего собственного веса, удерживать ее и выделять при изменении условий. Суперабсорбирующие полимеры добавляются в бетонную смесь в небольших количествах во время смешивания для изменения параметров свежего и/или затвердевшего бетона. Их количество обычно находится в диапазоне от 0,2 до 4 % на единицу массы порошка.

С самого изобретения суперабсорбентов идея заключалась в том, чтобы использовать их в качестве добавок для строительных растворов. Однако такие продукты никогда не были представлены на рынке. В конце прошлого века основной упор делался на внутреннее отверждение сверхвысокопрочного бетона.

Другой важной особенностью применения суперабсорбентов является применение их для повышения морозостойкости материала. Эта проблема очень актуальна для строительства в условиях вечной мерзлоты в нашей стране. Добавки позволяют создавать пористые системы, однако необходимо выяснить, насколько это будет эффективнее, чем использование традиционных материалов. С помощью добавок осуществляется захват воздуха, когда в бетонную смесь производится преднамеренное введение воздуха, равномерно распределенного в очень маленьких пузырьках/пустотах, главным образом для улучшения морозостойкости. Объем увлекаемого воздуха обычно колеблется от 3 до 7 % от общего объема бетона.

Суперабсорбирующие добавки могут использоваться как микрорезервуары для химических веществ, которые выделяются при определенных условиях. Так можно улучшать сразу несколько свойств бетона.

Использование суперабсорбентов в строительстве началось сравнительно недавно, но уже проведено много исследований и получено немало результатов. Ряд исследователей уже выяснили влияние добавления САП на реологическое поведение бетона, усадку, прочность, долговечность и другие его свойства. Изучено влияние на такие свойства бетона, как кинетика поглощения и десорбции воды, и влияние на микроструктуру бетона. Однако результаты этих исследований противоречивы, из-за различия в типах используемых добавок или из-за разного количества компонентов бетонного состава.

Суперабсорбенты могут поглощать непропорционально большое количество жидкости (по сравнению с собственной массой), образуя нерастворимый гель. Способность поглощения жидкости и скорость могут быть изменены в зависимости от целого ряда факторов, таких как полимерная композиция, а также физические характеристики и свойства текучей среды, в том числе ионная концентрация, pH, температура и давление. Например, масса воды, поглощенной на единицу массы САП, может достигать 1000 г/г в дистиллированной воде, но она падает до около 50 г/г в разбавленных солевых растворах. Скорость набухания колеблется от менее чем за минуту до нескольких часов в зависимости от типа, коэффициента диффузии и длины пути диффузии частиц [9]. Первые суперабсорбирующие полимеры были произведены в начале 1970-х гг. в Японии и в США.

За последние несколько лет число научных публикаций, связанных с применением суперабсорбентов в бетоне, резко возросло. Затрачено немало усилий на изучение фундаментальных механизмов САП, их влияния на различные свойства бетона, на понимание кинетики воды, десорбции САП в бетоне и его влияния на реологию, гидратацию, развитие микроструктуры, объемные изменения, механические свойства, прочность и другие свойства.

Цель данной обзорной статьи состоит в том, чтобы, рассмотрев результаты исследований зарубежных и отечественных авторов, выделить проблемы и будущие перспективы научного исследования.

Возможности применения суперабсорбентов в строительстве.

Способность суперабсорбентов впитывать в себя воду позволяет использовать их там, где необходимо строго контролировать водоцементное соотношение. Как известно, при усадке бетона в бетонных конструкциях появляются трещины. Это встречается при высоком содержании цемента в смеси или низком водоцементном отношении, что приводит к аутогенной усадке, вызванной самоосушением. САП может эффективно использоваться в качестве водоотбирающего агента в бетоне для максимизации гидратации цемента и минимизации самоосушения. При этом добавка будет незначительно влиять на другие свойства бетона и конструкции в целом. Таким образом, очевидным является применение суперабсорбентов для уменьшения усадки бетонной смеси.

Производство бетона, стойкого к замерзанию и оттаиванию, очень актуально в условиях климата нашей страны. Суперабсорбент позволяет создать материал с конкретными параметрами, включая воздушно-пустотную систему, эффективность которой контролируется объемным содержанием воздуха, расстоянием и размером воздушных пустот. Смеси, содержащие определенные типы САП, обеспечивают повышенную устойчивость к замерзанию и оттаиванию в присутствии антиобледенительных химикатов. Выдвинуто предположение [1], что САП может взаимодействовать с суперпластификатором для увеличения содержания воздуха или взаимодействовать с очень маленькими пузырьками воздуха, прилипшими к частицам САП во время смешивания. Авторы исследования продемонстрировали преимущества технологии на основе САП по сравнению с традиционным химическим захватом воздуха, а именно: стабильность системы воздушной полости и улучшенный контроль как количества добавляемого воздуха, так и размера воздушной полости. Эта способность суперабсорбентов позволяет использовать их для создания бетонов с высоким показателем *морозостойкости*. Однако увеличение воздуха обыч-

ными воздухововлекающими примесями часто приводит к техническим трудностям, таким как потеря воздуха во время уплотнения или перекачки и химическая несовместимость с суперпластификаторами.

Добавление САП во время смешивания бетона может привести к значительным изменениям в реологии бетонной смеси. Например, может уменьшиться отношение свободной воды к цементу, что может привести к увеличению как предела текучести, так и пластической вязкости. По теме *модификации реологии* проведен ряд исследований немецкими учеными [1].

САП также можно использовать для высвобождения веществ, отличных от воды, которые растворяются в частицах САП. Вещества, изначально обладающие более высокой активностью в полимере, будут выпускаться из частиц в окружающую среду. По сравнению с другими абсорбирующими полимерами САП имеют особенность: их набухание зависит от pH среды. Эта особенность может быть использована в качестве переключателя для контролируемого высвобождения вещества, находящегося в частице САП. Сейчас этот эффект используется в пестицидах, удобрениях и фармацевтических препаратах.

Возможное использование САП в качестве контролируемого антиадгезива в бетоне может быть применено к конкретным пластифицирующим добавкам, которые более эффективны, когда они высвобождаются вскоре после первоначального контакта между водой и цементом, когда pH свежего бетона относительно высок. Другими словами, в частицах суперабсорбента может быть заключено необходимое вещество, которое будет высвобождено при создании определенных условий или при достижении бетонной смесью определенных показателей. Это описывается как *контролируемый выпуск вещества*.

Ряд исследований [9] проведен в области суперабсорбентов, которые набухают при контакте с водой. Увеличение объема геля водонасыщенного и набухшего суперабсорбента можно использовать для формирования барьера для потока воды. Так, для герметизации стыков различных строительных материалов были разработаны герметизирующие композиты, изготовленные из смеси модифицированного САП с резиной или с термопластичным эластомером. Композит может использоваться как строительный раствор. При контакте с водой гель набухает и герметизирует соединение, и эту особенность можно использовать для заделывания зазоров в бетонных конструкциях. Таким образом, строительный раствор будет использоваться как *гидроизоляция*.

Имеются данные об использовании САП для устранения трещин в бетоне. Для этого применялся специальный тип суперабсорбента, который мог поглощать обычную или щелочную воду в свежем и затвердевшем бетоне. В этом случае частицы САП оставались бездействующими, а затем набухали при попадании воды в трещину. Эффективность такого способа была подтверждена сниженной проницаемостью [8].

Плохие условия отверждения поверхности могут снизить долговечность бетонных поверхностей из-за высоких скоростей испарения воды, приводящих к растрескиванию при пластической усадке и более медленному развитию поверхностной прочности. Этого можно избежать, нанеся на бетонную поверхность в течение периода отверждения слой геля с водным наполнением, который обеспечит подачу воды на поверхность затвердевающего бетона. Слой геля укрепляется и защищается от испарения путем нанесения латексного резинового покрытия поверх геля. Возможно использование типа опалубки с контролируемой проницаемостью, изготовленной из обычной опалубки, облицованной листовой пленкой САП, которая непроницаема для воздуха и может поглощать количество воды, превышающее свой вес в 200 раз. Листы такой опалубки обрезаются по длине и сшиваются с формой. Во время уплотнения бетона часть воды из смеси выходит через форму, оставляя бетон в зоне покрытия с пониженным водоцементным соотношением. В результате опалубка с контролируемой проницаемостью может обеспечить значительное увеличение прочности бетона, улучшение внешнего вида поверхности и значительное снижение давления в опалубке [1].

Гель, предварительно пропитанный в водном растворе хлорида кальция, может обеспечить огнезащиту строительных материалов [9]. Водный раствор хлорида кальция обладает способностью поглощать водяной пар или выпускать его в атмосферу до тех пор, пока он не достигнет равновесия с окружающей средой.

Существует методика [1], с помощью которой с бетона могут быть удалены загрязнения, такие как радиоактивные изотопы, присутствующие в поровом растворе бетона и других пористых материалах. Смачивающий агент и СА-гель с нанесенными наночастицами наносятся на загрязненную поверхность. Далее смачивающий агент заставляет радиоактивный материал ресуспендироваться в поровой воде и вытягивать радиоактивную порцию воды из пор, в то время как сконструированные наночастицы необратимо захватывают радиоактивные молекулы. Высушенный гель затем вакуумируют и рециркулируют, оставляя лишь небольшое количе-

ство радиоактивных отходов. Утверждается, что за одно применение геля можно удалить до 90 % радиоактивных элементов [1].

Суперабсорбент может быть добавлен в сухом виде для уменьшения вязкости влажной смеси, или предварительно набухшим, или частично предварительно набухшим для внутреннего отверждения. В первом случае очень быстрое поглощение СА необходимо для получения пониженной вязкости, прежде чем торкретбетон ударит об обрабатываемую поверхность. Во втором случае такого особого требования нет.

Имеются данные о разработке водоблокирующего строительного наполнителя, состоящего из цемента, СА и асфальтовой эмульсии [1]. Этот наполнитель далее может быть использован как *грунт обратной засыпки*. Компоненты могут быть смешаны на месте с образованием гелеобразного твердого вещества, служащего материалом обратной засыпки. Его можно использовать при строительстве туннелей для заполнения зазора между стенами туннеля и грунтом. Основным преимуществом этого материала обратной засыпки, модифицированного с использованием СА, является его высокая деформируемость по сравнению с обычными материалами обратной засыпки. Такие материалы, как, например, гравий или песок, часто разрушаются во время движения грунта.

Композит может быть добавлен непосредственно во влажную почву для поглощения и превращения в гель любой присутствующей в грунте воды. В то же время этот композит образует жесткую поверхность, на которой могут быть установлены фундаменты здания. Так будет выполнена стабилизация почвы и ее подготовка к дальнейшему строительству [9].

Характер набухания СА может быть использован в водостойких «умных» красках. Частицы суперабсорбента будут препятствовать быстрому проникновению воды в материал.

Способность СА к набуханию в гелях и чувствительность к изменениям содержания воды, pH делают СА пригодным для разработки *датчиков*, которые можно использовать для мониторинга состояния конструкций зданий. Был разработан чувствительный к давлению переключатель на основе полиэлектролита [9]. Электрический потенциал может быть индуцирован в мягком гидрогеле путем приложения механического напряжения в одной части геля или изменения pH геля, вызванного деформацией. Прикрепив провода к гелю, можно вызвать разность потенциалов, генерирующих сигнал, интенсивность которого зависит от величины механической деформации. Также были разработаны чувствительные к воде устройства, которые используют высокую проводимость набухших электролитных гелей в качестве переключателя. Это явление основано на

том факте, что сухие полимеры не проводят электричество, а набухшие полимеры проводят электричество и замыкают электрическую цепь. Величина проводимости геля указывает на степень поглощения воды. Что касается конкретных применений, то можно предположить, что такие датчики на основе СА могут быть в конечном итоге разработаны для контроля рН или концентрации соли в бетонных конструкциях. Эти показатели являются ключевыми параметрами, влияющими на коррозию стальной арматуры в бетонных конструкциях.

Исследования, проведенные отечественными и зарубежными учеными. Бетон склонен к растрескиванию от различных факторов, таких как усадка, температурные воздействия и физико-химические реакции. Кроме того, если мы имеем дело с железобетонными конструкциями, то в них в любом случае будут появляться трещины в растянутой зоне. Эти трещины создают пути для проникновения вредных веществ, наличие трещин приведет к коррозии арматуры и далее к постепенному разрушению конструкции. Подвалы, подпорные стенки, резервуары, дамбы, туннели, трубопроводы постоянно подвержены такому воздействию, таким образом, наличие трещин напрямую влияет на долговечность железобетонной конструкции. Для вышеперечисленных конструкций традиционно используют такие методы защиты, как гидроизоляция и защитные покрытия, но нужно помнить, что со временем все эти покрытия потребуют ремонта или повторного нанесения, что может быть трудновыполнимым, дорогостоящим или вовсе не выполнимым заданием.

Бетон является достаточно долговечным материалом, именно трещины способствуют его разрушению. На ремонт и обслуживание бетонных конструкций необходимо большое количество денежных средств, поэтому в настоящее время следует искать способы, позволяющие уменьшить затраты на ремонт или замену бетонных конструкций. Суперабсорбент позволяет создать бетон, имеющий способность самовосстанавливаться при появлении трещины и при дальнейшем проникновении в нее воды. Способность к заживлению трещины зависит от многих факторов, таких как первоначальная ширина трещины, гидравлический градиент давления, температура, состав смеси и условия среды.

Ряд исследований был проведен британскими учеными [10]. Целью было выявить, можно ли заделать трещины путем повторного увлажнения поверхности трещины. Достижения в области материаловедения привели к развитию целого ряда интеллектуальных адаптивных материалов. Был разработан полимер, содержащий в себе микрокапсулы с «залечивающим» реагентом. При развитии трещины полимер разрушался и высвобождал

ждал этот реагент в трещину, далее реагент смешивался с другим реагентом и кристаллизовался, заделывая трещину. Таким способом исследователям удалось добиться полного заделывания трещин шириной 0,13 мм за счет реакций суперабсорбента.

Исследователи задались вопросом, можно ли таким путем залечивать трещины с шириной раскрытия более 0,1 мм и более. В рамках их эксперимента были приготовлены образцы, содержащие четыре типа САП. Их содержание варьировалось от 0 до 13 % от массы цемента. Образцы имели трещины в пределах от 0,1 до 0,4 мм, также было дополнительно создано гидростатическое давление для имитации проникновения грунтовых вод. При проникновении воды суперабсорбент набухал и заделывал трещину. Также поведение САП напрямую зависело от условий воздействия воды. Если бетон подвергался воздействию циклов смачивания и сушки, то в периоды сушки суперабсорбент мог также помочь самовосстановлению трещины. Важным является вопрос о возможности практического применения таких материалов, а также их наличии и доступности на рынке. Суперабсорбент также должен отвечать таким критериям, как доступность, надежность, долговечность. Стоит отметить, что исследователям было доступно лишь 20 типов суперабсорбента, из которых было отобрано лишь 4. Остальные не подходили для данного эксперимента, так как элементарно не могли набухать до размеров, достаточных для заделки трещины.

Как отмечалось выше, САП может поглощать непропорционально большое количество жидкости, расширяясь и образуя нерастворимый гель. Уникальностью САП является то, что скорость набухания и емкость могут быть изменены в зависимости от типа полимера и свойств окружающей среды, в том числе температуры и давления.

Количество дозировки САП в смесь также влияло на свойства образцов. Образцы, имеющие большую концентрацию САП, демонстрировали больший потенциал для герметизации трещин. С другой стороны, большая концентрация частиц САП уменьшила прочность бетонных образцов. Так, добавление 5–13 % САП по весу цемента привело к снижению прочности на сжатие на 80–87 % [8]. Авторы считают, что снижение прочности произошло из-за большого количества пустот САП. В рамках этого эксперимента частицы суперабсорбента набухали при просачивании грунтовых вод, создавая гель, и заделывали трещину в бетоне. Но это было применимо только для трещин небольшой ширины раскрытия, составляющей менее 0,2–0,3 мм. Вопрос остается в том, что необходимо выявить именно то количество САП, которое будет достаточно для закрытия трещины необходимой ширины.

Если бетон подвергается воздействию холодной окружающей среды, то замораживание влажного геля САП может вызвать дополнительные неизученные проблемы, а также повлиять на прочность конструкции. В рамках исследования не было проведено экспериментов на морозостойкость образцов в процессе и после заделывания трещины.

Другое моделирование показало [10], что эффективность использования САП для заделывания трещины может быть повышена за счет увеличения коэффициента повторного набухания и размера частиц. Это увеличивает количество САП в трещине и объем геля, который заполняет трещину. Моделирование на основе этого исследования показывают, что доза САП в 1 % от веса цемента сможет заделать трещины шириной в 0,2 мм, а дозировки САП в 5 % смогут заделать трещины шириной в 0,7 мм. Авторы отмечают, что еще можно провести исследования на смесях, содержащих более низкие дозы суперабсорбента. Если уплотнение трещины останется эффективным при более низких дозах САП, то можно выявить, как это влияет на предел прочности. Увеличение дозировки САП ускоряет уплотнение и позволяет заделывать более широкие трещины.

Другое исследование [2] было проведено в области применения летучей золы как примеси к суперабсорбенту. Летучая зола представляет собой промышленный побочный продукт, которым можно заменить цемент. Это снизит долю портландцемента и позволит производителям цемента оптимизировать материальные затраты и экологичность. Добавление летучей золы приводит к большей прочности на сжатие вследствие пуццолановой реакции гидроксида кальция с летучей золой, и в результате получается силикатный гидрат и кальций-алюминат гидрат. В дальнейшем эти элементы улучшают прочность на сжатие и уменьшают пористость бетона.

Перед авторами была поставлена задача, выяснить оптимальное соотношение количества летучей золы к количеству суперабсорбента. Для эксперимента была выбрана летучая зола с высоким содержанием СаО (44,07 %). Такой выбор объясняется возможностью растворенного Са²⁺ связываться с САП. Это позволяет ограничить первоначальный эффект реакции САП при перемешивании строительного раствора. Цементный раствор состоял из обычного портландцемента, песка, САП и летучей золы. Было обследовано восемь пропорций компонентов соотношения летучей золы и суперабсорбента. Цемент был частично заменен летучей золой в массовом соотношении 15, 25, 35 и 45 %, а соотношение частиц САП составляло 4, 6 и 8 % от массы цемента.

По результатам эксперимента, прочность на сжатие образцов с летучей золой и САП оказалась ниже, чем при содержании САП, более чем на 4 %. Усредненный предел прочности на сжатии был приблизительно на 19 % меньше. Также результаты показали, что через 28 дней прочность на сжатие оказалась примерно на 20 % ниже, чем у цементного раствора, изготовленного без добавления летучей золы [2].

Как уже было отмечено раньше [10], снижение прочности на сжатие произошло из-за того, что первоначальное набухание частиц САП генерирует большое количество пустот, которые могут быть классифицированы как макропоры, размером более 50 нм в диаметре. Эти САП-пустоты образовались от первоначального набухания САП и повлияли на прочность. Проблемой здесь является первоначальное набухание частиц САП, которое происходит в момент замешивания смеси. Именно поэтому авторы рассматривают возможность применения летучей золы. В целом впитывающая способность САП может быть подавлена добавлением концентрированных катионов кальция в раствор. Частицы связываются с карбоксильными группами в акрилатных цепях САП, и это приводит к десорбции жидкости из САП.

Китайские ученые [3] исследовали поведение частиц суперабсорбента на границе межфазной зоны образцов, армированных волокном. Авторы ставят под вопрос и изучают процессы, происходящие в зоне сцепления волокон и бетона. Понимание влияния частиц САП на микроструктуру, особенно на границе раздела среды, имеет решающее значение при проектировании большепролетных сооружений. В рамках их исследования были использованы образцы с содержанием частиц суперабсорбента от 0 до 0,6 % от массы цемента. Добавление САП увеличило степень гидратации, тем не менее образовавшиеся поры после десорбции воды также привели к снижению прочности на сжатие. Более того, включение в смесь САП с крупными частицами может усугубить эту проблему. С другой стороны, режим парового отверждения уменьшил влияние размера частиц САП на прочность на сжатие по сравнению с теми, которые отверждались в воде с той же продолжительностью. Прочность образцов на изгиб напрямую зависела от прочности на сжатие. Авторы вывели соотношение между прочностью на изгиб и силой сцепления волокон с бетоном. В общем случае добавление небольшого количества САП может снизить микротрещины и повысить силу сцепления волокон с бетоном, а для достижения оптимальной прочности на изгиб авторы рекомендуют использовать соотношение САП в 0,3 % по отношению к массе цемента.

Теми же авторами было проведено исследование [4] влияния супер-абсорбента на усадку сверхпрочного бетона. Такой бетон более подвержен усадке и появлению усадочных трещин из-за низкого отношения воды к связующему веществу. Результаты показали, что САП вызвал неравномерное распределение влаги в образце. Выпуск воды из САП происходил быстрее на расстоянии до 3 см от поверхности образца. Таким образом, можно сделать вывод, что размер образца также влияет на поведение суперабсорбента. Необходимо было выявить зависимость между усадкой и потерей влаги для различных размеров образцов. Что касается влияния размера, то более важная роль суперабсорбента в сдерживании усадки наблюдалась в больших образцах. Вода здесь также имеет большое значение, так как она служит реагентом для процесса гидратации, и это определяет плотность и пористую структуру бетона. Таким образом, потеря влаги из-за испарения может значительно влиять на свойства бетона, особенно при его усадке. Любые изменения отношения воды к цементу и внедрение САП неизбежно приведут к изменению степени гидратации и повлияют на свойства бетона.

Другие китайские ученые [5] исследовали влияние концентрации NaCl в растворе на уплотнение трещин суперабсорбентами. Раствор NaCl также может повлиять на набухание частиц суперабсорбента. Известно, что величина набухания суперабсорбента в растворах постепенно уменьшается с увеличением концентрации NaCl. Набухший суперабсорбент может герметизировать или частично герметизировать трещину с шириной 0,1–0,4 мм при низкой концентрации раствора NaCl, составляющей 0,12 % массы цемента. Очевидно, что способность абсорбции воды супер-абсорбентом при высокой концентрации раствора NaCl снижается. Предположительно, в высокой концентрации растворах NaCl суперабсорбент может блокировать трещины и улучшить герметичность бетона.

Учеными из Ирана [6] был разработан суперабсорбент на основе альгината натрия и монтмориллонита. Разработанный ими нанокompозит обладает хорошей способностью повторного набухания. Авторы указывают на возможность применения данного типа суперабсорбента в сельском хозяйстве, однако его свойства позволяют внедрить его и в строительную сферу.

Размер пористой структуры в бетоне также влияет на свойства сверхпрочного бетона. Как уже было сказано выше [8], слишком большой размер пустот приводит к потере прочности бетона. При замешивании раствора частицы внутри бетона набухают и поглощают часть воды благодаря своей абсорбционной способности. Другими словами, суперабсорбент образует резервуар для воды за счет возможности поглощения и хранения

воды. Далее поглощенная вода выделяется в окружающую среду, а объем суперабсорбента уменьшается снова, формируя пустоты. Поскольку эти пустоты достаточно велики, есть возможность использования их для повышения других свойств бетона. С другой стороны, общая пористость может негативно повлиять на прочность на сжатие.

Большой обзор проведен учеными из Бельгии [7]. Основной акцент был сделан на суперабсорбентах на полисахаридной основе, полусинтетических и «умных» суперабсорбентах. Основная часть суперабсорбентов все еще имеет синтетическое происхождение. Однако они часто изготавливаются из не биосовместимых, не биоразлагаемых или не возобновляемых источников. Вопрос экологии и использования таких природных суперабсорбентов на основе полисахаридов приобретает все больший интерес. В пользу применения данных САП приводятся такие аргументы, как снижение воздействия на окружающую среду по сравнению с синтетическими суперабсорбентами, биоразлагаемость, доступность, биосовместимость, нетоксичность и все те функции, которые могут сделать их альтернативой синтетическим добавкам. Было описано, каким должен быть идеальный суперабсорбент. Он должен иметь высокую поглощающую способность, превышающую его собственный вес до 1000 раз. Также он должен иметь высокую скорость поглощения, большую впитывающую способность при воздействии нагрузки, низкую стоимость, высокую долговечность и стабильность при набухании или во время хранения. При этом срок годности должен составлять более 2–3 лет.

Ряд исследований был проведен отечественными учеными. Авторы из УГНТУ [11] подняли вопрос возможности использования суперабсорбента для обеспечения целостности крепи скважин. Предполагается, что «самозалечивающийся» цемент Futur сможет эффективно герметизировать пространство между стенкой скважины и обсадной колонной. Важной особенностью цемента Futur является способность восстанавливаться до первоначального вида при проникновении углеводородного газа.

Кроме того, авторы описали исследования группы ученых из Делфтского технического университета. Их разработка состояла в создании бетона, в состав которого были включены бактерии, заключенные в биоразлагаемый пластик. При воздействии воды бактерии начинали питаться лактатом кальция и производить отложения кальция, которые прочно сцеплялись с бетоном, перекрывая трещину. Эта разработка лучше всего подойдет для строительства подземных хранилищ опасных отходов, подземных туннелей, фундаментов, автодорожных мостов, бетонных перекрытий и гидротехнических сооружений.

Были описаны и способы производства суперабсорбентов на основе акриловой кислоты [13]. В статье подробно рассмотрены характеристики, сырье и области использования САП из акриловой кислоты. Такие САП имеют наилучшее соотношение цены и качества и будут востребованы в ближайшем будущем. Выявлены [14] закономерности между соблюдением температурного режима во время синтеза суперабсорбентов и их влагопоглощающими свойствами.

Имеются исследования [15], в которых выполнялась проверка надежности ускоренных методов определения морозостойкости бетона. Для проверки точности методов было протестировано 10 бетонных образцов-кубов, полученные результаты были сопоставлены с испытаниями аналогичных образцов по базовому методу. Поднимался вопрос о том, что в бетоне, приготовленном с применением суперабсорбента, будут наблюдаться иные механизмы разрушения, поэтому методы определения морозостойкости могут быть неприменимы к новым типам бетонов.

Выводы и перспективы применения суперабсорбирующих полимеров. Описанные выше исследования затрагивают лишь часть возможных областей для дальнейшего изучения. С течением времени появляются новые типы суперабсорбентов, в которых может отличаться химический состав, методы производства, свойства и характеристики. Хотя и существуют некоторые рекомендации в отношении выбора добавки и способа её добавления в бетонные смеси, в данный момент не разработана нормативная база, которая позволяла бы применять ту или иную добавку. Часть добавок может использоваться без указания этого в проекте, однако для большей их эффективности следует создать некую базу, а также нормативные документы по применению этих добавок. Тема для допустимого исследования может касаться конкретного типа СА и разработки методики для применения этой добавки. Такие исследования имеют большое значение для отечественной науки, ведь в настоящее время в стране проведено мало исследований в области применения суперабсорбирующих полимеров.

Для понимания и оптимизации внутреннего отверждения бетона, а также для других перспективных практических применений суперабсорбирующих полимеров необходимо знание кинетики миграции воды. Поведение добавок в воде и в пористых растворах уже описано и сопоставлено с поведением их в цементной пасте, строительном растворе и бетоне. При этом явления поглощения и десорбции воды, по-видимому, хорошо изучены, но требуется больше данных о различных типах добавок. Можно собрать данные об использовании добавок со смешанными цемен-

тами, возможном взаимодействии с другими добавками и различными составами смесей, особенно в растворах и бетонах.

Все еще требуются серьезные исследования для понимания влияния добавок на реологическое поведение бетона и раствора в их свежих состояниях. Внедрение нового метода, такого как использование суперабсорбентов в бетоне, требует предварительных и обширных исследований, чтобы применять их безопасно и эффективно. В настоящее время в литературе доступно лишь несколько результатов, но очевидно, что добавление САП к бетону может значительно изменить его реологию. Например, уже было отмечено, что добавление определенного количества САП относительно массы цемента эквивалентно удалению воды из системы. Если в смесь не добавляется дополнительная вода для компенсации влияния суперабсорбента, то наблюдается увеличение предела текучести и пластической вязкости цементирующей системы. Это можно наблюдать при использовании реометра для измерения реологических свойств. Результаты исследований также показывают, что в смесях с САП наблюдается увеличение содержания воздуха. Дальнейшие исследования будут необходимы, чтобы полностью изучить влияние САП на свойства бетона.

Усадка бетона является серьезной проблемой, так как объемные изменения в бетоне из-за усадки являются основными источниками напряжений в бетонных конструкциях и во многих случаях приводят к трещинам. Выше уже были описаны эффекты использования суперабсорбентов в качестве добавки для внутреннего отверждения в цементных материалах с низким содержанием воды и малопроницаемой микроструктурой. Но добавление суперабсорбентов, часто в сочетании с дополнительным количеством воды, влияет не только на аутогенную усадку, но и на другие типы объемных изменений. Однако в данный момент имеется мало информации о влиянии добавок на пластическую усадку. Результаты лишь свидетельствуют о снижении пластической усадки в бетонах, содержащих добавки и дополнительное количество воды. Уменьшение размера частиц СА не улучшило эффективность внутреннего отверждения, но привело к менее выраженному снижению аутогенных деформаций для исследуемого материала. Для выяснения причин таких результатов также необходимы дальнейшие исследования. Также пока еще мало знаний, чтобы объяснить механизмы внутреннего отверждения бетона с использованием СА, особенно в первые несколько часов после схватывания бетона.

Добавляя суперабсорбент в бетон, можно изменять его прочность на сжатие и растяжение и другие упругие свойства. Однако уже выяснено, что использование СА незначительно повышает прочность бетона в зре-

лом возрасте и, следовательно, не может конкурировать с традиционными полимерными водоредуцирующими добавками.

Имеются выводы и заключения, касающиеся проницаемости для воды и кислорода, устойчивости бетона к замерзанию-оттаиванию и влияния САП на долговечность. Однако в этой области также недостаточно исследований, таких как прогнозирование долговечности внецентренно сжатых бетонных элементов или взаимодействия материала образцов с агрессивными химическими средами.

Библиографический список

1. Mechtcherine V, Reinhardt H. W. Application of super absorbent polymers (SAP) in concrete construction: State of the art report prepared by technical Committee 225 SAP. – Dordrecht: Springer Netherlands, 2012. – 169 p.
2. Pattharaphon Chindasiriphan, Hiroshi Yokota, Paponpat Pimpakan Effect of fly ash and super-absorbent polymer on concrete self-healing ability // *Construction and Building Materials*. – 2020. – Vol. 233. – P. 238–240. Article 116975.
3. Jianhui Liu, Nima Farzadnia, Caijun Shi Effects of superabsorbent polymer on interfacial transition zone and mechanical properties of ultra-high performance concrete // *Construction and Building Materials*. – Vol. 231. Article 117142.
4. Effects of superabsorbent polymer on shrinkage properties of ultra-high strength concrete under drying condition / Jianhui Liu, Nima Farzadnia, Caijun Shi, Xianwei Mab // *Construction and Building Materials*. – Vol. 215. – P. 799–811.
5. Influence of NaCl concentrations on the crack-sealing behavior of superabsorbent polymers in cementitious materials / Haitao Yang, Juanhong Liu, Xinshan Jia, Yucheng Zhou, Hongguang Ji // *Construction and Building Materials*. – Vol. 243. Article 118228.
6. Semi-IPN superabsorbent nanocomposite based on sodium alginate and montmorillonite: Reaction parameters and swelling characteristics / Ali Olad, Mahyar Pourkhiyabi, Hamed Gharekhani, Fatemeh Doustdar // *Carbohydrate Polymers*. – 15 June 2018. – Vol. 190. – P. 295–306.
7. Superabsorbent polymers: A review on the characteristics and applications of synthetic, polysaccharide-based, semi-synthetic and ‘smart’ derivatives / Arn Mignon, Nele De Belie, Peter Dubruel, Sandra Van Vlierberghe // *European Polymer Journal*. – August 2019. – Vol. 117. – P. 165–178.
8. Sung-Hoon Kang, Sung-Gul Hong, Juhyuk Moon The effect of superabsorbent polymer on various scale of pore structure in ultra-high performance concrete // *Construction and Building Materials*. – 30 May 2018. – Vol. 172. – P. 29–40.
9. Hong Seong Wong Concrete with superabsorbent polymer, Eco-Efficient Repair and Rehabilitation of Concrete Infrastructures // *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering*. – 2018. – P. 467–499.
10. Lee H.X.D., Wong, H.S., Buenfeld N.R. Self-sealing of cracks in concrete using superabsorbent polymers // *Cement and Concrete Research*. – January 2016. – Vol. 79. – P. 194–208.
11. Агзамов Ф.А., Исмагилова Э.Р. Самозалечивающиеся цементы – ключ к сохранению герметичности крепи скважин. Часть 1 // *Нанотехнологии в строительстве*. – 2019. – Т. 11, № 5. – С. 577–586. DOI: 10.15828/2075-8545-2019-11-5-577-586
12. Васильева Н.Г. Абсорбирующие жидкость полимеры // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2014. – Т. 17, № 8. – С. 69–71.
13. Кильмухаметов М.Д., Садретдинов И.Ф., Обзор современных технологий получения суперабсорбирующих полимеров (САП) для комплекса акриловой кислоты ОАО «Газпром Нефтехим Салават» // *Башкирский химический журнал*. – 2014. – Т. 21, № 2. – С. 5–14.
14. Сухов А.И. Разработка схемы производства суперабсорбирующих полимеров на основе акриловых производных в водной среде // *Альманах научных работ молодых ученых университета*

ИТМО XLVII Научной и учебно-методической конференции университета ИТМО по тематике: фотоника (Санкт-Петербург, 30 января – 02 февраля 2018 г. – СПб: Университет ИТМО, 2018. – С. 44–46.

15. Перцева О.Н., Селезнева А.Д., Пулькинова Д.А. Проверка надежности ускоренных методов определения морозостойкости бетона // Системы. Методы. Технологии. – 2018. – № 1 (37). – С. 85–90.

16. Попов Д.Ю., Лесовик В.С., Мещерин В.С. // Влияние суперабсорбирующих полимеров на пластическую усадку цементного камня // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2016. – № 11. – С. 6–12.

References

1. Mechtcherine V, Reinhardt H. W. Application of super absorbent polymers (SAP) in concrete construction: State of the art report prepared by technical Committee 225 SAP. Dordrecht: Springer Netherlands, 2012, 169 p.

2. Pattharaphon Chindasiriphan, Hiroshi Yokota, Paponpat Pimpakan Effect of fly ash and super-absorbent polymer on concrete self-healing ability, 2020, *Construction and Building Materials*, Volume 233, Elsevier, pp. 238–240, Article 116975.

3. Jianhui Liu, Nima Farzadnia, Caijun Shi Effects of superabsorbent polymer on interfacial transition zone and mechanical properties of ultra-high performance concrete, *Construction and Building Materials*, Volume 231, Article 117142.

4. Jianhui Liu, Nima Farzadnia, Caijun Shi, Xianwei Mab Effects of superabsorbent polymer on shrinkage properties of ultra-high strength concrete under drying condition, *Construction and Building Materials*, Volume 215, pp. 799–811.

5. Haitao Yang, Juanhong Liu, Xinshan Jia, Yucheng Zhou, Hongguang Ji Influence of NaCl concentrations on the crack-sealing behavior of superabsorbent polymers in cementitious materials, *Construction and Building Materials*, Volume 243, Article 118228.

6. Ali Olad, Mahyar Pourkhiyabi, Hamed Gharekhani, Fatemeh Doustdar Semi-IPN superabsorbent nanocomposite based on sodium alginate and montmorillonite: Reaction parameters and swelling characteristics *Carbohydrate Polymers*, Volume 190, 15 June 2018, pp. 295–306.

7. Arn Mignon, Nele De Belie, Peter Dubruel, Sandra Van Vlierberghe Superabsorbent polymers: A review on the characteristics and applications of synthetic, polysaccharide-based, semi-synthetic and 'smart' derivatives *European Polymer Journal*, Volume 117, August 2019, pp. 165–178.

8. Sung-Hoon Kang, Sung-Gul Hong, Juhyuk Moon, The effect of superabsorbent polymer on various scale of pore structure in ultra-high performance concrete, *Construction and Building Materials*. Volume 172, 30 May 2018, pp. 29–40.

9. Hong Seong Wong, Concrete with superabsorbent polymer, Eco-Efficient Repair and Rehabilitation of Concrete Infrastructures. *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering*, 2018, pp. 467–499.

10. H.X.D. Lee, H.S. Wong, N.R. Buenfeld Self-sealing of cracks in concrete using superabsorbent polymers, *Cement and Concrete Research*, Volume 79, January 2016, pp. 194–208.

11. Agzamov F.A. Ismagilova E.R. Samozalechivayushchiy tsementy – klyuch k sokhraneniyu germetichnosti krepki skvazhin. Chast' 1 [Self-healing cements are the key of maintaining the tightness of well support. Part 1], *Nanotekhnologii v stroitelstve*. 2019. no. 11(5), pp. 577–586. DOI: 10.15828/2075-8545-2019-11-5-577-586.

12. Vasilyeva N.G. Absorbiruyushchiye zhidkost' polimery [Liquid Absorbing Polymers]. *Vestnik Kazanskogo Tekhnologicheskogo Universiteta*, 2014, no 17(8), pp. 69–71

13. Kilmukhametov M.D., Sadretdinov I.F. Obzor sovremennykh tekhnologiy polucheniya superabsorbiruyushchikh polimerov (SAP) dlya kompleksa akrilovoy kisloty OAO "Gazprom Neftekhim Salavat" [A review of modern technologies for producing superabsorbent polymers (SAP) for the acrylic acid complex of OJSC Gazprom Neftekhim Salavat.]. *Bashkirskiy khimicheskiy zhurnal*, 2014, no 21(2). pp. 5–14.

14. Sukhov A.I. Razrabotka skhemy proizvodstva superabsorbiruyushchikh polimerov na osnove akrilovykh proizvodnykh v vodnoy srede [Development of a scheme for the production of superabsorbent polymers based on acrylic derivatives in the aquatic environment]. *Al'manakh nauchnykh robot molodykh*

uchenykh universiteta ITMO // XLVII Nauchnoy i uchebno-metodicheskoy konferentsii universiteta ITMO po tematike: fotonika. Saint Petersburg, Universitet ITMO, 2018, pp. 44–46.

15. Pertseva O.N., Selezneva A.D., Pulnikova D.A. Proverka nadezhnosti uskorennykh metodov opredeleniya morozostoykosti betona [Checking of the reliability of accelerated methods of determining the frost resistance of concrete]. *Sistemy. metody. Tekhnologii, Bratskiy gosudarstvennyy universitet*. 2018, no. 1 (37), pp. 85–90.

16. Popov D.Y., Lesovik V.S., Metcherine V.S. Vliyaniye superabsorbiruyushchikh polimerov na plasticheskuyu usadku tsementnogo kamnya [The effect of superabsorbent polymers on the plastic shrinkage of cement stone]. *Vestnik Belgorodskogo Gosudarstvennogo Tekhnologicheskogo Universiteta im. V.G. Shukhova*, 2016, no 11, pp. 6–12.

Получено 26.04.2020

K. Sharafutdinov

THE USE OF SUPERABSORBENT POLYMERS IN CONSTRUCTION INDUSTRY

The use of superabsorbent polymers as an additive in concrete is an urgent research topic. Additives can influence the properties of concrete, its shrinkage, strength, durability, frost resistance and other properties, that is why it becomes possible to do a lot of research with these additives. In this article the modern use of superabsorbent polymers in construction and the opportunities for their use in future are described. The achievements of Russian and foreign scientists are examined and the results of their researches are described. The main attention is paid to determining the optimal percentage of the mass of superabsorbent related to the mass of cement in the volume of the concrete mixture. The question is raised about the effect of various dosages of superabsorbent on the properties of the concrete mixture. It is necessary to determine the optimal percentage of superabsorbent particles for each type of additive. The influence of different dosages of the SAP additive will affect to the properties of the concrete mix in different ways. The problem of loss of the concrete strength in the occurrence of macropores after the reaction of superabsorbent with water is discussed. Porosity at the same time depends on the type and dosage of this additive. The possibility of healing of cracks in SAP concrete is considered, as well as the possibility of creating self-healing concrete made with the use of superabsorbent polymers. The mechanisms of the influence of the concentration of superabsorbent on the speed and the quality of crack healing are described, as well as the possibility of using this technology in construction, especially during finishing and repair works. In conclusion, there are considered the prospects for the use of superabsorbent polymers in the construction industry, as well as the possibilities and ways for further research in this area.

Keywords: superabsorbent polymers, SAP, additives, concrete, cement, cracks, strength, porosity.

Шарафутдинов Камил Булатович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Строительные конструкции и вычислительная механика», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: kamil_sh@bk.ru).

Kamil Sharafutdinov (Perm, Russian Federation) – PhD Student, Department of Building Constructions and Computational Mechanics, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: kamil_sh@bk.ru).