

4. Батяновский Э.И., Якимович В.Д., Рябчиков П.В. Особенности технологии высокопрочного бетона на отечественных материалах, включая наноуглеродные добавки. Сборник материалов III международного симпозиума «Проблемы современного бетона и железобетона». – Минск, РУП «БелНИИС». – 2011-С.53-68.(Т.2).

5. Жданок, С.А., Крауклис, А.В., Самцов, П.П., Волжанкин, В.М. Установка для получения углеродных наноматериалов. Патент № 2839.

УДК 693.11

## ОСНОВЫ ОПТИМИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПЕНОБЕТОНА

*МОРДИЧ М. М., БАТЯНОВСКИЙ Э. И.*

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь

**Введение.** Широкое применение в строительном производстве пенобетона – как теплоизоляционного и конструкционно-теплоизоляционного материала, сдерживается во многом из-за значительной усадки и вызываемых ей трещинообразования, а также уменьшения высоты (осадки) с ростом толщины одновременно формируемого слоя из этого материала. Поэтому важнейшим условием повышения качества пенобетона является обеспечение его устойчивости к усадочным явлениям в начальный момент твердения, в сочетании с повышением его физико-технических характеристик. Решить такую задачу позволяет использование современных химических добавок, способных улучшить его качество. В частности, с этой целью оценивали эффективность в пенобетоне разных по природе пенообразователей, ускорителей схватывания и твердения цемента (бетона), а также пластифицирующих добавок, обеспечивающих снижение в материале водо-твердого отношения.

**Методики и результаты исследований.** Для определения оптимального соотношения компонентов на начальной стадии исследования вели с позиции выбора оптимального порообразующего вещества, а именно – пенообразователя. Основываясь на результатах

общеизвестных и признанных исследований [1, 2, 3, 4], для сравнительной оценки выбраны два вида пенообразователей, различающихся происхождением и технологией получения, и обладающими наиболее высокими показателями качества (кратностью и стабильностью пены):

- синтетический – «ПБ-2000», производства РФ;
- белковый (протеиновый) – «Laston», производства Италии.

Эффективность пенообразователя, оценивали по показателям однородности, прочности, средней плотности пенобетона маркой D200–D500, а также по устойчивости отформованного массива пенобетона по отношению к усадке в начальный период его твердения.

Для определения средней плотности и прочности пенобетона использовали стандартные методики испытаний образцов, полученных разрезкой «массива» в виде исходных образцов высотой 1000 мм, сечением 100×100мм. При их изготовлении пенобетонную смесь подавали с высоты 1000 мм за один прием, преследуя цель оценить устойчивость пенобетонной смеси на оседание в процессе укладки и начального твердения.

В технологии приготовления и последующего формирования пенобетона (особенно в условиях строительного объекта) важен способ приготовления пены, т.к. от этого зависит эффективность использования пенообразователя. По ранее анализировавшимся работам [4] в основном применяют два способа приготовления пены и пенобетона. Первый (одностадийный) способ заключается в том, что вначале пена интенсивно взбивается с водой в мешалке, а затем в нее добавляют остальные компоненты смеси (цемент, наполнители и др.). То есть, в этом случае не применяют пеногенераторы. Второй способ (двухстадийный) предусматривает приготовление цементного теста или растворной смеси с последующим добавлением в смесь пены, отдельно приготовленной пеногенерирующей установкой.

Были проверены оба эти способа с целью выбора рационального для дальнейших исследований. В обоих случаях готовили рабочий раствор пенообразователя белкового и синтетического в соотношении: ПО/Вода = 1/27, которое является оптимальным по данным производителей применённых пенообразователей.

При одностадийном варианте получения пены и пенобетона подготовка (фактически – взбивание) и синтетической, и белковой пены вели в течение 60–120 секунд при последующем определении кратности пены и ее стойкости. При оценке синтетического пенообразователя («ПБ-2000») кратность пены составила - 12, а ее стойкость 360 сек.; при этом водоотделение пены составило 9,2 %. Увеличение времени обработки (взбивания) до 120 сек. оказалось неэффективным – кратность пены не увеличилась, но при этом в два раза снизилась ее стойкость – до 180 сек.

Белковый пенообразователь («Laston»), при обработке в течение 60 сек. дал пену с кратностью – 3. Увеличение времени обработки до 5 минут увеличило кратность пены до – 5, что в пересчете на среднюю плотность пены составило 200 кг/м<sup>3</sup>. Пена такого качества не обеспечит получение пенобетона со средней плотностью по марке менее D600. Тем не менее, этот вид пенообразователя на данном этапе не исключили из дальнейших исследований.

Приготовление пены для двухстадийной технологии пенобетона вели с применением специально изготовленного пеногенератора барбатажного типа, при давлении воздуха в клапане пеногенератора ~ 0,5–0,6 МПа. Результаты экспериментов по генерированию пены с применением оцениваемых пенообразователей показали, что на синтетическом пенообразователе ПБ-2000 пены характеризуются кратностью (15–19), при значении стойкости не менее 360 сек. Пены на основе белкового пенообразователя имели кратность немного ниже (12–15), при этом их стойкость составила 450 сек.

Исходя из полученных экспериментальных данных о стабильности качественных показателей пены (кратность, стойкость) одностадийный способ приготовления ее и пенобетонных смесей признан не рациональным; дальнейшие исследования вели с применением двухстадийной технологии приготовления пенобетона.

Для оценки эффективности сравниваемых пенообразователей непосредственно в пенобетоне были подобраны составы для различных марок по средней плотности, которые приведены. Образцы пенобетона твердели в одинаковых (нормально-влажных) условиях (кратность пены – 12, время перемешивания растворной части – 3 минуты, время перемешивания пенобетонной смеси – 0,5 минуты).

После твердения 3 суток образцы распалубливали и снова помещали в нормально-влажностные условия до возраста 28 суток; после этого они были разрезаны (по высоте) на стандартные кубы, с размером ребра 100 мм. Кроме определения прочности на сжатие и средней плотности бетона была проверена однородность данных показателей для образцов-кубов, из разных частей по высоте в 1000 мм исходного образца. Определяли среднеквадратическое отклонение  $S$  и коэффициент вариации  $v$ , как для отдельной “конструкции”.

В результате исследований установили, что из двух оцениваемых пенообразователей обеспечить получение пенобетона марки по средней плотности D200, D300 может только протеиновый «Laston». С его использованием прочность на сжатие (при примерно равных средних плотностях пенобетона для марок D400–D600) на 19–27% выше, чем у образцов на основе синтетического. Как отражение этого значения коэффициента вариации (изменчивости) свойств пенобетона  $v$  по прочности на сжатие и средней плотности, у образцов на основе белкового пенообразователя многократно ниже, чем для образцов на синтетическом «ПБ-2000». На этом основании для дальнейших исследований использовали белковый (протеиновый) пенообразователь «Laston». Следует отметить, что среднее значение плотностей пенобетона в высушенном состоянии вполне удовлетворительно совпадает с их расчетными значениями для образцов на пенообразователе «Laston». Диапазон отклонений, выраженный в процентах, составил для марки D200:  $[(208-200):200] \times 100 = 4\%$ , и для марки D600:  $[(502-500):500] \times 100 = 0,4\%$ , что свидетельствует о высокой степени достоверности применяемой методики расчета состава пенобетона. С другой стороны, это подтверждает качество пенообразователя «Laston» и соответствие примененной технологии приготовления пенобетона решаемым в исследованиях задачам, включая возможность разовой укладки слоя пенобетонной смеси высотой до 1000 мм.

**Эффективность ускорителей схватывания м твердения.** Незбежное замедление процессов гидратации, схватывания и начальной фазы структурообразования цементного теста в пенобетоне из-за «тормозящего» действия ПАВ пенообразователя может быть преодолено введением в состав пенобетона ускорителей твердения.

Среди химических добавок, ускоряющих твердение, а также «уплотняющих» структуру цементного бетона наиболее широко применяют, сульфат алюминия, сульфат натрия; хлористый кальций. Применение этих добавок характеризуется стабильностью эффекта, что обусловило широкое их использование в строительной практике [5] и в наших экспериментах. При их выполнении ускорители твердения растворяли в воде, затем вводили цемент; концентрацию добавки подбирали из расчета дозировки в 1 – 3% от массы цемента.

Влияние вида и количества вводимой в смесь добавки на свойства пенобетонной смеси и затвердевшего пенобетона оценивали по двум показателям:

- устойчивости к осадке по высоте массива из укладываемой за один прием пенобетонной смеси при твердении в течении 24 часов;
- изменения прочности на сжатие в возрасте 3, 7 и 28 суток.

На исходных образцах высотой 1000 мм и сечением 100×100 мм оценивали фактические изменения высоты «массива» в возрасте 24 часов. Для оценки изменений прочности использовали стандартные образцы (по 6 штук) размерами 100×100×100 мм, отобранные из средней части по высоте исходных образцов, изготовленных по составам, приведенным в таблице табл. 1 с применением двухстадийной технологии приготовления пенобетонной смеси и хранившихся до испытаний в камере нормально-влажностного твердения.

После выдерживания в течении 1 суток в нормально-влажностных условиях, замеряли фактическое изменение высоты исходного образца относительно первоначальных размеров (т. е. верха формы). Такой способ измерения не является стандартным, однако он фактически имитирует осадку пенобетона в массивных конструкциях с позиций оценки его стабильности, т. е. способности сохранять первоначальную высоту уложенного за один прием слоя пенобетонной смеси. Результаты испытаний приведены в виде гистограммы рис 1.

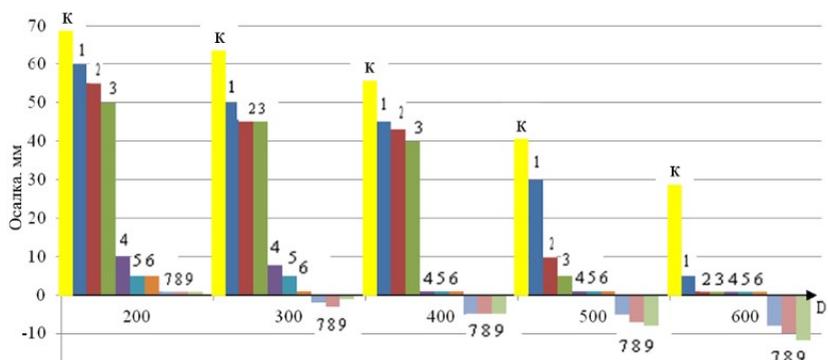


Рис. 1. Зависимость величины осадки пенобетона от вида и расхода добавки ускорителя твердения в % от массы цемента (МЦ) для различных марок по средней плотности ( $D$ ). 1 – 1,0%  $Na_2SO_4$ ; 2 – 2,0%  $Na_2SO_4$ ; 3 – 3,0%  $Na_2SO_4$ ; 4 – 1,0%  $CaCl_2$ ; 5 – 2,0%  $CaCl_2$ ; 6 – 3,0%  $CaCl_2$ ; 7 – 1,0%  $Al_2(SO_4)_3$ ; 8 – 1,0%  $Al_2(SO_4)_3$ ; 9 – 1,0%  $Al_2(SO_4)_3$ ; к – контрольный состав без добавок.

Очевидно, что наибольшую эффективность, с позиций снижения осадки в первые сутки твердения, показали образцы, содержащие  $Al_2(SO_4)_3$ . Более того, в них наблюдали незначительное увеличение высоты слоя пенобетона: большее с увеличением расхода добавки, особенно для образцов большой ( $D500 \times D600$ ) средней плотности. Причина этого явления, на наш взгляд, заключается в развитии реакций вещества  $Al_2(SO_4)_3$  с гипсовой составляющей цемента в водной среде с образованием крупных кристаллогидратов этрингита. Их объем превышает объем исходных веществ, что способствует расширению и увеличению объема твердеющего цементного камня, уплотнению и ускорению формирования его структуры.

Изложенное подтверждают результаты оценки изменений температуры (термопары помещали на глубину 300 мм в отформованную смесь) пенобетона в начальный (в течении первых 24 часов) период твердения. В образцах с применением  $Na_2SO_4$  наблюдали рост температуры на 2–3°C (относительно бетона контрольных образцов); для добавки  $CaCl_2$  рост температуры был более высок и составил 4–5 °C; в случаях применения  $Al_2(SO_4)_3$  ~ 7 °C, отражая нарастающую активацию процесса гидратации цемента.

Из результатов эксперимента с добавками  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  и  $\text{CaCl}_2$  следует, что из них большее влияние на величину осадки проявляла добавка  $\text{CaCl}_2$ . Эффект по данному показателю от  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  оказался незначительным.

Для оценки изменений прочности из образцов затвердевшего пенобетона были изготовлены (нарезаны) образцы кубы (по 6 штук) и испытаны на сжатие в возрасте 3,7 и 28 суток нормально-влажностного твердения. Из результатов исследований добавок, ускоряющих твердение установлено, что все они способствуют росту прочности пенобетона, как в раннем возрасте (3,7 суток), так и в проектном возрасте (28 суток). При этом примерно равной эффективностью характеризуются добавки  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  и  $\text{CaCl}_2$  и меньшей –  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Анализ экспериментальных данных, относящихся к влиянию на прочность пенобетона дозировки оцениваемых добавок, показывает, что добавка  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  более эффективна в повышенной 3%-ой дозировке от МЦ; эффективность добавки  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  и  $\text{CaCl}_2$  не увеличивается с повышением их дозировки более 1% от МЦ. В целом по результатам этих исследований можно сделать вывод, что индивидуальное использование ряда традиционных добавок способствует повышению темпа роста пластической прочности и схватывания пенобетонной смеси, ускоряет твердение пенобетона и способно снизить его осадку при твердении.

**Апробация пластифицирующих добавок.** Помимо исследований по выявлению оптимального типа пенообразователя и ускоряющих твердение добавок в пенобетоне проведено исследование влияния пластифицирующих добавок на свойства пенобетона. Целью введения пластифицирующих добавок в пенобетон является снижение его водотвердого отношения и ожидаемое повышение прочности. Для оценки их влияния на устойчивость пенобетонной смеси изготавливали (в разборных формах) образцы размерами  $100 \times 100 \times 1000$  мм с формованием за один прием слоем в 1000 мм. В исследованиях использовался пенобетон составов по табл. 1. Отличие состояло в дозировке воды для составов с пластификаторами. При этом ориентировались на консистенцию пенобетонной смеси, которая рекомендована в, как оптимальная подвижность для разных марок пенобетона по средней плотности.

Для достижения требуемой консистенции по диаметру расплыва в составах с пластификаторами уменьшили содержание воды затворения при их оптимальном расходе, рекомендованном производителем пластификатора. В исследованиях оценивали эффективность двух видов пластификаторов, имеющих разные основы:

- суперпластификатор «Стахемент-2010» (на поликарбоксилатных смолах) в дозировке 0,2% от массы цемента;
- суперпластификатора «С-3» (на нафталинформольдегидных смолах) – в дозировке 2,0% от массы цемента.

В итоге, при приготовлении пенобетонных смесей была обеспечена равная подвижность всех составов «по Суттарду» с уменьшением В/Т отношения на 16–25% (как для добавки «С-3», так и для «Стахемент-2010»), по сравнению с контрольным составом (без пластифицирующих добавок).

Анализируя полученные результаты можно сделать вывод, что введение пластифицирующих добавок в пенобетонную смесь низких (D200 и D300) марок по средней плотности приводит к повышенной их осадке. Если же снижать далее водотвердое отношение за счет пластификатора и уменьшать подвижность смеси (распływ «по Суттарду»), то это вызовет рост средней плотности и не обеспечит соответствие требуемой марке пенобетона по этому показателю.

С увеличением средней плотности пенобетона до марки D500 пластификатор «Стахемент-2010» обеспечил незначительное увеличение прочности на сжатие на 0,5–4,9%; в образцах пенобетона с суперпластификатором «С-3» роста прочности (на сжатие) не наблюдалось.

Результаты эксперимента показали, что с позиций повышения качественных характеристик пенобетона применение пластифицирующих добавок не целесообразно. На наш взгляд, причина их неэффективности заключается в том, что вещество этих добавок, по существу, является поверхностно-активным и, при введении в состав, его действие дополняет действие ПАВ пенообразующего компонента. Их совместное действие на систему «цемент-вода» приводит к резкому торможению процесса гидратации вяжущего и понижению темпа роста пластической прочности цементного теста на начальном этапе структурообразования перегородок между воздушными ячейками, а затем при формировании кристаллогидратной структуры твердеющего цементного камня. Этот отрицательный

эффект, как показали результаты данного эксперимента, не «перекрывает» планировавшийся положительный эффект в пенобетоне от снижения его водотвердого отношения.

**Заключение.** На основании результатов проведенных экспериментальных исследований, можно сделать следующие выводы.

Из приведенных веществ-пенообразователей создание однородной ячеистой структуры пенобетона обеспечил пенообразователь белкового происхождения, позволяющий получать пену наибольшей стойкостью к «осадке» и, тем самым, обеспечивал однородность пенобетона по высоте слоя.

Выявлена эффективность в пенобетоне неорганических добавок  $Al_2SO_4$  и  $CaCl_2$  и их оптимальные дозировка, позволяющие минимизировать усадку и повысить прочность пенобетона как в раннем (до 7 суток), так и в проектном (28 суток) возрасте.

Установлена незначительная эффективность использования пластифицирующих добавок в пенобетоне низких марок по средней плотности (D200–D300), выразившаяся в росте до 5% его прочности на сжатие; В пенобетоне более высоких марок (D400–D500) этого эффекта не обнаружено.

Определено, что совокупностью эффективного пенообразователя и ускоряющих схватывание и твердение цемента добавок обеспечивается получение пенобетона марок D200-D500 с пониженной (компенсированной) усадкой, что позволяет вести работы по его укладке в построечных условиях и при изготовлении сборных изделий высотой более 1 м единовременного формируемых слоев.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихомиров, В.Н. Пены. Теория и практика их получения и разрушения / В.Н. Тихомиров. – М.: Химия, 1983. – 264с.
2. Ребиндер, П.А. Физико-химия моющего действия / П.А. Ребиндер. – М.: Пищепромиздат, 1935. – 230 с.
3. Кругляков, П.М. Пена и пенные пленки / П.М. Кругляков, Д.Р. Ексерова // М.: Химия, 1990. – 630с.
4. Киселев, Д.П. Поризованные легкие бетоны / Д.П.Киселев, А.А. Кудрявцев // Стройиздат: Москва – 1966г, 81 с
5. СТБ 1112-98. Добавки для бетонов. Общие технические условия. – Введ. 01.01.1999. – Мн: Минстройархитектуры Республики Беларусь, 1998. – 23 с.