

ния на опытном участке. Однако чтобы транспортным компаниям избежать материальных убытков в период сезонного ограничения движения предлагается несколько вариантов планирования перевозок:

- заранее планировать грузовые перевозки, например, увеличивая их объемы до и после вводимых мероприятий, а в период ограничения движения исключать полностью;
- осуществлять перевозки автомобилями меньшей грузоподъемностью, допускаемой вводимыми мероприятиями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ОДН 218.1.052-2002 – Оценка прочности жестких дорожных одежд (взамен ВСН 52-89) / Министерства транспорта РФ. Госслужба дорожного хозяйства – М.: Транспорт, 2003.

2. Исследование несущей способности земляного полотна в условиях изменения температурно-влажностного режима. Диплом. работа / Моисеева О.Л., Турлянцева Э.Е. / АлтГТУ, г. Барнаул, 2012.

3. Исследование пучинистых свойств грунтов и разработка мероприятий по усилению эксплуатируемого земляного полотна, деформированного в результате действия сил морозного пучения, на автодорогах Алтайского края. Диплом. работа / Бодосова Т.С., Лыкова М.И. / АлтГТУ, г. Барнаул, 2008.

Черепанов Б.М. – к.т.н., доцент, E-mail: bmcher@mail.ru; **Моисеева О.Л.** – магистрант, E-mail: olmoisey@gmail.com; **Таныгина Э.Е.** – магистрант, E-mail: ellitoz@gmail.com, Алтайский государственный технический университет.

УДК 666.973

ОСОБЕННОСТИ СВОЙСТВ НЕАВТОКЛАВНОГО ЗОЛОСОДЕРЖАЩЕГО ГАЗОБЕТОНА С ХИМИЧЕСКИМИ ДОБАВКАМИ

Ю.В. Щукина, М.Н. Баев

В статье изложены результаты исследования свойств неавтоклавногазобетона на основе высококальциевых зол ТЭЦ, полученных от сжигания Канско-Ачинских бурых углей и химических добавок. Рассмотрены особенности фазообразования в цементно-зольных системах с хлоридом и сульфатом натрия и его влияния на свойства материала.

Ключевые слова: золо-цементный неавтоклавный ячеистый бетон, фазовый состав, свойства.

ВВЕДЕНИЕ

Производство неавтоклавногазобетона, в том числе малыми предприятиями, – наиболее динамично развивающаяся сегодня отрасль стеновых материалов. Однако специфика технологии неавтоклавногазобетона требует применения молотого песка. Это часто не по силам малым предприятиям.

Для решения данной проблемы наиболее актуальны разработки новых технологических приемов использования в производстве неавтоклавногазобетона минеральных промышленных отходов. Так в качестве дополнительного сырьевого компонента может быть использована высококальциевая зола ТЭЦ. Однако все предыдущие решения по разработке технологий неавтоклавногазобетона на основе высококальциевых зол ТЭЦ от сжигания Канско-Ачинских углей были

направлены на максимальное их введение в сырьевые смеси. Это приводило к неоправданно сложным и энергоемким решениям (постоянное изменение дозировок и технологических режимов в соответствии с колебаниями свойств зол, обязательное пропаривание, и в некоторых решениях помол компонентов или сушка изделий).

Все это не позволило широко внедрить предложенные технологии, особенно в условиях малых производств.

В связи с этим становится актуальной задачей разработка технологии неавтоклавногазобетона на основе высококальциевых зол ТЭЦ, которая обеспечит получение материала со стабильно высокими строительно-техническими свойствами по технологии, не требующей пропаривания, помола и других, сложных для малых производств переделов.

СЫРЬЕВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для решения поставленных задач в исследованиях применялась высококальциевая зола ТЭЦ-3 г. Барнаула, полученная при сжигании бурых углей КАБ в парогенераторах с жидким шлакоудалением.

Зола отбиралась с электрофильтров в разное время с 2003 по 2008 годы. Эти золы представляют собой обожженную минеральную часть бурых углей Назаровского и Ирша-Бородинского разрезов Канско-Ачинского бассейна.

Полученные в ходе исследования характеристики проб зол свидетельствуют о колебаниях их свойств в широком диапазоне. Так очевидны колебания по срокам схватывания зол: начало схватывания изменяется в пределах от 5 до 50 минут и конец от 20 минут до 3 часов 20 минут. Содержание свободного открытого СаО находится в пределах от 1,79 до 6,63%; суммарной свободной извести – от 2,94 до 7,46%. Содержание свободного MgO от 0 до 4,5%. Температурный эффект ранней гидратации золы – критерий ΔT , изменяется от 2 до 7°C, при этом время достижения максимальной температуры колеблется от 20 минут до 1,5 часов.

Также в качестве вяжущего использовали портландцемент М400 Д20 Искитимского, Голухинского и Топкинского цементных заводов. В качестве мелкого заполнителя для производства неавтоклавного цементно-песчаного газобетона (без помола кремнеземистого компонента) использовался речной песок с поймы реки Обь с $M_{кр} = 1,2$; содержанием илистых, глинистых и пылеватых частиц 5-6%.

Определение фазового состава золы, материалов на ее основе выполняли рентгенофазовым и дифференциально-термическим методами анализа.

Дифференциально-термический анализ выполнялся на дериватографе фирмы «Paulik-Paulik-Erdey» в неокислительной среде, которая создавалась закрытым тиглем. Параметры съемки: верхний температурный предел – 1000°C, скорость нагрева – 10 град/мин.

Идентификацию фаз осуществляли по общепринятым методикам с использованием отечественной литературы и зарубежной информационной базой Mineral Data.

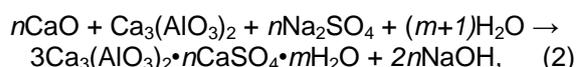
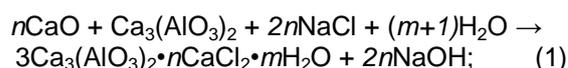
Статистическую обработку экспериментальных данных проводили на компьютере с помощью программы «STATISTICA» в составе пакета прикладных программ Math Cad.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Газобетон на основе золо-цементной композиции менее чувствителен к значительным колебаниям состава и свойств золы, как вследствие разбавления, так и сдерживания деструктивных явлений прочным цементным камнем (межпоровая перегородка), а также пористой структурой материала.

Для ослабления возможных деструктивных явлений, а также для ускорения темпов набора прочности и интенсификации процессов газовой выделения необходимо применять такие добавки, которые способны вступать в реакции обмена и присоединения с составляющими золо-цементной композиции с образованием щелочи NaOH и структурно активных AF_t и AF_m фаз.

Наиболее распространенные и доступные добавки такого типа – это хлорид и сульфат натрия. Возможный механизм действия этих добавок может быть представлен следующим образом: для них характерно то, что при взаимодействии с известью золы в присутствии алюминийсодержащих фаз портландцементного клинкера и высококальциевой золы должна происходить обменная реакция с образованием гидросульфогидрохлоралюминатов кальция в виде AF_t и AF_m фаз



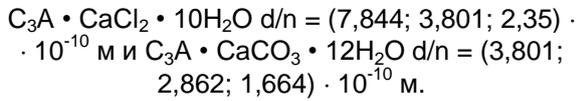
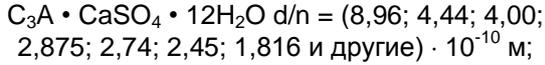
где $n = 1$ или 3 ; $m = 10-12$ или $30-32$.

При этом будет ускоряться гидратация $CaO_{своб}$ золы, и высвобождаться в поровый раствор щелочь NaOH. Ускорение гидратации $CaO_{своб}$ должно приводить к ослаблению деструктивных процессов в камне. Наличие в поровом растворе щелочи, образующейся через обменную реакцию с лимитируемой скоростью, должно позволять регулировать процессы газовой выделения и вспучивания массива. Образование дополнительного количества AF_t и AF_m фаз должно увеличивать структурную прочность массива и раннюю прочность газобетона.

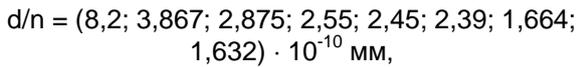
Так при добавлении в золо-цементные системы хлорида натрия ускоряется гидратация свободного оксида кальция, исходных клинкерных минералов цемента и высококальциевой золы, по сравнению с исходной

золо-цементной системой, увеличивается доля AF_m - фаз по сравнению с эттрингитоподобными AF_t – фазами (рисунок 1).

При этом AF_m – фазы включают



Также в такой системе фиксируется увеличенное количество гидрокальюмита



являющегося членом серии твердых растворов между $C_3A \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ и C_4AH_{13-19} .

В золо-цементных композициях с добавкой Na_2SO_4 образуется значительное количество эттрингита, гидросиликатов кальция типа CSH (I и II) и кальцита. В такой системе отмечаются противоположные явления, заключающиеся в замедлении гидратации $CaO_{\text{своб}}$ золы за счет образования коллоидного эттрингита с одной стороны, и более интенсивное связывание портландита, образовавшегося при гидролизе силикатов кальция – с другой (рисунок 1).

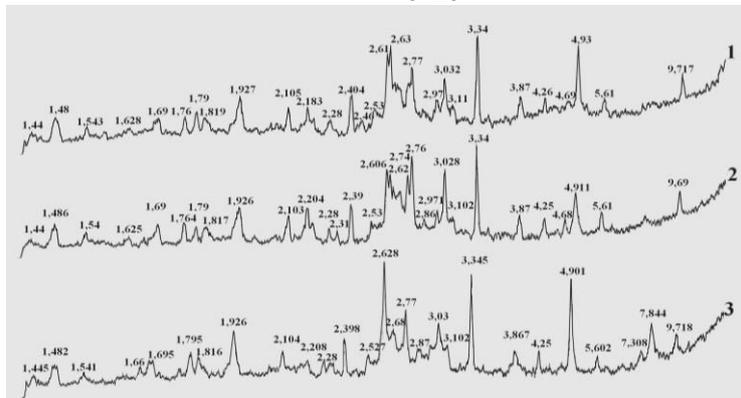
По результатам ДТА, здесь наблюдается ступенчатая дегидратация портландита при 439,8 и 458,1°C, при этом она характеризуется меньшей потерей массы (1,74%), чем в зо-

ло-цементном бездобавочном составе (2,04%).

Двойной эндоэффект при 824.5 и 848,6°C связан со значительной потерей масс-сы (при 820°C) определенной при DTG анализе (4,03%), которая выше на 42,4%, чем у золо-цементного бездобавочного состава, на 84,4% – чем у цемента и на 48,6% – чем у золы (таблица 1). Этот эффект связан с разложением карбоната кальция.

Об увеличении степени связывания воды в золо-цементном вяжущем с добавкой сульфата натрия свидетельствует как общая потеря массы при DTG анализе (2258 % через 3 месяца), так и общее значительное увеличение интенсивности и рельефности широкой полосы поглощения 3200-3600 cm^{-1} , определенной при ИК-спектроскопии. В более поздние сроки (9 мес., 1 год) количество свободной извести золы в системе с сульфатом натрия неуклонно уменьшается и достигает величины, характерной для бездобавочной золо-цементной композиции.

Далее в работе было определено оптимальное водотвердое отношение, которое для золо-цементных составов было ниже на 5-10% по сравнению с цементно-песчаным газобетоном. Использование высококальциевой золы вместо песка позволяет увеличить высоту вспучивания массива на 11%, а применение химических добавок – дополнительно ещё от 3 до 10% за счет интенсификации процессов газовойделения в результате постепенного образования NaOH в обменных реакциях (1, 2), что позволяет регулировать процессы газовойделения и вспучивания массива.



1 – золо-цементный камень; 2 – золо-цементный камень с сульфатом натрия; 3 – золо-цементный камень с хлоридом натрия

Рисунок 1 – Рентгенограммы золо-цементного камня с химическими добавками, гидратированного в течение 3 месяцев нормального твердения

ОСОБЕННОСТИ СВОЙСТВ НЕАВТОКЛАВНОГО ЗОЛОСОДЕРЖАЩЕГО ГАЗОБЕТОНА С ХИМИЧЕСКИМИ ДОБАВКАМИ

Таблица 1 – Установленные гидратные фазы в разных композициях

Система	Гидратные фазы	Потеря массы, %	
		3 суток	3 месяца
1	2	3	4
ПЦ	Ca(OH) ₂	2,0	2,25
	CaCO ₃	0,6	0,53
	AF _t +CSH	5,34	6,79
	CSH (II)	1,2	0,87
БУЗ	Ca(OH) ₂	1,53	1,85
	CaCO ₃	2,07	2,06
	AF _m	-	2,3
	AF _t +CSH	4,04	3,64
	CSH (II)	1,83	1,36
ПЦ+БУЗ	Ca(OH) ₂	2,04	2,33
	CaCO ₃	1,75	1,75
	AF _t +CSH	3,15	7,5
	CSH (II)	1,83	2,05
ПЦ+БУЗ+Na ₂ SO ₄	Ca(OH) ₂	1,74	1,98
	CaCO ₃	4,3	4,02
	AF _t +CSH	4,34	7,28
	CSH (II)	2,46	2,16
ПЦ+БУЗ+NaCl	Ca(OH) ₂	2,18	3,16
	CaCO ₃	1,77	2,66
	C ₄ AH ₁₃	1,34	2,16
	AF _t +CSH	4,05	5,66
	AF _m	2,58	5,33
	CSH (II)	3,79	5,66

Кроме этого, применение добавок позволяет сократить сроки схватывания массива за счет дополнительного интенсивного синтеза AF_t и AF_m – фаз, связывающих повышенное количество воды. Эти фазы обладают высокой скоростью роста и обеспечивают ускоренный набор структурной прочности бетона. Таким образом, применение высококальциевых зол и химических добавок позволяет регулировать свойства газобетона, как на стадии созревания массива, так и при

формировании ранней прочности.

Далее в ходе эксперимента было установлено, что марочная прочность всех золоцементных бездобавочных составов выше на 30-60% по сравнению с цементно-песчаным газобетоном. Добавки хлорида и сульфата натрия значительно увеличивают как раннюю (от 5 до 155%), так и позднюю прочность (от 10 до 30%) – рисунки 2, 3.

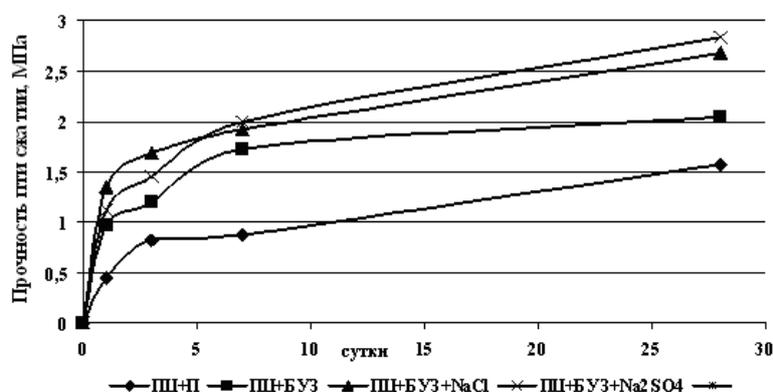


Рисунок 2 – Кинетика набора прочности при сжатии газобетона плотностью D600 от состава сырьевой смеси

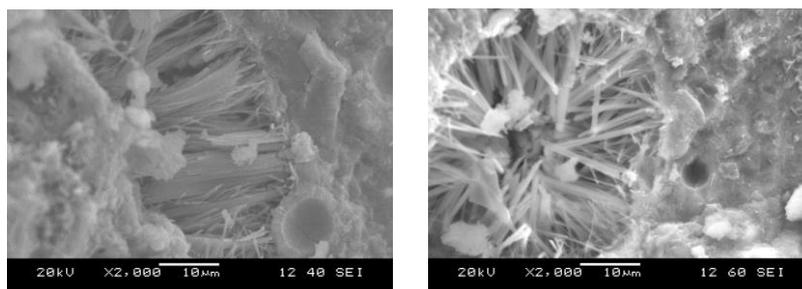


Рисунок 3 – Микрофотография фрагмента цементно-зольного камня с добавкой сульфата натрия в возрасте 3 месяца

В связи с тем, что зола ТЭЦ имеет состав и свойства, колеблющиеся в довольно широких пределах, необходимо было статистически проверить работоспособность оптимальных составов для неавтоклавного газобетона, а также разработать методы, которые позволят прогнозировать его свойства и при необходимости изменять дозировки компонентов. С этой целью на 15 пробах бурого угольных зол ТЭЦ-3 г. Барнаула были изготовлены блоки из газобетона, которые твердели при нормальных условиях (1, 3, 7 и 28 суток).

В результате проведенного эксперимента были установлены статистические изменения основных характеристик газобетона, таких как: средняя плотность готового газобетона, прочность при сжатии и изгибе, пористость, усадка, теплопроводность и морозостойкость.

Одним из основных свойств ячеистого бетона является средняя плотность (ρ). Эта характеристика предопределяет то или иное его свойство материала. Установлено, что на плотность материала в наибольшей степени оказывают влияние следующие характеристики золы: свободный открытый оксид кальция ($\text{CaO}_{\text{отк}}$), время достижения максимальной температуры ранней гидратации золы (τ) и её температурный эффект (ΔT), сроки схватывания зольного теста нормальной густоты (Нач. сх).

Все стеновые материалы, используемые для возведения стен зданий и сооружений, должны подвергаться испытанию на теплопроводность, которая для сухих газобетонов колеблется от 0,16 до 0,38 Вт/(м \cdot °C) и находится в линейной зависимости от их средней плотности.

Результаты эксперимента показали, что теплопроводность неавтоклавного цементно-зольного газобетона колеблется в пределах 0,13-0,16 Вт/(м \cdot °C) в зависимости от пробы золы ТЭЦ и средней плотности бетона.

Однако определение этих коэффициентов длительное и требует специальной дорогостоящей аппаратуры. Поэтому предлагается один из способов оценки и прогнозирования теплопроводности. Для этой цели нами были построены зависимости между коэффициентом теплопроводности и характеристиками зол ТЭЦ, которые описываются регрессионным уравнением:

- коэффициент теплопроводности от оксида кальция свободного суммарного и насыпной плотности ($R = 0,95$)

$$\lambda = -2,81 + 0,005 \cdot \rho_{\text{нас}} + 0,05 \cdot \text{CaO}_{\text{св}}^{\text{сум}} - (0,21 \cdot 10^{-5}) \cdot \rho_{\text{нас}}^2 - (0,19 \cdot 10^{-4}) \cdot \rho_{\text{нас}} \cdot \text{CaO}_{\text{св}}^{\text{сум}} - 0,003 \cdot (\text{CaO}_{\text{св}}^{\text{сум}})^2. \quad (3)$$

Основными технологическими параметрами, определяющими прочность при сжатии и изгибе газобетона, являются активность золы (содержание в золе свободного оксида кальция, критерий ΔT), В/Т сырьевой смеси, а также сроки схватывания и ППП золы.

В результате статистического анализа установлена степень влияния независимых переменных (свойства зол ТЭЦ) на прочность при сжатии и изгибе.

При этом можно отметить то, что практически у всех установленных зависимостей она, как правило, не постоянна и изменяется во времени твердения газобетона.

Установлены следующие основные корреляционные зависимости:

- прочности при сжатии (28 суток нормального твердения) от теста нормальной густоты и содержания оксида кальция свободного суммарного ($R = 0,84$)

$$R_{\text{сж}} = -8,65 + 0,89 \cdot \text{CaO}_{\text{св}}^{\text{сум}} + 0,68 \cdot \text{ТНГ} - 0,026 \cdot (\text{CaO}_{\text{св}}^{\text{сум}})^2 - 0,017 \cdot \text{CaO}_{\text{св}}^{\text{сум}} \cdot \text{ТНГ} - 0,012 \cdot \text{ТНГ}^2; \quad (4)$$

- прочность при изгибе (28 суток нормального твердения) от площади удельной

ОСОБЕННОСТИ СВОЙСТВ НЕАВТОКЛАВНОГО ЗОЛОСОДЕРЖАЩЕГО ГАЗОБЕТОНА С ХИМИЧЕСКИМИ ДОБАВКАМИ

поверхности и потерь при прокаливании золы ($R = 0,73$)

$$\begin{aligned} R_{изг} = & -3,28 + 0,0027 \cdot \text{ППП} - 0,28 \cdot \\ & \cdot \text{Суд} - (0,53 \cdot 10^{-6}) \cdot \text{ППП}^2 - (-0,95 \cdot 10^{-4}) \cdot \\ & \cdot \text{ППП} \cdot \text{Суд} - 0,0024 \cdot \text{Суд}^2. \end{aligned} \quad (5)$$

Одним из показателей долговечности является морозостойкость бетона. Поэтому все сравниваемые газобетоны были подвергнуты попеременному замораживанию и оттаиванию в течение 35 циклов.

В результате проведенного эксперимента установлено, что потеря массы и прочности, как у контрольных (ПЦ+П, классический автоклавный газобетон), так и у золоцементных ячеистых бетонов не превышают допустимые значения. Причем, у составов золоцементного газобетона с химическими добавками произошло увеличение прочности на 1,8-17,3% по сравнению с исходными составами.

Для оценки экономической эффективности производства неавтоклавного газобетона были проведены сравнительные расчеты себестоимости 1 м^3 золоцементного материала с химическими добавками и цементно-песчаного газобетона. При этом плотность газобетона и расход составляющих компонентов брали с учетом обеспечения минимального класса по прочности при сжатии В1,5 (2,5 МПа).

Так для обеспечения минимальной прочности цементно-песчаного газобетона необходимо использовать материал плотностью 850 кг/м^3 , а для золоцементного достаточно плотности – D 600. Удельный экономический эффект составил 204,2 руб. (17%).

Определенный интерес представляет сравнение стоимости 1 м^2 стены с коэффициентом термического сопротивления 3,2 (необходимого для Сибирского региона) из газобетонов указанных составов.

Так, толщина стены для золоцементного газобетона составляет 0,512 м ($\rho = 600 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 0,16 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$), а для цементно-песчаного – 0,736 м ($\rho = 850 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 0,23 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$). Удельный экономический эффект в этом случае составляет 548,5 руб. за 1 м^2

стены (37%).

Таким образом, расчет удельной экономической эффективности показал преимущества применения разработанного золоцементного газобетона с химическими добавками по сравнению с классическим цементно-песчаным ячеистым материалом.

ВЫВОДЫ

1. Связывание свободной извести золы в обменных реакциях с химическими добавками, ускорение гидратации, особенности фазообразования, а также наличие цемента, обеспечивает стабилизацию свойств золосодержащего газобетона с высокими строительно-техническими характеристиками.

2. При средней плотности $500-700 \text{ кг/м}^3$ неавтоклавный цементно-золевый газобетон с химическими добавками имеет класс прочности не ниже В1,5, коэффициент теплопроводности 0,13-0,16 Вт/м·°C, проявляет безусадочность (+1 мм/м), обладает морозостойкостью не менее 35 циклов.

Для его производства не требуется пропаривать изделия или осуществлять помол исходных компонентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Овчаренко Г.И. Влияние высококальциевых зол и химических добавок на свойства неавтоклавного газобетона / Г.И. Овчаренко, Ю.В. Щукина // Технология бетона. – 2007. – № 1. – С. 66-67.
2. Овчаренко Г.И. Газобетоны на основе высококальциевых зол ТЭЦ / Г.И. Овчаренко, Ю.В. Щукина, К.П. Черных; Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2009. – 233 с.
3. Пат. 2259975 Российская Федерация, МПК7 С 04 В 38/00. Сырьевая смесь для получения неавтоклавного ячеистого бетона (варианты) / Г.И. Овчаренко, Ю.В. Щукина, В.Б. Францен; заявитель и патентообладатель Алт. гос. техн. ун-т. – Опубл. 09.01.2004; Бюл. № 10.

Щукина Ю.В. – к.т.н., доцент, E-mail: yuliaschukina@mail.ru; **Баев М.Н.** – соискатель, E-mail: mbaev@mail.ru, Алтайский государственный технический университет.