

**Александр Анатольевич
МЕЧАЙ,**
кандидат технических наук,
заведующий кафедрой химической
технологии вяжущих материалов
Белорусского государственного
технологического университета

Марина Витальевна НОВИК,
аспирант кафедры химической
технологии вяжущих материалов
Белорусского государственного
технологического университета

**Екатерина Ивановна
БАРАНОВСКАЯ,**
аспирант кафедры химической
технологии вяжущих материалов
Белорусского государственного
технологического университета

Андрей Андреевич САКОВИЧ,
кандидат технических наук,
доцент кафедры химической
технологии вяжущих материалов
Белорусского государственного
технологического университета

**Александр Федорович
МИНАКОВСКИЙ,**
кандидат технических наук,
доцент кафедры безопасности
жизнедеятельности
Белорусского государственного
технологического университета

ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ФОСФОГИПСА НА ВЫСОКООБЖИГОВЫЕ ГИПСОВЫЕ ВЯЖУЩИЕ И СУЛЬФОАЛЮМИНАТНЫЙ МОДИФИКАТОР ДЛЯ РАСТВОРОВ И БЕТОНОВ

TECHNOLOGIES FOR PROCESSING PHOSPHOGYPSUM INTO HARD-BURNT GYPSUM BINDERS AND SULFOALUMINATE MODIFYING AGENT FOR MORTARS AND CONCRETE

В статье приведены результаты исследований по крупнотоннажной и экологически безопасной переработке фосфогипса ОАО "Гомельский химический завод" на высокообжиговые гипсовые вяжущие (эстрих-гипс, ангидритовый цемент), а также на сульфоалюминатный модификатор для получения безусадочных растворов, цементных бетонов и повышения прочности автоклавных ячеистых бетонов.

This paper presents the research results of large-scale and ecologically safe processing of phosphogypsum OAO "Gomel Chemical Factory" into hard-burnt gypsum binders (estrich-gypsum, anhydrite cement) and also into a sulfoaluminate modifying agent for producing non-shrinking mortars, cement concrete and for increasing strength of autoclave cellular concrete.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в области переработки фосфогипса преуспели Япония, Германия, Франция, США. Например, в Японии из него производят более 25 наименований строительных материалов и изделий — гипсовые вяжущие, штукатурку, строительные смеси, клей, облицовочную плитку, блоки, перегородки и т. д. В Беларуси, в других странах СНГ, а также в большинстве стран Евросоюза фосфогипс не перерабатывается.

В Республике Беларусь имеются значительные объемы отходов производства экстракционной фосфорной кислоты (ОАО "Гомельский химический завод", около 18 млн тонн), позволяющие создать крупные мощности по выпуску строительных материалов из отвального фосфогипса, который сейчас практически не используется и складировается в отвалах, что неблагоприятно для экологии региона. Поэтому вопрос утилизации фосфогипса является весьма актуальным.

Основным препятствием на пути использования фосфогипса для производства различных видов вяжущих является наличие в их составе кислых фтор- и фосфорсодержащих примесей, которые при термической обработке переходят в газообразную фазу, что приводит к негативным последствиям. В связи с этим известные технологии переработки фосфогипса включают дополнительные технологические операции (нейтрализацию, промывку), что ведет к значительным капитальным

и энергетическим затратам, так как при использовании большого количества промывных вод необходимо обеспечить их нейтрализацию и последующую утилизацию шлама [1]. Данные технологии основаны на использовании свежего фосфогипса. Использование же отвального фосфогипса представляется более целесообразным, так как вследствие многолетнего воздействия атмосферных осадков присутствующие в нем кислые примеси в значительной степени вымываются, и pH фосфогипса равен 6,0–6,8. Поэтому его переработка при определенных условиях может быть экологически безопасной [2].

Усредненный химический состав свежего и отвального фосфогипса ОАО "Гомельский химический завод" представлен в таблице 1. Анализ состава отвального фосфогипса показывает принципиальную возможность его использования в производстве вяжущих для растворов и бетонов вследствие невысокого содержания вредных примесей.

Одним из направлений утилизации фосфогипса является его переработка на высокообжиговые гипсовые вяжущие (ВГВ), которые получают путем помола обожженного фосфогипса с добавками-активаторами, ускоряющими процесс гидратации образующегося при обжиге нерастворимого ангидрита, либо путем совместного обжига фосфогипса с различными компонентами, которые улучшают свойства готового продукта [3, 4].

Таблица 1. Химический состав свежего и отвального фосфогипса в пересчете на сухое вещество

Химический состав фосфогипса	Содержание оксидов, мас. %, в фосфогипсе	
	свежем	отвальном
SiO ₂	0,77	0,60
Fe ₂ O ₃	0,33	0,0
ΣРЗЭ	0,58	0,11
CaO	31,8	31,5
MgO	0,0	0,0
SO ₃	44,6	45,9
R ₂ O	0,10	0,03
F _{общ}	0,33	0,10
P ₂ O _{5общ}	1,44	0,46
Al ₂ O ₃	0,42	0,40
ППП	19,63	20,9

Вторым направлением переработки фосфогипса является его использование для получения сульфоминеральных добавок, которые придают специальные свойства сухим строительным смесям, цементным бетонам и автоклавным газобетонам [5, 6].

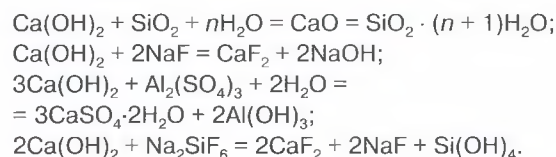
На кафедре химической технологии вяжущих материалов Белорусского государственного технологического университета установлена принципиальная возможность экологически безопасной переработки отвального фосфогипса на ВГВ (эстрих-гипс, ангидриновые цементы для сухих строительных смесей различного назначения). Кроме того, на уровне опытно-промышленной и промышленной апробации разработана технология расширяющего сульфоалюминатного модификатора (PCAM) для безусадочных цементов и бетонов, сухих строительных смесей ремонтного назначения, а также для повышения прочности автоклавного ячеистого бетона.

Принимая во внимание экологические аспекты, а также учитывая, что отвальный фосфогипс имеет влажность 25 %–27 %, приготовление сырьевых смесей следует производить по мокрому и пластичному способам. Нейтрализовать вредные кислые примеси в сырьевых смесях можно, добавляя в них карбонатный компонент в виде мела. Карбонат кальция нейтрализует вредные кислые примеси и переводит в нелетучие нерастворимые соединения. Это подтверждается экспериментальными данными, которые получены методом ионометрии (анализ состоит в измерении потенциала ионоселективного электрода в пробе и вычислении содержания определяемого компонента (F⁻) по градуировочному графику). Установлено, что количество фторсодержащих примесей в смеси фосфогипса и мела и в продукте их обжига остается практически неизменным, в то время как при обжиге одного фосфогипса в газообразную фазу выделяется 70 %–80 % соединений фтора.

ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ ФОСФОГИПСА НА ВЫСОКООБЖИГОВЫЕ ГИПСОВЫЕ ВЯЖУЩИЕ

Технология получения эстрих-гипса апробирована в лабораторных условиях и в промышленном производстве должна включать пластическое перемешивание сырьевых компонентов (фосфогипса — 95 %–99 % и ме-

ла — 1 %–5 %) в двухвальном смесителе, грануляцию сырьевой смеси на барабанном грануляторе, обжиг во вращающейся печи при температуре 900 °С–1100 °С и помол продукта обжига в шаровой мельнице совместно с активаторами твердения до остатка на сите № 02 не более 5 %. Пластическое перемешивание фосфогипса и мела, обладающих естественной влажностью, и двухвального смесителя обеспечивает достаточную однородность сырьевой смеси. Образующийся при декарбонизации CaCO₃ свободный CaO является активатором процесса гидратации нерастворимого ангидрита, который образуется в процессе обжига смеси и имеет низкую гидратационную активность. Из литературных данных известно, что ускорить гидратацию ангидрита могут вещества, повышающие его растворимость или способствующие образованию зародышей гидратной фазы, т. е. дигидрата сульфата кальция [7]. С учетом вышеизложенного для повышения степени гидратации ангидрита использовались следующие добавки-активаторы: кремнегель SiO₂ (отход производства фторида алюминия в ОАО "Гомельский химический завод"), технические Al₂(SO₄)₃ (ОАО "Гомельский химический завод"), Na₂SiF₆ и NaF (зарубежного производства). При затворении ВГВ находящийся в его составе CaO гасится с образованием Ca(OH)₂, который вступает во взаимодействие с вводимыми добавками по следующим реакциям:



Низкоосновные гидросиликаты кальция, являющиеся продуктами взаимодействия Ca(OH)₂ с аморфным SiO₂ кремнегеля, формируют прочный водостойкий каркас, что приводит к уплотнению твердеющей системы. Гидроксид натрия ускоряет процесс гидратации ангидрита за счет увеличения его растворимости, способствуя набору прочности в ранние сроки твердения. Образующиеся при взаимодействии Ca(OH)₂ с фторидом и кремнефторидом натрия нерастворимые соединения заполняют поры твердеющего гипсового камня, что способствует формированию плотной водостойкой структуры. Гелеобразные гидроксид алюминия и кремнекислота в виде пленки покрывают кристаллы двуводного гипса, повышая водостойкость продуктов гидратации.

Добавки в количестве от 0 % до 5 % вводились на стадии помола продукта обжига. Водопотребность определялась на приборе Вика и составила 22 %–24 %. В качестве контрольных образцов были взяты вяжущие, полученные путем обжига фосфогипса с добавкой мела и без нее.

Кинетика роста прочности на сжатие изучалась на образцах размерами 20x20x20 мм. В таблице 2 приведены значения прочности на сжатие образцов эстрих-гипса (в зависимости от времени твердения) при введении различных видов добавок-активаторов, а также прочности на сжатие контрольных образцов фосфогипса с мелом и без него.

Время схватывания полученных вяжущих колеблется в пределах: начало — 30 мин–2 ч, конец — 1–4 ч. Важной характеристикой ВГВ является коэффициент водостойкости (K_в). Контрольные образцы вяжущего имеют

Таблица 2

Добавка-активатор и фосфогипс	Предел прочности на сжатие образцов эстрих-гипса, МПа, в возрасте, сут		
	3	7	28
Кремнегель	9,2	14,2	19,0
NaF	23,8	31,2	42,3
Na ₂ SiF ₆	15,7	25,0	40,2
Al ₂ (SO ₄) ₃	21,0	40,9	46,4
NaF + Al ₂ (SO ₄) ₃	25,1	34,0	44,7
NaF + Al ₂ (SO ₄) ₃	27,3	35,2	51,2
Контрольный образец: обоженный фосфо- гипс обоженный фосфо- гипс в смеси с мелом	4,7	9,5	9,8
	5,2	9,9	11,8

низкую водостойкость ($K_w = 0,3-0,4$). У составов эстрих-гипса с добавками-активаторами коэффициент водостойкости значительно выше ($K_w = 0,6-1,0$), что связано с образованием нерастворимых соединений, уплотняющих структуру и защищающих кристаллы двуводного гипса от растворения.

Для интерпретации полученных результатов были проведены рентгенофазовый и дифференциально-термический анализы продуктов гидратации эстрих-гипса, которые позволили установить, что в присутствии активаторов степень гидратации ангидрита повышается в 1,8–2,2 раза. Это подтверждается увеличением содержания в продуктах гидратации двуводного сульфата кальция, который формирует прочный каркас твердеющей системы. С целью изучения микроструктуры затвердевшего гипсового камня был проведен электронно-микроскопический анализ продуктов гидратации эстрих-гипса. Фотографии микроструктуры (в возрасте 28 сут) продуктов гидратации обоженного фосфогипса и ВГВ с добавкой NaF представлены на рис. 1, 2. Структура гипсового камня с активирующей добавкой более плотная, что связано с образованием в порах нерастворимого CaF₂. Кроме того, образующийся в твердеющей системе NaOH способствует большей степени гидратации, о чем свидетельствует наличие повышенного количества пластинчатых, волокнистых и призматических кристаллов дигидрата сульфата кальция.

Апробация полученного эстрих-гипса в составе сухих строительных смесей для устройства наливных полов и штукатурных работ проходила в ЗАО "Пралеска-ТМФ" (г. Минск). Полученные штукатурные смеси обладают хорошей адгезией (1,01–1,25 МПа), сроками обрабатываемости (6,5–8,0 ч), пригодны для нанесения как ручным, так и механизированным способом и по своим характеристикам соответствуют [8]. Сухие наполненные смеси на основе эстрих-гипса имеют прочность сцепления с основанием 0,72–0,77 МПа, прочность на сжатие составляет 12,0–22,0 МПа, водопотребность — 25 %. Продукты твердения сухих смесей характеризуются также отсутствием на поверхности высолов и трещин.

Вторым вариантом получения ВГВ является технология ангидритового цемента, получаемого по мокрому способу. В качестве сырьевых компонентов, кроме фосфогипса, использовались железосодержащие отходы Белорусского металлургического завода (окалина и пыль газоочистки) и мел белорусских месторождений.

Предлагаемая технология ангидритового цемента включает приготовление сырьевого шлама при определенном соотношении сырьевых компонентов, его обжиг при температуре 800 °С–1000 °С во вращающейся печи и помол продукта обжига.

Составы, содержащие в сырьевой смеси до 10 % железосодержащих отходов, характеризуются высоким темпом набора прочности в ранние сроки и наибольшей прочностью в 28-суточном возрасте, что связано с появлением в составе продукта обжига новообразований, влияющих на процессы твердения ангидритового вяжущего. Проведенный комплекс физико-химических исследований позволил установить образование при обжиге сырьевой смеси сульфогеррита кальция и его твердых растворов. Данное соединение является гидравлически активной фазой, что благоприятно влияет на прочность продуктов твердения, а также предотвращает усадочные деформации. Таким образом, для ускорения процессов гидратации и кристаллизации, протекающих при твердении ангидритового цемента, и для повышения его прочности необходим целенаправленный синтез сульфогерритов кальция при термообработке исходной сырьевой смеси.

Основные характеристики ангидритового цемента приведены в таблице 3. Анализ представленных результатов свидетельствует о возможности получения на основе разработанного ангидритового вяжущего высокоподвижных растворов, способных растекаться, образуя самонивелирующуюся поверхность, например, при подготовке полов под линолеум или паркет. Полученное вяжущее может заменить цемент в некоторых областях его примене-



Рис. 1. Микроструктура продуктов гидратации контрольного образца (обоженного фосфогипса)



Рис. 2. Микроструктура продуктов гидратации ВГВ с добавкой NaF

Таблица 3. Основные характеристики ангидритового цемента

Наименование характеристики	Значение показателя
Водопотребность, %	20–25
Предел прочности на сжатие, МПа: через 3 сут твердения через 28 сут твердения	23–30 30–38
Коэффициент водостойкости	0,62–0,77
Срок схватывания, мин: начало конец	30–45 90–120
Водопотребность при полной растекаемости с созданием самонивелирующей поверхности, %	31–37

ния. Некоторые составы ангидритового цемента могут быть рекомендованы для разработки соответствующих технических регламентов по рецептурам сухих строительных смесей шпаклевочного и штукатурного назначения. Штукатурка на основе ангидритового цемента является декоративной, хорошо окрашивается пигментами как минерального, так и органического происхождения.

ПЕРЕРАБОТКА ФОСФОГИПСА НА СУЛЬФОМИНЕРАЛЬНЫЕ ДОБАВКИ К СТРОИТЕЛЬНЫМ МАТЕРИАЛАМ

Перспективной также является переработка фосфогипса на сульфоминеральные добавки для получения сухих смесей строительного назначения, безусадочных бетонов, а также автоклавных газобетонов повышенной прочности. Ввод таких добавок позволяет регулировать конфигурацию и размеры структурных составляющих продуктов твердения на микроуровне и с помощью этого воздействия производить прогнозируемое управление свойствами данных строительных материалов.

В настоящее время в строительной практике широко применяются безусадочные бетоны. Они обладают способностью расширяться при твердении и обеспечивают компенсацию усадочных деформаций, что позволяет возводить монолитные конструкции по прогрессивной технологии. Применение безусадочных бетонов существенно улучшает такие эксплуатационные характеристики материала, как трещиностойкость, водо- и газонепроницаемость, стойкость к агрессивным средам, морозостойкость и т. д.

Благодаря высокой эффективности применения безусадочных бетонов, все больше строительных организаций используют его при возведении различных сооружений. В связи с чем увеличивается объем выпуска безусадочных бетонов. Наиболее эффективно использование таких бетонов при возведении заглубленных емкостей, бассейнов, подвалов, подземных гаражей, полов общественных и производственных зданий; при ремонте, реконструкции, восстановлении водонепроницаемости строительных конструкций.

Самый распространенный способ получения безусадочных бетонов — это введение расширяющих добавок, действие которых заключается в образовании с фазами портландцемента и продуктами его гидратации соединений со значительно большим объемом, чем исходные. Наиболее существенное влияние на процесс расширения цементного камня оказывают вещества, которые способ-

ствуют образованию кристаллов гидросульфатоалюмината кальция. В связи с этим в мировой строительной практике наиболее распространенной расширяющей добавкой для безусадочных и напрягающих бетонов является тонкомолотая смесь дорогостоящего глиноземистого клинкера и природного гипса. В Республике Беларусь эти компоненты отсутствуют, что обуславливает актуальность применения отечественных расширяющих добавок на основе природного и техногенного сырья.

Технология производства на основе фосфогипса расширяющего сульфатоалюминатного модификатора (PCAM) по мокрому способу освоена на Петриковском керамзитовом заводе ОАО "Гомельский ДСК" в соответствии с [9]. Технология включает приготовление сырьевого шлама из фосфогипса, глины и мела, обжиг его во вращающейся печи и охлаждение в барабанном холодильнике. Полученный гранулированный продукт нуждается в последующем помоле и вводится в состав сухих строительных смесей и бетона в виде порошка для компенсации усадочных деформаций. Технология производства PCAM по пластическому способу в настоящее время осваивается также на заводе отделочных строительных материалов ЗАО "Парад" (г. Минск). Основными фазами продукта обжига являются ангидрит, сульфатоалюминат кальция, сульфосиликат кальция, кремнезем, геленит и метакраолинит. Согласно литературным данным, основная задача при управлении процессами гидратации и твердения для получения эффекта компенсации усадки сводится к обеспечению оптимальных условий для быстрого образования высокосульфатной формы гидросульфатоалюмината кальция в твердеющей системе после достижения цементным камнем достаточной прочности. Данный эффект могут обеспечить дополнительно вводимые в твердеющую цементную систему сульфатоалюминат и сульфат кальция. Минералогическая основа PCAM позволяет регулировать процессы формирования микро- и макроструктуры цементного камня в нужном направлении для обеспечения его расширения и самонапряжения.

Исследование физико-механических свойств модифицированного добавкой PCAM цементного камня проводилось по стандартным методикам в лабораторных условиях. Изучение закономерностей изменения состава и микроструктуры новообразований проводили с помощью сканирующей электронной микроскопии, дифференциально-термического и рентгенофазового анализов. Физико-механические свойства безусадочного цемента на основе PCAM согласно [10] представлены в таблице 4.

Рентгенофазовые и дифференциально-термические исследования продуктов гидратации и твердения цементного камня на безусадочном цементе, активированного PCAM, показали, что в период от начала затворения до 3 сут идет интенсивное образование трехсульфатной формы гидросульфатоалюмината кальция (эттрингита), которое стабилизируется к 7 сут, что подтверждается зависимостью линейного расширения стандартных образцов от времени твердения (рис. 3). Это позволяет избежать избыточного линейного расширения и разрушения структуры цементного камня. К 28 сут твердения основная часть гидросульфатоалюмината кальция переходит в низкосульфатную форму. Однако гидросиликатная матрица цементного камня к этому времени приобретает достаточную жесткость, что предотвращает усадочные явления.

С помощью сканирующей электронной микроскопии установлено, что после 3 сут гидратации характерной

Таблица 4. Физико-механические свойства бездобавочного цемента на основе РСАМ

Физико-химические свойства	Цемент с 10 мас. % РСАМ		Бездобавочный цемент
	лабораторного	промышленного	
Нормальная густота, %	27	26	26
Сроки схватывания: начало, ч-мин конец, ч-мин	1–30 4	1–35 4	1–35 4–35
Прочность в возрасте 28 сут, МПа: на сжатие на изгиб	34,2 6,9	37,2 6,7	36,3 6,2
Линейное расширение, в возрасте 28 сут, %	0,10	0,08	-0,12
Самонапряжение в возрасте 28 сут, МПа	1,9	2,0	–

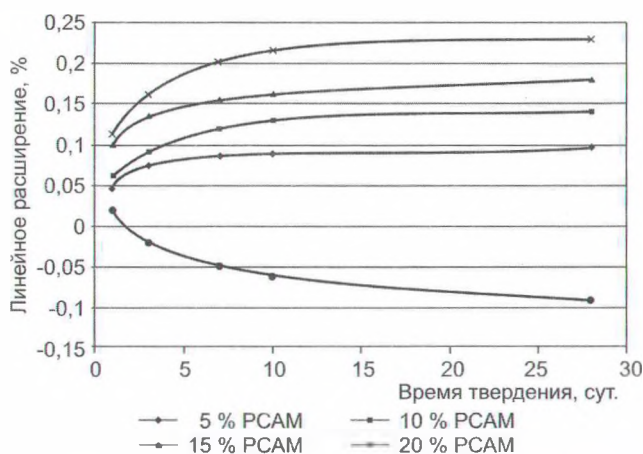


Рис. 3. Зависимость линейного расширения стандартных образцов от времени твердения

особенностью бездобавочного цементного камня на основе РСАМ по сравнению с обычным портландцементом является наличие повышенного количества длинных призматических кристаллов этtringита, гидросульфосиликата кальция, волокнистых кристаллов гидросиликатов кальция, образованию которых способствует минералогическая основа модификатора.

Образцы бездобавочного цементного камня в возрасте 3 сут имеют гораздо меньшую степень закристаллизованности. Гелеобразные новообразования обволакивают как непрореагировавшие зерна цемента, так и более мелкие кристаллы этtringита. Таким образом, установлено, что РСАМ значительно изменяет процесс гидратации цемента и обеспечивает необходимый режим расширения твердеющей системы.

На основе проведенных исследований можно утверждать, что разработанный РСАМ для получения сухих смесей и бетонов с компенсированной усадкой и самонапряжением соответствует всем необходимым требованиям и может применяться в строительстве. Исследования твердеющих систем в более поздние сроки (1–2 года) показали отсутствие снижения прочности и существенных колебаний линейного изменения объема. Испытания в РУП "Институт БелНИИС" подтвердили сделанные выводы и послужили основанием рекомендовать к применению разработанный расширяющий модификатор в следующих областях:

— монолитное бетонирование для предотвращения усадочных деформаций и получения бетона с самонапряжением 1–2 МПа;

— в составе сухих строительных смесей для предотвращения образования трещин в штукатурке;

— в составе гидроизоляционных растворов при строительстве подземных бетонных сооружений;

— в составе сухих строительных смесей ремонтного назначения [11].

Перспективным направлением является также использование РСАМ в составе ячеистого бетона. "Основными направлениями развития материально-технической базы строительства Республики Беларусь на период 1998–2015 гг." ячеистобетонные изделия определены главным стеновым материалом, и до 2015 г. существующие мощности по его производству планируется увеличить в 2,1 раза. Одной из актуальных проблем в производстве ячеистого бетона является необходимость снижения его средней плотности при сохранении достаточной прочности. Снижение средней плотности стеновых блоков из ячеистого бетона на 50 кг/м³ позволяет снизить расход топлива на обогрев зданий до 1 кг условного топлива на 1 м² стены в год [12]. Производство высокопрочного ячеистого бетона пониженной плотности позволит также снизить расход цемента и извести, сократить энергозатраты на помол сырья и обеспечить сохранность изделий при транспортировке и укладке в процессе его производства и применения. В итоге это позволит уменьшить толщину стен и снизить нагрузку на фундамент. Главным препятствием в производстве и применении ячеистого бетона пониженной плотности является его недостаточная прочность. Таким образом, совершенствование технологии ячеистого бетона в данном направлении является важной задачей, решение которой обеспечит энерго- и ресурсосбережение в производстве данного вида материала, а также при его использовании в строительстве.

В настоящее время ячеистый бетон в Республике Беларусь, странах СНГ и Евросоюза, в отличие от цементного бетона, производится без применения специально синтезированных химических добавок, оказывающих влияние на физико-механические свойства готовых изделий. Потенциал совершенствования технологии ячеистого бетона с точки зрения сокращения расхода сырья, тепло- и электроэнергии, по оценкам авторов, составляет 20 %–30 %. Поэтому использование добавок в ячеистом бетоне можно считать стратегическим направлением научных исследований в данной области. Из литературных и патентных источников известно большое количество добавок, разработанных для ячеистых бетонов [13, 14]. Однако все известные разработки по использованию химических добавок в нашей стране и за рубежом не нашли промышленного применения по различным причинам. В связи с вышеизложенным

Таблица 5. Результаты испытаний образцов ячеистого бетона

Номер п/п	Содержание добавки, мас. %	Плотность, кг/м ³	Влажность, %	Прочность на сжатие, МПа
1	0	502	30,4	2,31
2	1	523	24,5	2,52
3	2	510	32,8	2,92
4	3	497	27,2	2,95
5	4	520	30,0	2,87

были проведены исследования по использованию в качестве добавки в ячеистый бетон автоклавного твердения сульфоалюминатного модификатора (PCAM).

По данным [15] на основе фосфогипса можно получать добавки, оказывающие влияние на структуру гидросиликатов кальция типа C-S-H и способствующие образованию низкоосновных гидросиликатов кальция, обуславливающих прочность, трещино- и водостойкость готовых изделий. Это явилось предпосылкой к выбору в качестве добавки сульфоалюминатного модификатора, позволяющего управлять микроструктурой ячеистого бетона.

На основании положительных результатов, полученных в ходе лабораторного эксперимента в ОАО "Минский комбинат силикатных изделий", были проведены промышленные испытания и осуществлен выпуск пробной партии ячеистого бетона с маркой по плотности D500 в соответствии с технологическим регламентом. В качестве сырьевых компонентов использовались: портландцемент марки М500 без активных минеральных добавок (удельная поверхность — не менее 3000 см²/г, начало схватывания — не позднее 2 ч, конец схватывания — не позднее 4 ч); известь негашеная кальциевая с содержанием активных СаО и MgO не менее 70 %, в том числе MgO — не более 5 %; песок кварцевый с содержанием свободного кварца не менее 70 %; алюминиевая пудра (ПАП-1). Сульфоалюминатный модификатор вводился в состав ячеистобетонной смеси в молотом виде с удельной поверхностью 6500–6700 см²/г в виброгазобетоносмесителе. В/Т ячеистобетонной смеси составляло 0,45. Было приготовлено несколько форм с различной дозировкой сульфоа-

люминатного модификатора (от 0 до 5 мас. %). Запаривание ячеистого бетона производилось в автоклаве при избыточном давлении 0,8 МПа по следующему режиму: подъем давления — 1,5 ч, изотермическая выдержка — 7 ч, снижение давления — 1,5 ч. Было выпущено 9,6 м³ модифицированного ячеистого бетона с маркой по плотности D500. Характеристики испытанных образцов ячеистого бетона с добавкой и без нее представлены в таблице 5.

С помощью рентгенофазового анализа установлено, что сульфоалюминатный модификатор оказывает интенсифицирующее воздействие на процессы гидросиликатного твердения. На рентгенограммах образцов с добавкой обнаружены в основном гидросиликаты кальция тоберморитового ряда, обеспечивающие высокие показатели по пределу прочности на сжатие.

В результате проведенных испытаний установлено также, что морозостойкость модифицированного ячеистого бетона не уступает бездобавочным аналогам.

Повышение прочности на 25 %–30 % при использовании PCAM является предпосылкой для получения ячеистого бетона с марками по плотности D300 и D400, с прочностными характеристиками, соответствующими выпускаемым в настоящее время бетонам с марками по плотности D400 и D500.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные экспериментальные исследования по разработке технологий переработки фосфогипса на строительные материалы различного назначения, а также опытно-промышленное освоение ряда из них на предприятиях Беларуси позволили сделать следующие выводы:

— установлена принципиальная возможность экологически безопасной и крупномасштабной переработки отвалного фосфогипса на высокообжиговые гипсовые вяжущие с улучшенными свойствами (эстрих-гипс, ангидритовый цемент);

— разработана и освоена технология расширяющего сульфоалюминатного модификатора (PCAM) на основе фосфогипса для получения безусадочных и напрягающих растворов и бетонов, а также для повышения прочности автоклавных ячеистых бетонов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ферронская, А. В. Гипсовые материалы и изделия (производство и применение): справочник / А. В. Ферронская [и др.]; под ред. А. В. Ферронской. — М.: Издательство АСВ, 2002. — 488 с.
2. Мечай, А. А. Высокообжиговое композиционное гипсовое вяжущее на основе фосфогипса / А. А. Мечай, М. В. Новик, Я. И. Мельникова // Цемент и его применение. — 2007. — № 5. — С. 73–75.
3. Габададзе, Т. Г. Высокопрочные ангидритовые вяжущие из различного сырья и отходов промышленности / Т. Г. Габададзе [и др.] // Строительные материалы. — 1985. — № 10. — С. 21–25.
4. Сычева, Л. И. Выпуск ангидритового вяжущего из фосфогипса / Л. И. Сычева, М. В. Ануфриев // Цемент. — 1993. — № № 5, 6. — С. 60–62.
5. Кузьменков, М. И. Безусадочный цемент с расширяющей сульфоалюминатной добавкой / М. И. Кузьменков, А. А. Мечай, А. А. Матвеев // Цемент и его применение. — 2006. — № 6. — С. 90–92.
6. Барановская, Е. И. Технология высокопрочного ячеистого бетона / Е. И. Барановская, А. А. Мечай // Строительный рынок. — 2008. — № 5. — С. 24–27.
7. Сулимова, Е. В. Вопросы твердения ангидритовых вяжущих / Е. В. Сулимова [и др.] // Строительные материалы. — 1993. — № 7. — С. 25, 26.
8. Композиции защитно-отделочные строительные. Технические условия: СТБ 1263-2001.
9. Расширяющий сульфоалюминатный модификатор для бетонов и растворов: ТУ РБ 100354659.054-2005.
10. Цемент безусадочный. Технические условия: СТБ 942-93.
11. Протьюко, Н. С. Расширяющий сульфоалюминатный модификатор для компенсации усадочных деформаций бетонов и растворов / Н. С. Протьюко, А. А. Мечай // Проблемы современного бетона и железобетона: сб. трудов в 2 ч. Ч. 2 Технология бетона / НП ООО "Стринко"; редкол. М. Ф. Марковский (отв. ред.) [и др.]. — Минск, 2007. — С. 255–271.
12. Соколовский, Л. В. Энергосбережение в строительстве / Л. В. Соколовский. — Минск: Стринко, 2000. — 46 с.
13. Сердюк, В. Р. Ячеистый бетон с пластифицирующей добавкой / В. Р. Сердюк, П. А. Ройман // Промышленность строительных материалов. Сер. 8. Промышленность автоклавных материалов и местных вяжущих. — 1978. — Вып. II. — С. 6.
14. Никольский, В. М. Влияние комплексонов на свойства ячеистого бетона / В. М. Никольский, И. Л. Горелов // Химия комплексонов и их применение. — 1986. — С. 32.
15. Раденкова-Янева, М. Активирание на связывающую способность на белитови свързващи вещества с помощта на фосфогипс / М. Раденкова-Янева, И. Янев // Техническа мисъл. — 1985. — № 3. — С. 73–76.

Статья поступила в редакцию 26.08.2009.