

Выводы. В результате проведенных исследований были сделаны следующие выводы: исследуемые нами техногенные отходы промышленности обладают высокой дисперсностью и будут обеспечивать повышение реакционной способности при совместном применении с низкосортным суглинистым сырьем.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Химическая технология керамики : учеб. пособие для вузов / под ред. проф. И. Я. Гузмана. – М. : ООО РИФ «Стройматериалы», 2003. – 496 с.
2. Практикум по курсу «Физическая и коллоидная химия» / В. Я. Баранов, В. А. Любименко. – М. : ФГУП «Нефть и газ», РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2007. – С. 55 – 65.
3. Практикум по коллоидной химии : учеб. пособие / под ред. М. И. Гельфмана. – СПб. : Лань, 2005. – 256 с.
4. Лабораторный практикум по курсу «Физическая и коллоидная химия» / [сост. В. В. Петров, А. Н. Королев, Н. Ф. Копылова. – Таганрог : ТРТУ, 2000. – 60 с.
5. Практикум и задачник по коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы: учеб. пособие для вузов / под ред. В. В. Назарова, А. С. Гродского. – М. : ИКЦ «Академкнига», 2007. – 374 с.

УДК 666:913

ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ ПОЗИЦИИ, ВЛИЯЮЩИЕ НА СВОЙСТВА ГИПСОВЫХ ВЯЖУЩИХ

*В. Н. Деревянко д. т. н., проф., В. А. Тельянов н. с., А. Г. Чумак асп., К. Е. Анисимов студ.,
Н. В. Кондратьева*, к. т. н., доц.*

**Государственное высшее учебное заведение «Украинский государственный
химико-технологический университет»*

Ключевые слова: *фосфогипс, дигидрат гипса, сушка, водостойкость, температура*

Актуальность. Время от времени наблюдается всплеск научных разработок, касающихся гипсовых вяжущих, их применения, модификации. Все это связано с двумя важнейшими положительными особенностями систем $\text{CaSO}_4 - \text{H}_2\text{O}$:

- наличием значительных природных запасов и огромного количества отходов, содержащих всего лишь несколько процентов вредных примесей;
- вторым важным преимуществом является низкая температура обжига, 150 – 180 °С, соответственно, небольшие энергозатраты, а также возможность применения менее сложных технологий производства.

К достоинствам следует также отнести отсутствие выбросов вредных газов при получении вяжущих на основе гипса.

Проблемы. При производстве вяжущих на основе отходов – нейтрализация примесей фосфора и фтора. В эксплуатационных условиях низкая прочность и водостойкость. И если прочность изделий на основе гипса является основополагающим фактором, то водостойкость резко ограничивает область их применения.

Решение данного вопроса импрегнированием гипсовой поверхности различными веществами, нанесением защитных покрытий и т. д. в принципе не позволяет решить данную задачу, так как не обеспечивается полное исключение влияния влажностных факторов.

В связи с этим рассмотрены принципиальные позиции, влияющие на свойства изделий на основе гипсовых вяжущих: технологические параметры обжига, сырья и процессы гидратации.

Природное сырье, содержащее водный или безводный сульфат кальция ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, CaSO_4), находится в виде гипсового камня, имеющего светлый, иногда окрашенный цвет (рис. 1). Химический состав: $\text{CaO} - 32,56$; $\text{SO}_3 - 46,51$; $\text{H}_2\text{O} - 20,93$, твердость по шкале Мооса – 2, истинная плотность – 2,3 – 2,4 г/см³, растворимость – 2,05 г/л (32 – 40°С), теплопроводность 0,43 Вт/мК [4].



Рис. 1. Разновидности гипсового камня: а – ангидрит;
б – гипсовый камень; в – алебастр

Гипс кристаллизуется в виде призм моноклинной сингонии и обладает совершенной спайностью (рис. 2). Пространственная решетка состоит из элементарных ячеек с четырьмя молекулами $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, каждый ион Ca^{2+} окружен шестью атомами кислорода и двумя молекулами воды (рис. 3). Слоистый мотив создается благодаря послойному распределению молекул воды, между которыми действуют слабые гидроксильно-водородные связи (рис. 4) [3].

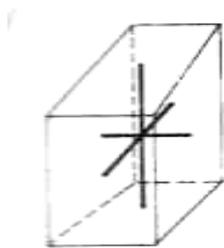


Рис. 2. Кристалл гипса в виде призмоческой сингонии

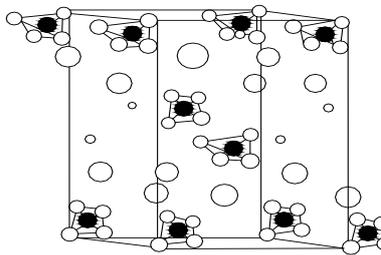


Рис. 3. Пространственная решетка двухводного сульфата кальция

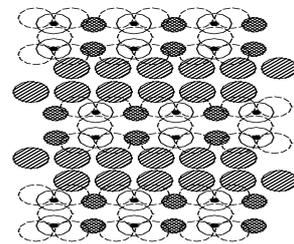


Рис. 4. Слоистый массив двухгидрата

Разновидности (рис. 1): мелкозернистый белый плотный гипс с сахаровидным изломом, напоминающим мрамор – алебастр; кристаллический прозрачный гипс, залегающий в виде плоских кристаллов – гипсовый шпат; волокнистая порода, сложенная из правильно расположенных нитевидных кристаллов, с характерным шелковидным блеском – селенит. Средняя плотность гипсовой щебенки – $\rho = 1\,200 - 1\,400 \text{ кг/м}^3$. Ангидрит (CaSO_4) безводная модификация гипса, твердость – 3 – 3,5, $\rho = 2,9 - 3,1 \text{ г/см}^3$. Кристаллизуется в виде ромбической сингонии (рис. 5). Элементарная ячейка содержит четыре молекулы CaSO_4 и обладает плотной упаковкой (рис. 6). Спайность, совершенная по трем направлениям, растворимость 1 г/л [13].

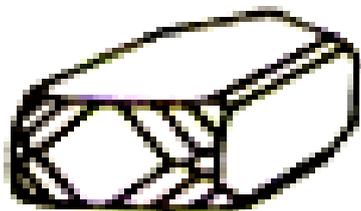


Рис. 5. Кристалл ромбической сингонии безводного сульфата кальция

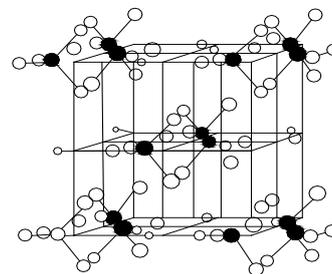


Рис. 6. Структура ангидрита

На сегодняшний день в Украине разведано приблизительно 40 месторождений гипса и ангидридов, несколько из них высокого качества, остальные запасы имеют низкое качество и малую мощность (содержание $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ниже 90 %). Совокупные запасы всех месторождений составляют порядка более 500 миллионов тонн. Основные месторождения расположены в Донецкой, Ивано-Франковской, Хмельницкой и Черновицкой областях (табл. 1) [12].

Месторождения гипсовых вяжущих в Украине

Область	Месторождение и предприятие	Статистика по Украине	
		запас, %	добыча, %
Донецкая	Артемовское	56	43
Ивано-Франковская	Подмихайловецкое	13	19
Хмельницкая	г. Каменец-Подольский (ООО «Гипсовик»)	12	16
Черновицкая	с. Мамалига (ООО «Мамалиговский гипсовый завод»)	10	12
Львовская	Журавлевское	5	3
Другие	–	4	7

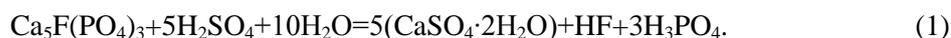
Фосфогипс – многотоннажный отход сернокислотного производства минеральных удобрений (рис. 7) – получают в процессе сернокислотной переработки природных апатитов и фосфоритов в фосфорную кислоту, двойной суперфосфат, преципитат фосфата аммония и другие концентрированные удобрения.



Рис. 7. Фосфогипс

В зависимости от условий производства в осадке может получаться дигидрат сульфата кальция или ангидрит [10].

При разложении апатита, основным породообразующим минералом которого является кальцийфторапатит $\text{Ca}_5\text{F}(\text{PO}_4)_3$, образуется наряду с ортофосфорной кислотой H_3PO_4 и кремнефторидом SiF_4 практически нерастворимый сульфат кальция. Процесс сернокислотного разложения апатитов описывается по схеме [6]:



Причем в зависимости от температурных условий образования фосфорной кислоты в осадке может получиться дигидрат сульфата кальция, полуводный или безводный сульфат кальция – ангидрит, по схеме:



Формально уравнение (1) аналогично уравнению (2), но тут играет большую роль температура [6]. При температуре 100°C гидратация первично образовавшихся молекул сульфата кальция не происходит и в результате в осадок выпадает безводный сульфат кальция – ангидрит.

Силикатная часть легко разлагается кислотами. В результате фосфогипс содержит большое количество кремниевой кислоты в активной форме, вступающей во взаимодействие с фтористым водородом с образованием кремнистофтористоводородной кислоты:



В фосфогипсе (табл. 2) в виде примесей содержится не разлагающийся апатит, кремнезем, органические примеси, из-за которых он принимает темную окраску, а иногда и своеобразный запах. Часть оксида фосфора, находящаяся в водорастворимом состоянии P_2O_5 , замедляет сроки схватывания, снижает прочность затвердевшего дигидрата кальция [6].

Примерный состав фосфогипсов

Материал	Содержание оксидов по массе, %									
	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	SO ₃	R ₂ O	F	P ₂ O ₅	П.п.п.
Фосфогипс	0,8	0,4	0,07	33,32	1,2	41,6	0,33	0,28	1,2	20,8

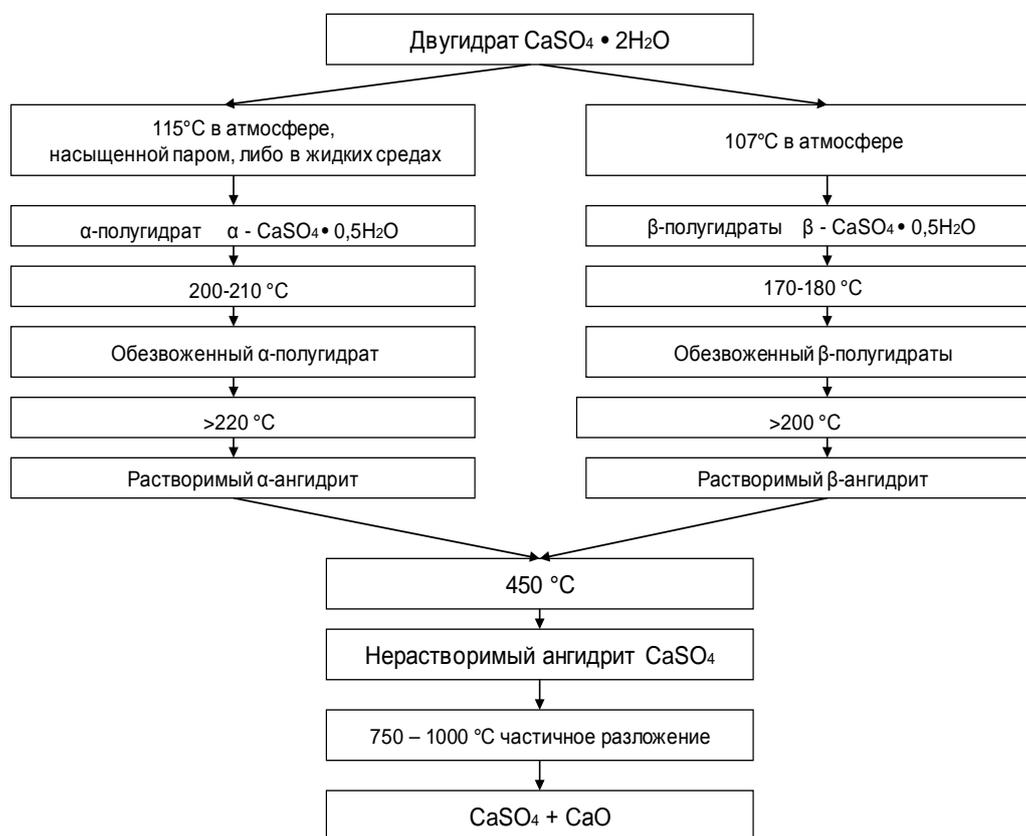
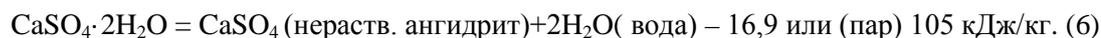
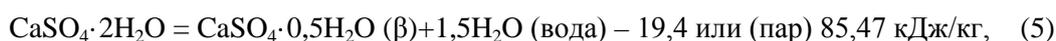
Схема превращения CaSO₄·2H₂O

Рис. 8. Схемы превращения в системе двухводного сульфата кальция при нагревании

Схема превращений в системе CaO₄ – SO₃ – H₂O двухводного сульфата кальция при нагревании (рис. 8) указывает на значительное количество факторов, влияющих на энергетические затраты и свойства полученных вяжущих.

Разновидности гипса с хорошо выраженными крупными кристаллами теряют кристаллическую воду при более высокой температуре, чем мелкозернистые разновидности. Температура равновесия двугидрат – полугидрат зависит от: чистоты сырья, размеров и удельной поверхности кусков, толщины слоя, скорости нагревания [5; 12].



Удельная теплоемкость α и β полугидрата – 0,8 и 0,84 кДж/(кг °С).

К существующим методам обжига следует отнести: варку в гипсоварочных котлах, обжиг во вращающихся барабанах, совмещенный помол и обжиг в быстроходных мельницах (шахтных, роликовых, аэромобильных и т. д.), обработка паром под давлением, получение гипса в жидких средах.

Все перечисленные методы можно разделить на три группы, при которых происходит удаление гидратной воды: при атмосферном давлении; при повышенном давлении; при

тепловой обработке в жидких средах.

В первом случае готовым продуктом является β -полугидрат сульфат кальция. Во втором и третьем случае – α -полугидрат. Энергетические затраты приведены в таблице 3 [5].

Таблица 3
Технико-экономические показатели производства гипса различными методами

Наименование установки	Удельный расход	
	условного топлива, кг/т	электроэнергии, кВт·ч/т
Гипсоварочные котлы	40 – 52	15 – 30
Вращающиеся печи	35 – 45	20 – 30
Демпферный	110 – 120	15 – 20
Вертикальный автоклав	81 – 280	22 – 30
Горизонтальный автоклав	150 – 260	12 – 20

Получение α -полугидрата однозначно требует повышенного расхода условного топлива в 2 – 7 раз. Средняя производительность составляет около 0,51 т/ч. Энергетические затраты прямопропорционально связаны с получением структуры полугидрата с необходимыми свойствами (табл. 4).

Таблица 4
Разница между α - и β -полугидратами сульфатов кальция

Параметры	α -полугидрат	β -полугидрат
Размеры кристаллов, $\mu\text{м}$	10 – 20	1 – 5
Структура	без пор	пористая

При сравнении термограммы α - и β -полугидратов (рис. 9) [12] видно, что разная степень их упорядочности обуславливает их физико-механические свойства.

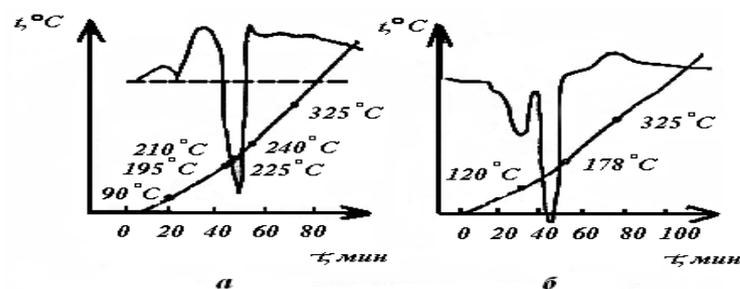


Рис. 9. Термограммы полугидратов гипса а – α -модификация, б – β -модификация

Изменяя технологические параметры тепловой обработки, можно влиять на структуру полугидрата и, соответственно, на его свойства [9].

Одной из основных проблем при получении гипсовых вяжущих из фосфогипса без предварительной обработки является наличие соединения фосфора и фтора, отрицательно влияющих на конечную прочность, технику безопасности обслуживающего персонала и экологию окружающей среды.

Применяемые способы промывки водными растворами гидратной извести $\text{Ca}(\text{OH})_2$ не повышают экологическую безопасность окружающей среды. Кроме того, энергетические затраты на сушку сырья значительно повышают себестоимость продукции. Поэтому в работе была поставлена задача разработки сухого метода нейтрализации.

Для исследования был использован фосфогипс с конвейера Днепродзержинского завода минеральных удобрений, ТУ У 26.5.30299063-003-2004 «Фосфогипс мелкодисперсный марки ФМГ». Содержание $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ в осушенном продукте – 91,2 %; влажность гигроскопическая – 15,7 %; удельная поверхность 3 000 $\text{см}^2/\text{г}$. В таблице 5 указано содержание фтористых и фосфорных соединений.

Содержание фторидов и фосфатов на осушенный продукт в исследуемом фосфогипсе

Наименование показателя	Согласно ДСТУ Б В.2.7-1-93	Фактическое значение
Содержание общего фосфора (в пересчете на P_2O_5), % по массе, не более	1,5	1,0
Содержание водорастворимых фосфатов (в пересчете на P_2O_5), % по массе, не более	1,2	1,2
Содержание фторидов (в пересчете на F), % по массе, не более	0,4	0,37
Содержание водорастворимых фторидов (в пересчете на F), % по массе, не более	0,3	0,20

Методы исследования. Первоначальной задачей при проведении экспериментальных исследований было определение режимов тепловой обработки при получении полугидрата на основе фосфогипса. Факторы варьирования (оптимальная температура и время варки) определяли согласно методике, приведенной в «Практикуме по химической технологии вяжущих материалов» [2]. Критериями оптимальности приняты физико-механические свойства полугидрата: водогипсовое отношение, сроки схватывания, прочность при сжатии и изгибе. В ходе экспериментов был определен оптимальный режим тепловой обработки: температура варки фосфогипса – 180 ± 10 °С, время – 180 ± 10 минут. Данный режим позволяет получить максимальное количество полугидрата (табл. 6) со следующими физико-механическими свойствами: В/Г – 0,9, сроки схватывания – начало 3 – 4 минуты, конец 8 – 9 минут, средняя прочность при сжатии и изгибе, соответственно – 3,9 и 2,7 МПа.

Таблиця 6

Влияние температуры обжига на количество $CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$

Температура, °С	$CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$, %
150	68,7
170	75,8
180	75,8
190	75,8
210	75,9

Прочностные показатели, согласно ДСТУ Б В.2.7-4-93 «Строительные материалы. Гипсовые вяжущие из фосфогипса. Общие технические условия», соответствуют марке гипса ГВФ-3. Но основным недостатком данного режима является выделение фтористых соединений, что, согласно санитарным нормам, не позволяет использовать фосфогипс при переработке в полугидрат.

На следующих этапах исследований, направленных на разработку метода сухой нейтрализации, было определение влияния добавок негашеной извести CaO, карбоната кальция $CaCO_3$, и активированного кремнеземистого компонента SiO_2 на нейтрализацию фосфорных и фтористых соединений. Основная задача – перевод указанных примесей в нерастворимую форму.

Сущность методики проведения сухой нейтрализации состоит в следующем: в фосфогипс отобраный с влажностью 15 – 16 %, вводилась добавка для нейтрализации фосфорных и фтористых соединений, смесь тщательно перемешивалась и выдерживалась в течение 48 ± 3 часов. Полученная смесь высушивалась при температуре 50 – 60 °С и затем обжигалась. Полученное комплексное вяжущее испытывалось согласно методике, приведенной в ДСТУ Б В.2.7-4-93.

В качестве добавки для нейтрализации водорастворимых примесей фтора и фосфора использовали негашеную известь в количестве от 0,5 до 5 %. Результаты испытаний показали, что сроки схватывания сильно увеличиваются, снижается В/Г до 0,75, но при этом в три-четыре раза снижаются и прочностные характеристики. Следует отметить, что при варке вяжущего

практически отсутствовал неприятный запах, который присутствовал при тепловой обработке чистого фосфогипса. Таким образом, применение CaO для сухой нейтрализации не представляется целесообразным.

На основе литературного и патентного анализа в качестве добавок для нейтрализации примесей последовательно использовали карбонат кальция CaCO_3 и активированный кремнезем SiO_2 . Результаты эксперимента показали, что введение CaCO_3 в количестве от 1 до 3 % следующим образом влияет на свойства полученного вяжущего: повышается живучесть, уменьшается водопотребность, наблюдается незначительное падение прочности – от 3 до 10 %. Процесс тепловой обработки сопровождается выделением неприятного запаха.

Кремнезем SiO_2 добавляли в количестве от 5 до 15 %. Результаты эксперимента показали, что введение активированного кремнеземистого компонента незначительно влияет на конечные характеристики, но большим плюсом является практически отсутствие запаха при варке вяжущего.

В результате анализа экспериментальных исследований процессов сухой нейтрализации, проведенных в лаборатории ГВУЗ «ПГАСА», а также анализа технической литературы, предложена рабочая гипотеза по нейтрализации водорастворимых примесей P_2O_5 и F, заключающаяся в том, что для нейтрализации данных примесей следует использовать комплексную добавку, состоящую из карбоната кальция и активного кремнезема (табл. 7).

Таблица 7

Влияние активного кремнезема и карбоната кальция на конечные характеристики вяжущего

Фосфогипс, %	Кремнеземистый компонент, %	Карбонат кальция, %	Прочность через 2 часа, кгс/см ²		В/Г	Сроки схватывания, мин ^{сек}	
			изгиб	сжатие		нач.	кон.
100	0	0	27	39	0,9	3 ³⁰	8 ⁰⁰
100	10	1	22	43	0,73	4 ³⁰	7 ⁰⁰
100	15	1	18	31	0,72	5 ³⁰	10 ⁰⁰
100	10	0,5	25	33	0,74	4 ⁰⁰	5 ³⁰
100	10	1,5	24	33	0,76	5 ³⁰	10 ⁰⁰
100	15	1,5	25	36	0,76	5 ³⁰	8 ⁰⁰
100	5	1,5	21	32	0,77	5 ⁰⁰	9 ⁰⁰
100	5	1	20	33	0,82	4 ⁰⁰	8 ³⁰

Разработанный метод сухой нейтрализации позволяет водорастворимые примеси фтора и фосфора перевести в нерастворимые соединения CaF_2 и $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и др. (рис. 10) [11].

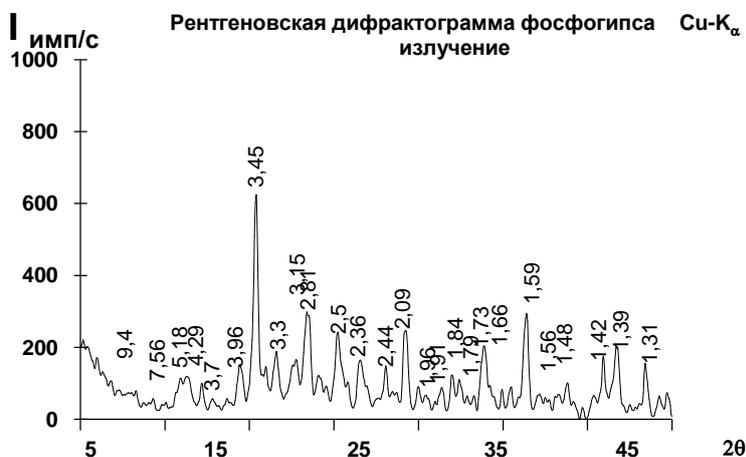


Рис. 10. Рентгенограмма фосфогипса

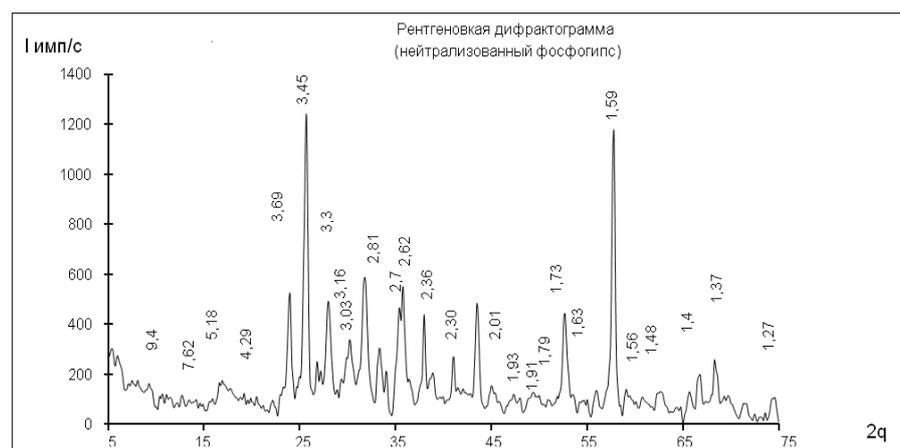


Рис. 11. Рентгенограмма нейтрлизованного фосфогипса

Рентгеновский анализ показал: у нейтрлизованного фосфогипса (рис. 11) образуются новые соединения по сравнению с обычным фосфогипсом (рис. 10).

На рентгенограмме фосфогипса можно отметить пики: CaCO_3 – 2,44; 1,91; 1,86; 1,48; 1,41; $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – 7,56; 4,29; 3,72; CaSO_4 – 2,46; 2,19; 1,64; 1,59; 1,48; 1,42; 1,27; P_2O_5 – 3,15; 3,72; 2,44; 2,24; Na_2SiF_6 – 1,96; 1,66; 1,39.

На рентгенограмме нейтрлизованного фосфогипса присутствуют нерастворимые соединения фтора и фосфора: SiO_2 – 3,31; 2,28; 1,63; 2,05; CaF_2 – 3,16; 1,93; 1,37; $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – 7,62; 3,03; 2,62; следы гидросиликатов 3,3; 2,7.

По данным таблицы 8, согласно ДСТУ Б В.2.7-2-93 «Строительные материалы. Фосфогипс кондиционный для производства гипсового вяжущего и искусственного гипсового камня. Технические условия», фосфогипс можно переклассифицировать в кондиционный фосфогипс. Кроме того, при данном методе нейтрализации практически отсутствуют выделения фтористых соединений при тепловой обработке, а физико-механические свойства полугидрата $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ на основе нейтрлизованного фосфогипса соответствует марке ГВФ-4 (табл. 7).

Таблица 8

Содержание фторидов и фосфатов на осушенный продукт в исследуемом фосфогипсе после нейтрализации

Наименование показателя	Согласно ДСТУ Б В.2.7-2-93	Фактическое значение
Содержание общего фосфора (в пересчете на P_2O_5), % по массе, не более	1,5	0,50
Содержание водорастворимых фосфатов (в пересчете на P_2O_5), % по массе, не более	0,15	0,05
Содержание фторидов (в пересчете на F), % по массе, не более	0,4	0,05
Содержание водорастворимых фторидов (в пересчете на F), % по массе, не более	0,03	0,00

Выводы. 1. В ходе исследования определен оптимальный режим тепловой обработки фосфогипса: температура варки – $175 \pm 10^\circ\text{C}$, время – 180 ± 10 минут. Прочностные характеристики данного вяжущего соответствуют марке ГВФ-3. При тепловой обработке выделяются летучие примеси фосфорных и фтористых соединений, что недопустимо санитарно-гигиеническими нормами.

2. Определено влияние добавок CaO , CaCO_3 , SiO_2 на конечные характеристики полученного вяжущего. В результате проведенных экспериментов выявлено, что при введении CaO снижаются прочностные характеристики. При добавлении CaCO_3 незначительно снижаются прочностные характеристики, по сравнению с чистым фосфогипсом, но процесс тепловой обработки сопровождается выделением неприятного запаха. Введение SiO_2 незначительно влияет на конечные характеристики, но большим плюсом является отсутствие

запаху при варке вяжущего.

3. В результате анализа проведенных исследований предложено научную гипотезу по нейтрализации водорастворимых примесей P_2O_5 и F с использованием комплексной добавки, состоящей из карбоната кальция и активного кремнезема.

4. Использование комплексной добавки повышает прочность гипсового вяжущего до марки ГВФ-4, значительно снижает количество водорастворимых примесей фосфора и фтора, что позволяет использовать его в гражданском строительстве. В процессе тепловой обработки практически отсутствует неприятный запах.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. **Большаков В. И.** Строительное материаловедение / В. И. Большаков, Л. Й. Дворкин. – Д. : РВА, Днепр-VAL., 2004. – 678 с.
2. **Бут В. М.** Практикум по химической технологии вяжущих материалов: учеб. пособие для химико-технолог. Спец. вузов / Бут В. М., Тимашев В. В. – М., Высшая школа, 1973. – 504 с.
3. **Бутт Ю. М.** Дегидратация. Химическая технология вяжущих материалов / Ю. М. Бутт, М. М. Сычев, В. В. Тимашев. – М. : Высшая школа, 1980. – 472 с.
4. **Волженский А. В.** Гипсовые вяжущие и изделия / А. В. Волженский, А. В. Федоровская. – М. : Стройиздат., 1974. – 328 с.
5. **Волженский А. В.** Минеральные вяжущие вещества / А. В. Волженский. 4-е изд. – М. : Стройиздат 1986. – 464 с.
6. **Гордашевский П. Ф.** Производство гипсовых вяжущих материалов из гипсосодержащих отходов / П. Ф. Гордашевский, Ф. В. Долгорев. – М. : Стройиздат, 1987. – 104 с.
7. **Горшков В. С.** Методы физико-механического анализа вяжущих веществ / В. С. Горшков, В. В. Тимашев, В. Г. Савельев. М. : Высшая школа. 1981 – 334 с.
8. **Деревянко В. Н.** Нейтрализация вредных примесей в фосфогипсе / В. Н. Деревянко, В. А. Тельянов, А. А. Дрозд, А. Г. Чумак // Вестник Одесской госуд. акад. строит. и архитект. – Одесса, 2010. – № 39. Ч. 1. – С. 130 – 134.
9. **Кривенко П. В.** Будівельне матеріалознавство / П. В. Кривенко, К. К. Пушкарєва. К. : ТОВ УВПК «Екс об». – 2004. – 704 с.
10. Мала гірнича енциклопедія: в 3 т. / за ред. В. С. Білецького – Донецьк : Донбас, 2004.
11. **Миркин Л. И.** Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов / Л. И. Миркин. – М. : ГСФМЛ 1961. – 862 с.
12. **Пашенко А. А.** В'язучі матеріали / А. А. Пашенко, В. П. Сербин, Е. А. Старчевская. – К. : Вища школа 1985. – 440 с.
13. **Шуман В.** Горные породы и минералы / В. Шуман. – М. : Мир, 1986. – 215 с.
14. **Murat M.**, Cinétique d'hydratation des sulfates de calcium sémihydratés. Essai d'interprétation des courbes / M. Murat, E. Karmazsin, «Vitesse – degré d'avancement». In: Compterendu du Colloque International de la R.I.L.E.M. 25 – 27 mai 1977, Saint-Remy-Les-Chevreuse, France, pp. 217 – 236.

УДК 539.3

К ИТЕРАЦИОННОЙ ТЕОРИИ СЛОИСТЫХ ПОЛОГИХ ОБОЛОЧЕК

А. В. Плеханов, д. т. н., проф.

Ключевые слова: пологая оболочка, итерационная теория, уравнения

Анализ исследований. В работе [1], с использованием для реализации вариационного уравнения Рейсснера метод варьирования по определяемому состоянию, получены двумерные уравнения итерационной теории слоистых пологих оболочек. Как показали исследования [3], сходимость решений на основе этих уравнений ухудшается при существенном различии упругих характеристик слоев. Сходимость может быть улучшена путем привлечения для первого приближения итерационной теории более общей модели.

Цель работы. В данной работе получены уравнения уточненной геометрически линейной итерационной теории трансверсально изотропных слоистых пологих оболочек, учитывающие в