

монолітної бетонної підлоги ущільненої за допомогою вібраторів при рівних складових та товщині.

На підставі проведених досліджень з укладання та ущільнення наджорстких бетонних сумішей можна зробити **ВИСНОВКИ**:

1. При використанні технології бетонування із застосуванням металюного пристрою можливе отримання бетону, що відповідає критеріям високоміцного.

2. Максимальні показники якості дрібнозернистого бетону отримані при наступних значеннях технологічних факторів бетонування: швидкість обертання металюників – 4000 об/хв; відстань від центра металюника до поверхні бетонування – 30 см; водоцементне відношення бетонної суміші В/Ц = 0,26.

3. При оптимальному відношенні факторів бетонування, що досліджувалися, значення технологічних та експлуатаційних показників дрібнозернистого бетону наступні:

– міцність дрібнозернистого бетону на стиск – 58, 36 МПа;

– міцність дрібнозернистого бетону на розтяг при згині – 7,294 МПа;

– стиранисть дрібнозернистого бетону – 3,967 кг/м<sup>2</sup>.

4. При дослідженні на стійкість до ударних дій доведено, що для розкриття першої тріщини в бетонній підлозі, яка укладена за допомогою металюного пристрою, затрачено роботи більше в порівнянні із підлогою укладеною з вібруванням.

5. Результати наукових досліджень з розробленої технології влаштування підлог вказують на практичну цінність розробок і їх застосування в будівництві. Використання розробленої технології дозволяє скоротити трудомісткість (в 1,9–7,2 рази), витрати на матеріали

та собівартість підлог (в 1,2–1,9) в порівнянні з існуючими технологіями влаштування бетонних підлог при відповідних експлуатаційних вимогах та показниках міцності.

#### **ЛІТЕРАТУРА:**

1. Пат. 92794 України, МПК (2009) В 28 В 1/30, В 28 В 13/00. Металюний пристрій для укладання та ущільнення бетонних сумішей / Бабиченко В.Я., Данелюк В.І.; заявка та власник Одеська державна академія будівництва та архітектури. – № а 2008 12967; заявка 07.11.2008; публікація 10.12.2010, Бюл. № 23.

2. Бабиченко В.Я. Новая струйная технология бетонирования, элементы теории, перспективы практического применения / Бабиченко В.Я., Данелюк В.И. // 36. наук. пр. «Будівельні конструкції». – Вип. 72. – Київ: НДІБК, 2009. – С. 622–630.

3. Бабиченко В.Я. Новый способ и технологические основы получения высокоплотных бетонов / Бабиченко В.Я., Данелюк В.И. // Журнал «Будівництво України». – 2009. – №. 9–10 – С. 30–34.

4. Бабиченко В.Я. Уплотнение мелкозернистых бетонных и других смесей с помощью нового технологического оборудования в виде эластичных метательных устройств / Бабиченко В.Я., Данелюк В.И., Можина С.Р. // 36. наук. пр. «Вісник». – Вип. 22. – Харків: НТУ «ХПІ», 2009. – С. 160–165.

5. Бабиченко В.Я. Вплив технологічних параметрів струменевого бетонування промислових підлог на якісні показники дрібнозернистого бетону / Бабиченко В.Я., Корнило І.М., Данелюк В.І., Шідловський О.М., Дуднік Г.В. // 36. наук. пр. «Будівельні конструкції». – Вип. 74. Кн. 2. – Київ: ДП НДІБК, 2011. – С. 213–220.

УДК 62.002 – 181.4 (075.8)

*Малышев В.В., доктор техн. наук, профессор;*

*Гладкая Т.Н., канд. техн. наук, доцент;*

*Борейко С.В., магистр, Открытый Международный Университет развития человека «Украина», г. Киев*

## **СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ИЗУЧЕНИЮ ПРОЦЕССОВ СТРУКТУРОБРАЗОВАНИЯ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ С ПОЗИЦИЙ НАНОУРОВНЯ**

В настоящее время перед строительным материаловедением стоят задачи создания новых материалов, в частности, таких как особо прочные, легкие, устойчивые в агрессивных средах бетоны ультравысоких технологий для высотного и промышленного строительства, а также специальных видов вяжущих, например, тампонажных, расширяющихся, для дорожного строительства, для укрепления грунтов. Решение таких задач связано с конструированием и управлением структурой материалов с заданными свойствами, а, следовательно, требует их изучения на новом метрическом уровне – наноуровне.

Разработка составов и оптимизация физико-химических свойств, управляемое формирование структу-

ры этих материалов на основе нанотехнологий требуют детального изучения закономерностей и кинетики структурообразования цементных дисперсных систем. Несмотря на то, что изучению процессов структурообразования и твердения цементного камня, уделено огромное внимание многочисленных исследователей, подход к строительным материалам как образованным структурными элементами наноуровневого размера еще только развивается.

Под понятием «структура» обычно представляется закономерное расположение в пространстве и во времени ее элементов.

Однако современный принцип изучения структур не ограничивается только их систематикой и структур-

но-морфологическим анализом, но также учитывает условия их возникновения и изменения во времени, возможное многообразие или полиморфизм (1). Именно такой подход отражает нетрадиционное, но уже достаточно распространенное среди специалистов понятие структуры: «Структура есть устойчивая выделенность дискретных частей системы как целого и фаз, или стадий, процессов ее изменения и развития, а также устойчивая системная упорядоченность, определенный строй всей совокупности связей, отношений и взаимодействий между этими частями, фазами и стадиями» (2). Применяя такой подход к изучению любого материала, динамику любых процессов, происходящих в системе можно рассматривать как развитие и преобразование ее структур.

Известно, что физико-химические превращения легче всего протекают в системах, наиболее далеких от равновесия. Открытость и неравновесность системы при синтезе как условия ее возникновения одновременно сопровождаются и ограничивающими факторами.

В роли наиболее существенного фактора для гетерогенно зарождающихся систем выступает подложка, на которой происходит процесс структурообразования. В случае гомогенно зарождающихся систем лимитирующим фактором является степень неравновесности процесса, например, внешняя и внутренняя диффузия вещества в зоне синтеза. Процессы структурообразования и твердения цементов, отличаясь своей ритмичностью протекания, сочетают в себе обе эти особенности.

С учетом не только термодинамической сложности, но и фактора протяженности процессов структурообразования во времени многочисленными исследованиями структуры и состава цементного клинкера и камня на его основе доказано, что единственно правильным путем к их изучению является генетический подход (3, 4).

При объяснении механизма возникновения и природы определенной стабильности твердых активных фаз, образующихся в результате топохимического

Таблица 1

**Основные характеристики ультрадисперсных кремнезёмов**

Характеристики	МК	БС(белая сажа У-333)
SiO <sub>2</sub> , %	85,0–90,0	88,0
CaO, %	1,0–5,0	<0,3
MgO,%	1.0–5,0	<0,3
R <sub>2</sub> O,%	<2.0	<1.8
Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г	15–20	40
Насыпная плотность, кг/л	0,17–0,20	0,15
Потери при прокаливании, масс. %	4,0	3,5–10,0
Размер первичных частиц, мкм	0,1	0,02–0,08
Размер агрегатов частиц, мкм	5–100	5–50
Активность по связыванию извести в 28 сут., мг/л	400	650

процесса, необходимо также учитывать и влияние предшествующей фазы. Это явление, названное Хюттингем «памятью материи», связано с тем, что при образовании твердой фазы атомы или ионы стремятся кристаллографически закономерно расположиться по отношению к исходной решетке. Форма и ориентировка зародышей новых фаз при кристаллизации в анизотропной среде должны соответствовать минимуму свободной энергии, что в свою очередь может быть достигнуто только при расположении атомов на соприкасающихся гранях новой и старой фаз (5).

В известной теории Рогинского, объясняющей влияние термической предистории твердых фаз на их активность, выделены следующие источники пересыщения: фазовые, структурные, химические и пересыщения дисперсности. Последние представляют собой избыточную энергию 1 моля вещества в данной степени дисперсности в сравнении с тем же количеством вещества в бесконечно большом куске. Таким образом, факт сохранения структуры клинкера, т.е. «термической истории» в цементном порошке после помола, имеет и теоретическое подтверждение.

Эта же теория позволяет сделать вывод о том, что для возникновения пересыщений всех видов формирование структуры твердых тел должно осуществляться в условиях, максимально отличных от равновесных и за счет изменения условий синтеза. С технологической точки зрения последнему условию отвечает наличие в твердеющих системах некоторого количества частиц нанодиапазона. Способы механоактивации и кавитационной обработки исходных цементных дисперсий позволяют получать такие высококонцентрированные вяжущие дисперсии, а затем на их основе и цементный камень с повышенными физико-механическими характеристиками (6).

С этих позиций следует комплексно изучать влияние и особенности минералогического состава цементного клинкера и условий его получения, высокодисперсного состояния вещества и его повышенной химической активности, а также поверхностных явлений на границах раздела фаз. Именно на этих границах происходят все химические реакции, образуются с учетом свойств поверхностных слоев сопряженных фаз продукты их взаимодействия, возникают коагуляционные, конденсационные и кристаллизационные контакты, обеспечивающие в последующем все свойства материалов. Элементы и эффекты нанотехнологии прослеживаются прежде всего на границах раздела фаз, где концентрация атомов и молекул, а также упорядоченность их расположения всегда меньше, чем в объеме. Это и вызывает их специфическое поведение в поверхностных слоях взаимодействующих фаз.

С реакционной способностью наночастиц связаны сегодня наиболее перспективные направления развития химии. Главной особенностью частицы нанометрового размера является то, что она сама представляет собой поверхность с уникальными свойствами. Такой подход дает возможность целенаправленно выбирать и вводить соответствующие компоненты с каталитическими свойствами в твердеющие системы, которые обеспечат прочные контакты на последующих этапах твердения.

Формирование структуры цементного камня происходит в двухфазной системе твердая – жидкая фазы. Отдельные явления взаимодействий, самопроизвольность и саморегулирование процессов структурообразования представляют собой последовательные звенья их развития во времени и пространстве.

Однако для всех процессов структурообразования характерной особенностью является их подчиненность законам физико-химического равновесия. А, учитывая весьма гетерогенный состав цементного клинкера, гидратацию цемента необходимо рассматривать как динамический процесс комплексных явлений упорядочения искусственно или естественно образующихся наноразмерных элементов.

Применительно к такой системе согласно правилу фаз Гиббса кристаллизация гидратных новообразований будет протекать на границе раздела фаз, т.е. на поверхности клинкерных зерен через растворение. Однако начальной стадией этого процесса служит твердофазовая реакция протонизации поверхностей клинкерных минералов. Из пересыщенного раствора на границе раздела фаз возникают активные центры роста – дефекты линейного и объемного типов и зародыши гидратных фаз, которые достаточно быстро приобретают форму чешуек для гидросиликатов кальция, гексагональных пластинок – для гидроксидов и гидроалюмоферритов кальция, а в присутствии гипса – призм этtringита (7). Появление поверхностного слоя новообразований способствует замедлению процесса гидратации в целом и приводит его к этапу, на котором скорость протекания лимитируется уже законами диффузионного массообмена. Кинетика этой стадии процесса структурообразования может управляться введением каталитических компонентов, в первую очередь с наночастицами.

Инструментальные методы нанотехнологии предоставляют возможность рассмотреть гидратацию частиц цемента и подробно описать его наноструктуру. Так, например, с помощью ядерного магнитного резонанса, используя пучок атомов азота, можно проследить взаимодействие частиц цемента вплоть до расположения атомов, можно зафиксировать образовавшиеся в ходе реакции различные поверхностные слои. Установлено, что поверхностный слой в 20 нм работает как полупроницаемая перегородка, которая позволяет воде проникать внутрь частицы цемента и выщелачивать ионы кальция. Более же крупные силикатные ионы цемента улавливаются за этим слоем. В ходе реакции под поверхностным слоем образуется силикагель, который вызывает набухание

цементных частиц и приводит к разрушению поверхностного слоя. Это разрушение позволяет поглощать силикатные ионы и формировать C-S-H-гель, который связывает частицы цемента вместе и отвечает за прочность бетона.

Детально рассмотрена наноструктура C-S-H, образовавшаяся при длительных сроках (восьмилетней) гидратации алита, белита и портландцемента в целом при  $V/C = 0,4$  при 20 и 80°C.

Методом просвечивающей электронной микроскопии исследован гидросиликатный гель (C-S-H) как в наружном, так и во внутреннем продуктах гидратации. Оказалось, что C-S-H внутреннего продукта. Образованный из больших частиц C3S, характеризуется морфологией, сложенной плотными мелкими частицами, а также скоплением мелких круглых частиц размером 4–6 нм. Волокна C-S-H внешнего продукта предположительно состоят из большого числа длинных тонких частиц, расположенных вдоль одной линии. Минимальный диаметр этих частиц, так же как частиц внутреннего продукта, составляет около 3 нм, их длина может составлять от нескольких до многих десятков нанометров.

Атомная микроскопия поверхности гидратированного алита показывает, что элементы дисперсной фазы (дисперсионной средой является насыщенный известковый раствор) существуют в виде агрегированных наночастиц C-S-H. Сеть пластинок наночастиц размерами 60x30 нм и толщиной около 5 нм и составляет гель C-S-H гидратированного цементного теста. Причем, этот гель необязательно рассматривать как аморфный. О его кристаллическом строении свидетельствуют соответствующие широкие рефлексы на дифрактограмме, связанные с малым размером связанных участков или наличием микродефектов либо с действием обоих факторов. Частицы C-S-H очень малы, поэтому если они представляют собой один кристалл толщиной 5 нм, этот размер соответствует двум кристаллическим ячейкам. Практически все эти частицы имеют наноразмер (8).

Таким образом, механизм гидратации минералов портландцемента – это типичная форма нанотехнологических процессов, проходящих на атомно-молекулярном уровне и в значительной степени зависящих от температуры, тонкости помола цемента, щелочности жидкой фазы цементного камня, времени, вида и количества добавок и др.

Идеальными кандидатами для применения наноправления и контроля свойств также являются бетоны с их сложной структурой, отдельные элементы кото-

Таблица 2

Свойства портландцементов с микрокремнеземом

Шифр цемента	Состав цемента, %		Удельная поверхность, м/г	Норм. густота цементного теста, %	Сроки схватывания, мин.		Активность, МПа, 28 сут	
	Клинкер+гипс	МК			начало	конец	изгиб	сжатие
1	100	-	0,34	26,0	194	380	7,0	42,1
2	95	5,0	0,46	26,0	213	356	8,7	48,3
3	90	10	0,51	26,0	272	301	8,6	50,5

рой имеют наноуровень: зерна исходного цемента (10–100 нм), гидратные фазы цемента с размером частиц 1–100 нм. Максимальную эффективность и рост прочности таких материалов может обеспечить комплексное использование химических добавок в сочетании с армированием цементного вяжущего трубками и стержнями нанодиаметров. Например, имеются данные о том, что присутствию углеродных нанотрубок в количестве 1% массы цемента уже в 14-суточном возрасте вызывает прирост прочности по сравнению с контрольными образцами. Углеродные нанотрубки могут представлять собой либо однослойную трубку, либо многослойную из свернутых в трубку листов, которые имеют по длине довольно большое количество дефектов, что и обеспечивает более высокий рост прочности по сравнению с введением однослойных трубок.

Современные виды особовысокопрочных бетонов с их высокими прочностными показателями, а также износостойкостью и химической стойкостью могут быть получены только путем контролирования в наномасштабе размеров пор в процессе формирования структуры и их распределения по размерам.

С использованием углеродных нанотрубок достигается также стабилизация структуры и устранение перфорации стенок пор при изготовлении высококачественных пенобетонов (9).

Интенсивно исследовались вопросы введения в бетонную смесь добавок наноразмерных частиц микрокремнезема.

Микрокремнезем образуется попутно в результате конденсации из газовой фазы при выплавке кремниевых сплавов (ферросилиция, силикохрома, силикомарганца и др.). Его положительное влияние на свойства бетона обусловлено тем, что состав его частиц на 90% и более представлен некристаллическим  $\text{SiO}_2$ , причем размер первичных частиц составляет порядка 100 нм, – это примерно в 100 раз меньше размеров цементных зерен. В составе бетона микрокремнезем выполняет одновременно роль ультрадисперсного наполнителя и активной добавки, способствуя формированию высокоплотной структуры камня и повышая адгезионное взаимодействие между цементным гелем и зернами заполнителя.

К преимуществам цемента с ультрадисперсными кремнеземами можно отнести хорошее диспергирование кремнезема в процессе помола цемента, обеспечивающее его последующее равномерное распределение в структуре бетона. Можно предположить, что цементы, содержащие добавки микрокремнезема, будут характеризоваться меньшей склонностью к высолообразованию, а также к щелочно-силикатной коррозии, вследствие связывания щелочей цемента в соединения, равномерно распределенные по всей структуре бетона.

Менее изучены применительно к цементной технологии ультрадисперсные кремнеземы гидрохимического синтеза, получаемые осаждением кремнезема из раствора силикатов натрия, с последующей промывкой и сушкой осадка. Эти продукты известны под торговой маркой «белая сажа» (БС). Основные

характеристики ультрадисперсных кремнеземов представлены в табл. 1 (10).

Увеличение прочности цементного камня (табл. 2) в этом случае объясняется коагулированием пор мелкими частицами микрокремнезема и образованием дополнительных количеств C-S-H при пуццолановой реакции микрокремнезема с  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Присутствие добавок микрокремнезема также снижает величину усадки бетона, его проницаемость, одновременно повышая его износостойкость и сцепление со стальной арматурой. Широкое применение добавок микрокремнезема в цементных бетонах на определенном этапе сдерживалось их относительно высокой стоимостью, однако этот фактор стал менее значимым на фоне удорожания всех компонентов бетонной смеси. Кроме того, в последние годы существенно возрос интерес к высококачественным бетонам.

Цементы с добавкой высокоактивных кремнеземов имеют специальную область применения, связанную с производством высококачественных бетонов, а их использование в качестве общестроительных цементов требует дополнительной оценки, исходя из технологических и экономических факторов (11).

Изучено влияние на гидратацию портландцемента размеров частиц доменного шлака и других минеральных добавок; установлено, что более мелкие частицы минеральных добавок реагируют быстрее и способствуют достижению большей прочности. Причем, различные протекающие в цементе и бетоне процессы, как, например, кинетику гидратации, образование трещин и пор, взаимодействие цемента с минеральными добавками, образование C-S-H структуры, взаимодействие щелочи с кремнеземом трактуют, используя понятия макро- и микропереноса.

Уже установлены основные закономерности реологических свойств высококонцентрированных вяжущих суспензий (ВКВС) силикатного и алюмосиликатного составов путем регулирования содержания в системе определенного количества наночастиц. На основе комплексного воздействия трех механизмов (структурно-механического, электростатического и адсорбционно-сольватного) разработан принцип оптимизации структуры ВКВС. Пластификация ВКВС достигается совместной модификацией добавками природных глин (естественные наносистемы) и комплексных дефлокулянтов, состоящих из триполифосфата натрия и суперпластификаторов. Такие физико-химические методы управления структурой в этих системах позволяют существенно снизить пористость и на 30–40% увеличить физико-механические показатели.

На данном примере доказана возможность модификации структуры ВКВС за счет введения определенного количества наночастиц с оптимальными размерами и формой, что позволяет получать на их основе высокоэффективные материалы (12).

В настоящее время эти процессы изучают на наноуровне с помощью растровой электронной микроскопии, малоуглового нейтронного рассеяния и других современных методов. Благодаря использованию растровой электронной микроскопии стало возможным получить изображение большинства высококон-

центрированных дисперсных систем в естественном состоянии, что обеспечивает более достоверную информацию об их структуре на наноуровне. С учетом таких данных предложена разработка имитационно-численной модели наноструктуры цементного геля, позволяющая имитировать механизмы влажностной усадки, обусловленной капиллярным давлением и изменением свободной поверхностной энергии. Распределение пор геля по размерам, определенное при помощи протонного магнитного резонанса, показывает, что значительный объем порового пространства цементного камня в 28-суточном возрасте составляют поры радиусом 0,85 нм. Такая величина радиуса пор указывает на то, что размер элементов структуры геля должен составлять при этом порядка 4–5 нм (13).

Применение нанотехнологий для усовершенствования вяжущих подтвердило фундаментальный принцип индустрии наносистем о том, что ранее неизвестные свойства материалов и систем проявляются при переходе к искусственно или естественно упорядоченным объектам из наноразмерных элементов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ч.Пул–мл., Ф. Оуэнс. Нанотехнологии. Издание 3-е, исправленное и дополненное. – М: Техносфера, 2007. – 376 с.
2. Кремьянский В.И. Структурные уровни живой материи. – М.: Наука, 1969. – С. 81.
3. Тейлор Х.Ф.У. Химия цементов/перевод с англ. под ред. д-ра техн.наук Ю.М.Бутта.-М.: изд-во лит-ры по стр-ву, 1969. – 500 с.
4. Пащенко А.А., Сербин В.П., Старчевская Е.А. Вяжущие материалы: издат-е объединение «Вища

школа», 1975. – 444 с.

5. Шпынова Л.Г. Микроструктура и прочность цементного камня.-Львов: Изд-во Львовского ун-та, 1966. – 237 с.
6. Третьяков Ю.Д., Лепис Х. Химия и технология твердофазных материалов: Учеб.пособие. – М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1985. – 256 с.
7. Федоткин И.М. Исследованные процессы и установленные эффекты. – К.: Изд-во «Химджест», 2000. – 291 с.
8. Физико-химические основы формирования структуры цементного камня / Под ред.Л.Г.Шпыновой – Львов: Вища школа. Изд-во при Львов. Ун-те, 1981. – 160 с.
9. Nanotechnologien in der Bauchemie // Zement-Kalk-Gips Internationalю. – 2007. – №12. – С. 21–25.
10. Шишкина А.А. Пенобетоны с повышенными физико-механическими свойствами / А.А. Шишкина // Вісник Донбаської державної академії будівництва і архітектури. Вип. 2008-1(69) “Сучасні будівельні матеріали. Композиційні матеріали для будівництва” — Макпва: ДонНАБА, 2008. – С. 48–57.
11. Брыков А.С., Камалиев Р.Т., Корнеев В.И., Мокеев М.В. Влияние ультрадисперсных кремнеземов на гидратацию портландцемента и состав цементного камня // Цемент и его применение. – 2009. – Вып. 1. – С. 91–93.
12. Шаповалов Н.А., Строкова В.В., Череватова А.В. Управление структурой и свойствами высококонцентрированных дисперсных систем с использованием нанопроцессов и нанотехнологий // Промышленное и гражданское строительство. 2007. -№8.- С. 17–19.
13. Комохов П.Г. Харитонов А.М. Имитационно-численная модель наноструктуры и свойств цементного камня // Изв.вузов. Строительство. 2008. – №4. – С. 10–16.

УДК 666.942.82 : 544.77

Дорогань Н.О., аспірант;

Миронюк О.В., канд. техн. наук;

Черняк Л.П., доктор техн. наук, Національний технічний університет України “КПІ”, м. Київ

## КОАГУЛЯЦІЙНА СТРУКТУРА ШЛАМУ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ БІЛОГО ЦЕМЕНТУ

### Вступ

Технологія виробництва білого цементу характеризується обмеженнями за хімічним складом вихідної сировини, введенням мінералізаторів для зменшення максимальної температури випалу клінкеру, операціями по його відбілюванню [1–3]. Необхідність гомогенізації сировинної суміші при введенні малих добавок речовин-мінералізаторів обумовлює доцільність застосування мокрого або комбінованого способів виробництва, при цьому оптимізація технологічних параметрів вимагає урахування показників структурно-механічних і реологічних властивостей цементного шламу, в напрямку чого виконана подана робота.

### Характеристика сировини і клінкеру

Відповідно до вимог хімічної технології виробництва білого цементу по мінімізації вмісту барвних оксидів в

вихідній сировині в роботі застосовували матеріали родовищ України: збагачену новгород-сіверську крейду (табл. 1), збагачений каолін, кварцовий пісок.

Розрахунок складу сировинної суміші для виготовлення клінкера білого цементу було проведено на основі аналізу хімічного складу проб компонентів при заданих значеннях коефіцієнта насичення  $KH = 0,87$  і силікатного модуля  $n = 3,4$  (табл. 2, 3).

Розрахований таким чином склад сировинної суміші АМ5 містить, мас. %: крейда ММС-1 80,2, каолін КС-1 8,8, пісок кварцовий 11,0. При цьому значення коефіцієнта насичення  $KH = 0,87$ , силікатного  $n = 3,4$  і глиноземного  $p = 27,0$  модулів відповідають характеристикам білого цементу.

### Хімічний склад сировинної суміші та клінкеру

Прийнятий в роботі для порівняння шлам сировинної суміші  $N_p$ , що застосовується в діючому