

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ, МОЛОДЕЖИ И
СПОРТА УКРАИНЫ
ОДЕССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ
СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ**

На правах рукописи

КСЁНШКЕВИЧ ЛЮБОВЬ НИКОЛАЕВНА

УДК 666.974.6

**ВЫСОКОПРОЧНЫЕ БЕТОНЫ НА
МЕХАНОАКТИВИРОВАННОМ ВЯЖУЩЕМ**

05.23.05 – строительные материалы и изделия

**Диссертация на соискание научной степени
кандидата технических наук**

**Научный руководитель:
БАРАБАШ
Иван Васильевич
доктор технических наук,
профессор**

Одесса-2012

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
РАЗДЕЛ 1	АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ	
	ИССЛЕДОВАНИЙ	8
1.1	Высокопрочные бетоны. Перспективы развития.....	8
1.2	Методы и способы активации минеральных вяжущих.....	13
1.3	Активные минеральные добавки и их роль в структурообразовании твердеющих цементных систем.....	22
1.4	Влияние микрокремнезема на свойства бетона.....	28
1.5	Раздельная технология приготовления бетонных смесей.....	35
1.6	Основная гипотеза.....	41
РАЗДЕЛ 2	МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ	
	ИССЛЕДОВАНИЙ	44
2.1	Основные этапы исследований.....	44
2.2	Характеристики материалов, применяемых в исследованиях.....	46
2.3	Методики исследований.....	47
2.4	Обработка результатов эксперимента	53
РАЗДЕЛ 3	ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕМЕНТНЫХ СУСПЕНЗИЙ С	
	ДОБАВКОЙ МИКРОКРЕМНЕЗЕМА	54
3.1	Влияние микрокремнезема на эффективную вязкость механоактивированных цементных суспензий	54
3.2	Влияние механоактивации на сроки схватывания, пластическую прочность и тепловыделение наполненных микрокремнеземом цементных суспензий ...	62

3.3	Влияние содержания микрокремнезема в вяжущем на прочность цементного камня	66
3.4	Физико-химические исследования фазового состава и структуры цементного камня с содержанием микрокремнезема	79
	Выводы по разделу 3.....	89
РАЗДЕЛ 4	СВОЙСТВА ВЫСОКОПРОЧНЫХ БЕТОНОВ НА МЕХАНОАКТИВИРОВАННЫХ ВЯЖУЩИХ.....	90
4.1	Планирование и реализация трехфакторного эксперимента	91
4.2	Влияние рецептурно-технологических факторов на физико-механические свойства высокопрочного бетона..	95
4.3	Влияние механоактивации на кинетику набора прочности бетона	97
4.4	Критерий эффективности использования вяжущего с добавкой микрокремнезема.....	105
4.5	Технико-экономическая эффективность механоактивации вяжущего в присутствии органо-минеральной добавки	106
4.6	Выбор оптимального состава высокопрочного бетона...	108
4.7	Оборудование для приготовления бетонных смесей по раздельной технологии.....	113
4.8	Технологическая схема получения механоактивированного вяжущего с добавкой микрокремнезема.....	115
	Выводы по разделу 4.....	121
	ОБЩИЕ ВЫВОДЫ.....	122
	ЛИТЕРАТУРА.....	124
	ПРИЛОЖЕНИЕ.....	143

ВВЕДЕНИЕ

Благодаря своим превосходным свойствам – отличному соотношению прочности к средней плотности, высокой плотности и долговечности – высокопрочный бетон все чаще используется для решения различных практических задач строительства.

Актуальность темы. Применению в отечественной практике строительства бетонов высоких марок способствует все более широкое использование высокоактивных цемента, совершенствование технологических процессов при изготовлении бетонной смеси.

В то же время получение высокоактивного портландцемента, связано, в основном, с увеличением его дисперсности и повышением содержания C_3S а также с целым рядом трудностей технического и технологического порядка. Насущная необходимость получения высококачественных бетонов на базе рядовых цементов заставляет искать новые технологические приемы и, в частности, использование органоминеральных добавок (ОМД). Введение в портландцемент реакционноспособного микрокремнезема совместно с высокоэффективным химическим модификатором обеспечивает направленное структурообразование твердеющего цементного камня, повышение его плотности и прочности. Значительно усиливает эффект от совместного введения в портландцемент микрокремнезема и органического модификатора механоактивация вяжущего в турбулентных потоках, которые обеспечиваются конструктивными особенностями скоростного смесителя.

Известный способ механоактивации вяжущего без существенного разрушения частиц портландцемента [1] достаточно легко вписывается в существующие схемы получения растворных и бетонных смесей.

Связь с научными темами, планами, программами. Диссертационная работа связана с госбюджетной темой № 78 (0100U002702) «Анализ механизмов формирования технологической наследственности и ее влияние на основные свойства строительных материалов и конструкций» и с

тематикой кафедры Городского строительства и хозяйства «Механохимическая активация минеральных вяжущих веществ».

Цель работы и задачи исследований. Целью работы является повышение эффективности использования рядового портландцемента в высокопрочных бетонах за счет его механоактивации и модификации органо-минеральной добавкой.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи исследований:**

- проанализировать механизмы механоактивации суспензий портландцемента с добавкой микрокремнезема и суперпластификатора С-3;

- исследовать влияние режимов механоактивации, количества микрокремнезема и С-3 на изменение эффективной вязкости суспензий вяжущего;

- исследовать влияние режимов механоактивации на свойства твердеющего портландцемента, модифицированного органо-минеральной добавкой;

- выяснить влияние механоактивации на гидратообразования твердеющего цементного вяжущего;

- оптимизировать составы высокопрочного бетона на механоактивированном вяжущем с учетом ресурсосбережения;

- провести опытно-промышленную проверку лабораторных исследований.

Объект исследований – процессы, происходящие при механоактивации суспензий портландцемента с органо-минеральной добавкой и свойства затвердевших композитов.

Предмет исследования – цементный камень и бетоны на механоактивированном портландцементе с органо-минеральной добавкой.

Методы исследований. В соответствии с задачами исследований в работе использовались стандартные методы экспериментальных исследований. Для отображения структуры, новообразований цементного

камня использовались методы физико-химического анализа – дифференциально-термический, рентгенофазовый и микроскопический.

Для выяснения роли механохимической активации на эффективную вязкость суспензий вяжущего, физико-механические характеристики цементного камня и бетона была разработана специальная конструкция скоростного смесителя с регулируемым количеством оборотов рабочего органа камеры смешения.

Оценка текучести технологических смесей проводилась по кривым эффективной вязкости. Обработка результатов эксперимента проводилась с использованием методов математической статистики. Оптимизация составов органо-минеральной добавки и бетонов на механоактивированном вяжущем проведена с использованием математических моделей.

Научная новизна полученных результатов:

- установлены оптимальные режимы активации цементосодержащих суспензий с органо-минеральной добавкой, обеспечивающее предельно-возможное разрушение начальной структуры системы;

- выявлен синергетический эффект снижения вязкости цементосодержащих суспензий с добавкой микрокремнезема при совместном воздействии на неё скоростного смешения и суперпластификатора С-3;

- доказана правомерность предложенной концепции повышения прочности бетона за счет механоактивации портландцемента, модифицированного органо-минеральной добавкой;

- определены количественные значения органо-минеральной добавки, обеспечивающей получение высокопрочного бетона класса С35/45...С90/105 на механоактивированном вяжущем.

Практическое значение полученных результатов:

- оптимизированы режимы скоростного смешения суспензий портландцемента с органо-минеральной добавкой, обеспечивающее максимальное снижение их эффективной вязкости;

- установлено оптимальное содержание органо-минеральной добавки, обеспечивающее получение высокопрочного бетона на рядовом механоактивированном портландцементе;

- разработаны составы высокопрочных бетонов (45...105МПа) на механоактивированном вяжущем с органо-минеральной добавкой;

- оптимизированы рецептурно-технологические факторы получения высокопрочного бетона на механоактивированном вяжущем с органо-минеральной добавкой и определена технико-экономическая эффективность разработанных составов высокопрочного бетона.

- осуществлено внедрение результатов исследований в производство.

Личный вклад соискателя. Основные результаты диссертационной работы были получены соискателем научной степени кандидата технических наук самостоятельно.

Рассмотрены вопросы приготовления бетонной смеси по отдельной технологии с использованием скоростного смесителя и механизмы механохимической активации цементных суспензий. Обнаружено влияние содержания микрокремнезема и концентрации С-3 на смену эффективной вязкости цементосодержащих суспензий. Установлено влияние режимов механоактивации суспензий на показатели прочности цементного камня и бетона на его основе. Оптимизированы составы высокопрочных бетонов на механоактивированном вяжущем. По результатам экспериментальных исследований на производственных площадях ЗАО «ПК» осуществлен опытно-промышленный выпуск бетонной смеси общим объемом 15 м³ за разрешением технологии с использованием высокоскоростного смесителя для изготовления монолитных колонн из бетона класса С35/45.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 11 научных работ в профессиональных научно-технических изданиях Украины.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературных источников и приложения. Диссертация изложена на 145 страницах из них 11 таблиц, 49 рисунков, 19 страниц списка использованных источников из 184 наименований, 3 страницы приложений.

РАЗДЕЛ 1

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Высокопрочные бетоны. Перспективы развития

Термин “высокопрочный бетон” в настоящее время - является условным понятием, которое не ограничивается суждением лишь о его высокой прочности [2]. Высокопрочным считается бетон, прочность которого равна либо выше активности исходного цемента. Кроме этого, материал должен обладать улучшенными физико-механическими свойствами такими, как: прочность, деформативность, долговечность, плотность, коррозионная стойкость.

Пределы прочностных характеристик таких бетонов условны, они зависят от уровня развития науки и техники в области производства цемента, бетона и железобетона. Еще недавно к высокопрочным относились бетоны класса C25/30, сейчас этот класс бетона широко вошел в практику и стал обычным. С повышением активности выпускаемых цементов и увеличением объема их производства к высокопрочным бетонам будут относиться бетоны класса C55/67 и выше.

Впервые термин «высокопрочный бетон» был введен в 1929 г. в США [3, 4], где для высотного строительства исследовались новые составы бетонов и где в лабораторных условиях еще в 30-е годы были получены бетоны, прочность на сжатие которых достигала 130 МПа. В Европе, в частности в ФРГ, первые высокопрочные бетоны были получены в 40-е годы, опять же в лабораторных условиях [3, 5, 6]. Если в 1966 г. была достигнута прочность 140 МПа в лаборатории, то в 1988 г. уже в промышленных условиях производились тубинги из бетона B85 [5, 6].

Согласно работе О.Я. Берга [7] Первые высокопрочные бетоны получали, применяя жесткие смеси, особые способы уплотнения, автоклавное твердение. Поскольку было установлено, что в бетоне самым слабым элементом является цементный камень [8 - 12, 14], прочность

которого напрямую зависит от водоцементного отношения, то понизить это отношение сколько возможно представлялось вполне естественным стремлением.

Два решающих фактора привели к применению в 70-е годы высокопрочных бетонов в строительстве [8, 13]. Во-первых, это открытие в Японии и ФРГ того явления, что при добавлении в бетонную смесь органических соединений на основе нафталинформальдегида или меламинформальдегида значительно повышают ее подвижность [3]. Во-вторых, был открыт микрокремнезем как добавка в бетон [15, 16].

Высокопрочные бетоны можно рассматривать как пятикомпонентную систему, состоящую из цемента, воды, заполнителя, минеральных добавок, пластификаторов [17, 18].

Высокопрочные бетоны получают за счёт выбора качественных сырьевых материалов с установлением оптимального соотношения между компонентами, а также за счёт применения специальных технологических приёмов [18, 19].

В качестве вяжущего, применяют пластифицированный, гидрофобный или обычный портландцементы, которые должны иметь наибольшую возможную активность и наименьшую нормальную плотность. Рекомендуются цементы, у которых нормальная плотность цементного теста не более 25—26% и активность не ниже 500—600 [7, 20]. При выборе портландцемента следует обратить внимание на следующие позиции [21]:

- совместимость портландцемента и пластификатора;
- водопотребность или тонкость помола;
- характер нарастания прочности и желаемое значение конечной прочности;
- характер выделения тепла в процессе гидратации с учетом размеров строительной конструкции.

Высокопрочные бетоны наиболее целесообразно производить на высокоактивных портландцементях (ВПЦ), которые выпускаются в

настоящее время отечественной цементной промышленностью [7, 18, 22, 23]. Достаточно быстрое нарастание прочности в раннем возрасте позволяет сократить до минимума использование различного рода ускорителей твердения бетона.

Для приготовления высокопрочного бетона используются природные, искусственные (или их смеси) фракционированные кварцево-полевошпатовые пески, поставляемые в виде двух фракций — крупной (размерами зерен от 1,25 до 5 мм) и мелкой (размерами зерен от 1,4 до 0,63мм) [7, 19, 24]. В крупной фракции наличие зерен более 5 мм, а в мелкой менее 0,14 мм не допускается, при этом содержание отмучиваемых примесей в песке не должно превышать 1 % по весу.

После расчета ориентировочного состава бетонной смеси и определения суммарного расхода крупного и мелкого заполнителей отыскивают оптимальные соотношения [2, 20, 24]:

- между крупной и мелкой фракциями в песке по наибольшему объемному весу сухой смеси;
- между песком и щебнем по наибольшей удобоукладываемости бетонной смеси при одном и том же расходе цемента и воды.

Если полученная таким образом удобоукладываемость бетонной смеси не соответствует заданной, то состав корректируют, уменьшая или увеличивая расход цементного теста, при неизменном В/Ц.

В качестве минеральных добавок при производстве высокопрочных бетонов используются: микрокремнезем, зола-унос каменного угля, метакраин, нанокремнезем (кремневая кислота) и каменная мука (кварцевая и известняковая мука) [15, 16, 25, 26]. Микрокремнезем имеет в данном контексте особое значение: сферические частицы микрокремнезема диаметром примерно 0,1 микрометра заполняют пустоты между частицами цемента и усиливают сцепление между зернами заполнителя и цементным камнем за счет разрушения низкопрочных кристаллов портландита (пуццолановая реакция) [27 - 30].

Обязательным условием при изготовлении высокопрочных бетонов является использование пластификаторов в качестве химических добавок [8, 31]. Особой популярностью пользуются пластификаторы на основе сульфонатов нафталина и меламина (действие осуществляется за счет электростатического отталкивания одинаково заряженных ионов на поверхности частицы, а также за счет уменьшения поверхностного натяжения воды) [8, 32].

Качество бетона подобранного оптимального состава контролируют путем приготовления в цеховой бетономешалке пробных замесов с расчетным В/Ц, а также с уменьшенным и увеличенным на 0,02 расчетного. При этом удобоукладываемость смесей сохраняют неизменной и равной заданной, корректируя соответствующим образом расходы воды и цемента. Из каждого замеса готовят партии контрольных образцов. Количество образцов в партии определяют в зависимости от технологических условий производства конструкции на предприятии.

По мнению Ю.М. Баженова, С.С. Каприелова [18, 33, 34] для достижения наилучших результатов при производстве новых видов бетона, изделий и конструкций получает развитие интенсивная технология бетона. В ней используется механохимическая активация сырьевых смесей [1, 35 - 37], скоростные турбулентные смесители [38], электроимпульсные и волновые агрегаты [39], компьютерное управление технологией и качеством материала [40], пропитка готовых изделий и конструкций специальными глубоко проникающими и отверждающимися композициями, близкими по структуре и свойствам к бетону [41], использование новых материалов, полученных в результате развития нанотехнологий [42], и другие технологические приемы.

Области применения высокопрочного бетона в современном строительстве постоянно расширяются [8, 43]. В перспективе намечается использование высокопрочных бетонов (тяжёлых и лёгких), а также бетонов с заданными физико-техническими свойствами: малой усадкой и ползучестью, морозостойкостью, долговечностью, трещиностойкостью,

теплопроводностью, жаростойкостью и защитными свойствами от радиоактивных воздействий. Для достижения этого потребуется проведение широкого круга исследований, предусматривающих разработку важнейших теоретических вопросов технологии тяжёлых, лёгких и ячеистых бетонов: макро- и микроструктурной теорий прочности бетонов с учётом внутренних напряжений и микротрещинообразования, теорий кратковременных и длительных деформаций бетонов и др.

По мнению [44] А.П. Пустовгар эффективность, достигаемая при применении высокопрочного бетона, обусловлена тем, что при более высокой стоимости данного материала по сравнению с бетонами низких классов уменьшается требуемое из расчета на прочность сечение несущей конструкции. Наибольший эффект достигается при использовании особо высокопрочного, тяжелого бетона в конструкциях колонн высотных зданий за счет снижения количества арматуры и уменьшения сечения колонны [45]. Использование легких высокопрочных бетонов наиболее эффективно в междуэтажных перекрытиях и ограждающих конструкциях высотных зданий, при этом наряду со снижением массы конструкций применение легких высокопрочных бетонов обеспечивает также снижение уровня шума и энерго- и теплотрат при эксплуатации здания [46].

Высокопрочный бетон является дальнейшим эмпирически обоснованным развитием нормальных бетонов. Для применения высокопрочного бетона в странах ЕС установлены практические правила, позволяющие использовать эти бетоны при строительстве высотных зданий, мостов, дорог, буровых платформ и пр. [47 - 49].

Высокопрочные бетоны и новые технологии позволят обеспечить коренное улучшение зданий жилого фонда и социального назначения: увеличение их долговечности, безопасности, создание зданий нового типа с долговечным каркасом.

Высокопрочный бетон в сочетании с другими эффективными бетонами позволит создать "дом XXI века", в котором высокопрочный каркас с

долговечностью более 200 лет будет сочетаться с эффективными ограждающими конструкциями из суперлегкого и декоративного бетонов и с периодически обновляемыми инженерными сетями и отделкой, что даст возможность получить архитектурно выразительное быстровозводимое и легко трансформируемое комфортабельное жилье, а также развить объекты социальной сферы, подземные "мини-города", специальные и другие сооружения.

1.2 Методы и способы активации минеральных вяжущих

Способы активации процессов твердения и структурообразования цементно-водных суспензий весьма разнообразны и объединены лишь общностью технологической цели. Поэтому рассматриваются независимые объяснения влияния механохимического [35, 50], гидравлического [51], магнитного, термического [52, 53], электрогидравлического, химического типов активации на процессы твердения цементно-водных систем. Способы управления процессами структурообразования и механическими свойствами материалов, основанные на модифицировании дисперсных структур в начальных стадиях их развития, а также изменение свойств воды затворения под воздействием введённых малых добавок электролитов, коллоидных частичек, оптимальных механических, тепловых, магнитных и других факторов открывают новые пути синтеза прочности и других свойств материалов на основе минеральных вяжущих веществ [36, 54 - 56]. Можно показать несколько способов изменения интенсивности реакции гидратации: изменение температуры и особенно – изменение энергии активации. Первый из них – изменение температуры – широко применяется в настоящее время, но наибольший интерес представляет изменение энергии активации или иными словами – снижение высоты энергетического барьера. Многочисленные исследования активации при помеле в присутствии органических веществ с различными минеральными соединениями –

вяжущими, силикатами, карбонатами, алюмосиликатами [57 - 59] показали, что таким путём достигается снижение энергозатрат на измельчение материалов, улучшается их дисперсный состав и лиофилизируется поверхность, вследствие чего дольше сохраняется активность вяжущих веществ, улучшаются реологические и физико-механические свойства композиционных материалов. Широко применяется виброактивация цементных растворов и бетонов [60 - 64], обуславливающая не только повышение прочности и плотности материалов, но и регулирование реологических свойств и кинетики процессов твердения. Многочисленные примеры разнообразных приложений принципов создания регулируемого динамического состояния дисперсных систем лежат в основе новых методов и высокоинтенсивных технологий получения и переработки дисперсных систем и композиционных материалов [37, 65 - 68]. Было показано [69], что активированные при механическом разрушении поверхностные слои частиц интенсивно взаимодействуют с молекулами внешней среды – жидкости и её пара. Сорбируемые на активированной поверхности частиц молекулы подвергаются механодеструкции, их фрагменты химически связываются с механически активированным веществом поверхностных слоёв частиц и глубоко в них проникают. Скорость их диффузии в активированных пластическим деформированием деструктурированных слоях частиц на несколько порядков превосходит скорость диффузии в твёрдых телах в нормальных условиях. Результирующий энергетический эффект уменьшения работы предельного пластического деформирования на несколько порядков превосходит возможный эффект снижения поверхностной энергии [70, 71].

Значительный интерес представляют физические и физико-химические методы активации компонентов цементных смесей. По мнению С.П. Зубрилова [72] в составе физических методов активации большое внимание уделяется ультразвуковой обработке водных и цементно-водных растворов. Ультразвуковая обработка позволяет диспергировать частицы цемента, а также интенсифицировать процессы смешения и гомогенизации

смесей. Авторами И.Г. Гранковским и Д.И. Штакельбергом [73 - 75] проведены исследования активации цементного теста аэрогидродинамическими излучателями, а также магнитно-механических, электрогидравлических и комплексных термическо-электрических воздействий на растворы и бетоны.

Электроактивация известково-кремнезёмистых смесей приводит к увеличению концентрации и времени жизни активных центров, что повышает реакционную способность системы. При этом в дисперсной системе наблюдаются колебания проводимости, которые хорошо коррелируют с колебаниями температуры исследуемых образцов. При электрогидравлической обработке отмечено ускорение гидратации клинкерных минералов и отсутствие сообщающихся пор в структуре цементного камня [76]. Модифицирование электроповерхностных свойств дисперсных компонентов бетона с помощью различных ПАВ, электролитов и их комбинаций в том числе в сочетании с электрофизическими воздействиями позволяет повысить однородность и начальную плотность матрицы бетона, интенсифицировать гидратацию цемента, вовлечь в сферу производства различные отходы промышленности [77, 78].

Авторами [74] наблюдалась диспергация частиц при пароразогреве тампонажных растворов вследствие возникновения растягивающих и сжимающих напряжений за счёт периодичности нагревания – охлаждения и прямого механического воздействия струи пара. В рассматриваемом исследовании термическое воздействие оценивается как фактор, увеличивающий прочность цементного камня, однако существенную роль в данном случае играет скорость разогрева смеси, состояние системы в период температурного воздействия, энергия механического воздействия и вещественный состав исходной смеси. Влияние реологических свойств прослоек жидкости между контактирующими твёрдыми телами сильно зависит от концентрации поверхностно-активного компонента и от структуры молекул растворителя [79, 80]. Наибольшее значение в вяжущих

системах, благодаря непрерывному изменению поверхностной энергии гидратирующихся частиц, приобретают электроповерхностные неравновесные силы, силы взаимодействия электрических и магнитных диполей и силы, возникающие в жидких слоях между взаимодействующими поверхностями. По данным работ А.Ф. Скрышевского и К.М. Королева [81, 82] в процессах, определяющих структурообразование в вяжущих системах на ранних стадиях, следует выделить водородные связи, поляризацию и структурирование воды между взаимодействующими частичками. Введение поверхностно-активных веществ и высокомолекулярных соединений в раствор вызывает изменение химических потенциалов компонентов, возникновение осмотических сил, в растворах ПАВ происходит значительное изменение структуры воды с увеличением её льдоподобности или её разупорядочение в зависимости от их природы и концентрации. Во всех этих процессах огромную роль играет полиморфизм граничных жидких слоёв [83]. Разупорядочение структуры воды, повышение доли свободных молекул обуславливают возрастание активности химического структурообразующего компонента в вяжущих системах, что приводит к более интенсивному структурообразованию на ранних стадиях и росту прочности готового материала [84 - 86].

Разупорядочение структуры воды вначале и последующее её структурирование вызывает также оптимальная обработка воды в электрических и магнитных полях. В адгезионных соединениях в результате более полного использования поляризационных явлений имеется значительный резерв повышения прочности минеральных вяжущих систем. Это подтверждается примером исследований В. Рамачандранова [87] армирования цементной матрицы стекловолокном с полимерной защитой. Образующаяся у поверхности волокна цементная клеевая прослойка с модифицированными гидратами обладает повышенной прочностью, адгезионной способностью, непроницаемостью. Введение ионов, частиц примесей, электрические, магнитные воздействия приводят к упорядочению

или разупорядочению структуры воды, что отражается на её упругих и релаксационных характеристиках и соответственно на кинетике структурообразования вяжущих систем, затворённых на модифицированной воде [88 - 90]. Показано, например, что вода с оптимально уменьшенным значением модуля упругости, т.е. более разупорядоченная приобретает повышенную активность как растворитель и химический компонент. Продолжительность и характер развития ранних стадий структурообразования в зависимости от условий гидратации при различных параметрах гидродинамических [91] и ультразвуковых [92] воздействий могут изменяться в широких пределах, что определяет режимы технологических воздействий при такой активации. При исследовании цементов с малыми добавками полимеров [93, 94] показана зависимость прочности цементного камня и его водонепроницаемости от продолжительности первой стадии структурообразования. Здесь также наблюдается экстремальный переход, свидетельствующий о том, что физико-механические свойства цементного камня обусловлены развитием его дисперсной структуры, начиная с ранних стадий, и что в конце первой стадии образуется матрица дисперсной структуры, определяющая дальнейшее её развитие. По данным работ П.П. Будникова и В.И. Колобердина [95, 96] прочность затвердевшего материала после деформирования дисперсий на основе цемента зависит от скорости и продолжительности деформирования. Если деформирование проходит в течение времени, не превышающего продолжительности первой стадии добавки различных минералов, как показано в [97 - 99] сокращают продолжительность первой стадии структурообразования и, следовательно, время приложения механической активации, которая и в этом случае даёт дополнительный прирост прочности. Подобные результаты оптимальной вибрационной активации получены и на образцах бетона с малыми добавками полимеров и глицерина в композиционных материалах, армированных стекловолокном [100], а также при формировании цеолитных гранул адсорбентов на цементной связке.

Отдельное направление представляет исследования магнитных воздействий на цементные и цементно-песчаные растворы, в которых установлено, что магнитная обработка наиболее эффективна в конце первой стадии структурообразования [101 - 103]. В последние годы получила развитие активация компонентов бетонной смеси источниками высоких энергий, в частности, применение высоковольтного электрического разряда [104]. Работы В.И. Соломатова, С.В. Коваля, Г.П. Бойко, И.Г. Гранковского [105 - 107] в этом направлении свидетельствуют о возможности значительного повышения прочности бетона, а также замены части цемента минеральными добавками.

Перспективным направлением можно считать механохимическую активацию полиминеральных и полидисперсных вяжущих, связанную с механической обработкой поверхности без их разрушения.

При рассмотрении возможных механизмов механохимической активации полиминеральных и полидисперсных систем примем:

- 1) механохимическая активация частиц дисперсной фазы реализуется за счет их взаимного столкновения;
- 2) механохимическая активация частиц дисперсной фазы происходит в среде, с которой должны взаимодействовать частицы;
- 3) эффективность механоактивации пропорциональна площади поверхности механически обработанных частиц.

1. Столкновением частиц называют процесс, в котором в начальный момент частицы являются свободными. При этом импульс частиц ориентированы таким образом, что частицы начинают взаимодействовать друг с другом. Различают:

- а) упругое столкновение, в результате которого внутреннее состояние частиц не меняется;
- б) неупругое столкновение, при котором внутреннее состояние изменяется;
- в) столкновение слипающихся частиц;

г) неупругое столкновение без слипания частиц.

Как правило, описание процесса столкновения любого вида сводится к определению импульсов частиц до и после столкновения (макроскопических состояний) при известных массах частиц m_i и скорости их движения v_i . В результате подобных столкновений может произойти упругий или неупругий отскок (рис.1.1.а), слипание частиц (рис.1.1.б) и разделение частиц на части с образованием новой поверхности (рис.1.1.в). Как правило, разрушение частиц, происходит при их соударении со скоростью $V > 80$ м/сек, или при ударе частиц с такой же скоростью с рабочим органом смесителя, или при попадании частиц между мелющими телами. В силу того, что подобные столкновения ведут к образованию новой поверхности раздела за счет измельчения частиц дисперсной фазы, они будут исключены из дальнейшего анализа.

Изменение модели взаимодействия двух тел позволяет выделить локальную площадь взаимодействия соизмеримую с площадью элементарных частиц. Если принять, что сила взаимодействия P отличается от 0, $P \neq 0$, то при площади взаимодействия $S \rightarrow 0$, возникающие напряжения σ стремятся к значительной величине: $\sigma = P/S$, при $S \rightarrow 0$, $\sigma \rightarrow \infty$.

Возрастание P приводит к возрастанию напряжений σ_n , вызывающих пластическое деформирование зоны контакта. Такое взаимодействие приводит к возникновению трибоэффектов, вызывающих локальное повышение температуры до $T=1000^\circ\text{K}$, появление жесткого и мягкого излучения, появления трибоплазмы, искажение кристаллической решетки, появление микротрещин, рис.1.1.г.

Совокупные явления и процессы взаимодействия частиц при их столкновении приводят к аморфизации поверхности и повышению, тем самым, ее реакционной способности. Конечной целью столкновения частиц должно быть достаточно полное модифицирование частиц дисперсной фазы, рис.1.1.д.

2. Время «жизни» активированного состояния обработанной поверхности твердых тел ограничено и составляет от $\tau_a=10^{-5}$ сек до $\tau_a=10^5$ сек. Это ограничивает способы полной реализации трибоэффектов в процессах, связанных с технологическими запасами материала. В случае, если активация поверхности твердого тела происходит в среде, с которой она химически взаимодействует, то время возбужденного состояния практически не играет роли. Поэтому столкновение частиц вяжущего должно происходить в воде затворения. Это должно вызвать ускорение процессов растворения и явлений гидратообразования.

Кроме того, ускорение диффузионных процессов по зонам микродефектов, которые превышают на несколько порядков по сравнению с диффузией через объем, углубляет фронт реакционной зоны. Если предположить, что микродефекты неравномерно распределены, на поверхности механоактивированных частиц и сами являются качественно отличными, то фронт диффузии будет неравномерным как для мономинеральных, так и полиминеральных частиц. Это должно вызвать локальную концентрацию продуктов новой фазы на поверхности активированных частиц. Если процесс гидратообразования осуществлять в движущейся среде, то продукты новообразований могут оторваться от поверхности частиц, что вызовет выравнивание концентраций их в объеме дисперсионной среды.

Кроме того, вероятность критической концентрации зародышеобразования на поверхности будет снижаться, что должно вызвать вовлечение новых объемов в химические обменные процессы с дисперсионной средой.

3. Столкновение частиц, вызывающих модификацию их поверхности, должно быть достаточно частым, происходить каждый раз в других участках поверхности, возникающие при этом напряжения не должны вызывать разрушения частиц. Для выполнения главной задачи – столкновения не

должны вызывать разрушения частиц, необходимо избежать условий, при которых частицы сталкиваются при встречном движении.

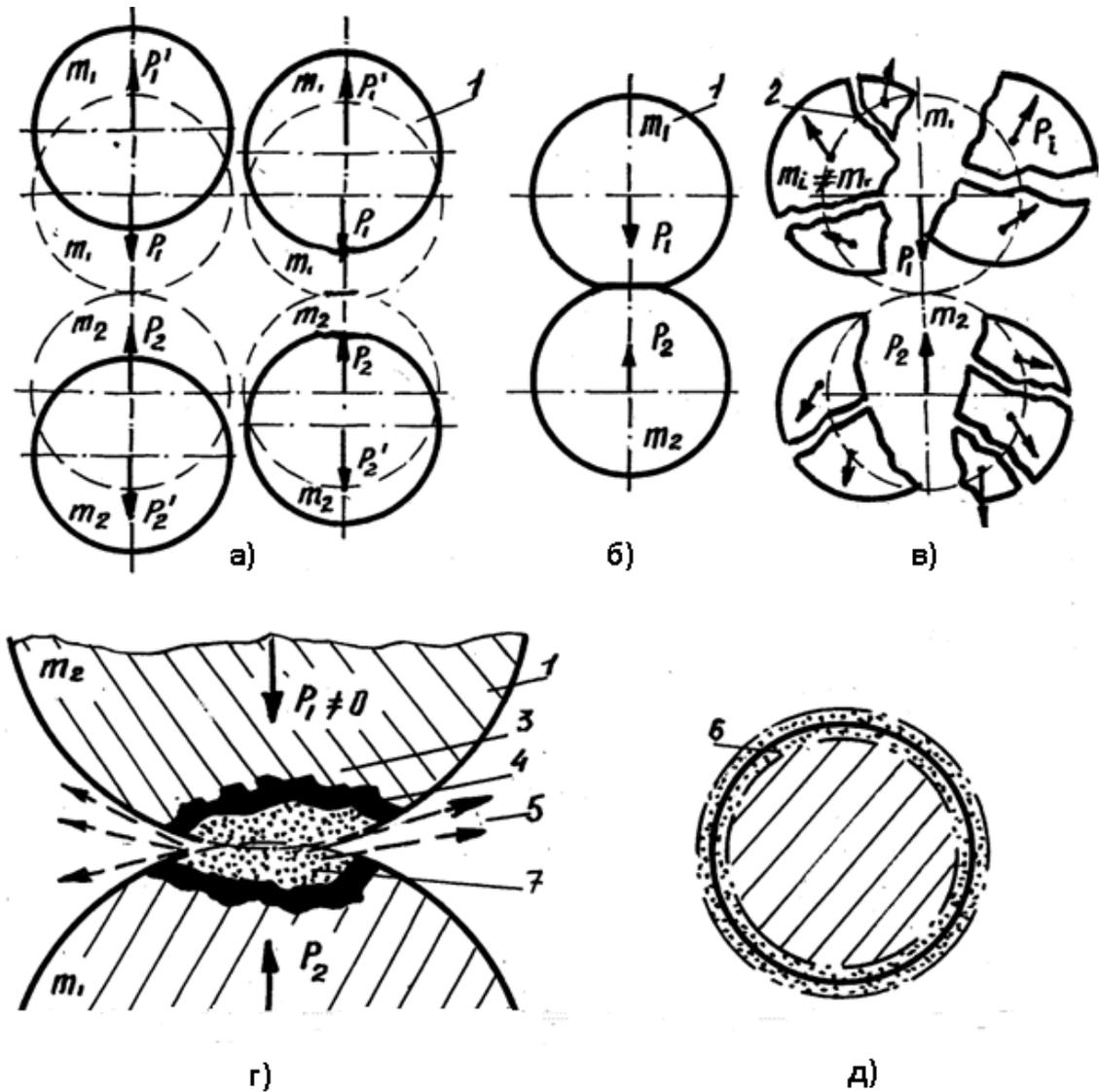


Рис.1.1 Модели взаимодействия двух частиц при их упругом и неупругом столкновении без слипания (а), столкновении с последующим их слипанием (б), столкновении с образованием новых поверхностей (в), локального взаимодействия частиц (г) с образованием модифицированной поверхности частицы (д):

- 1 - частица дисперсной фазы; 2 - новые поверхности раздела;
- 3 - неискаженная структура; 4 - разупорядоченная структура;
- 5 - экзоэмиссия; 6 - модифицированная зона; 7 - трибоплазма

Для этого необходимо обеспечить движение частиц в одном направлении и при этом обеспечить их столкновение и изменение ориентирования. Это возможно осуществить в турбулентном течении, при котором жидкость совершает неустановившееся беспорядочное движение по сложным траекториям.

Предложенная принципиальная схема механохимической активации высококонцентрированных грубодисперсных систем обеспечивает механоактивацию частиц дисперсной фазы, проявления трибохимических эффектов в среде с которой происходит их химическое взаимодействие и позволяет обеспечить требуемую эффективность механоактивации [1].

Рассмотренные вопросы изменения свойств отдельных компонентов и всей дисперсной системы за счёт их специальной предварительной обработки (активации) позволяют заключить о перспективности такого направления. При этом следует отметить разнообразие методов активации: вибрационные [108, 109], ультразвуковые, термические, химические, механические, электромагнитные, магнитные и их всевозможные сочетания. Использование этих методов позволяет изменить кинетику протекания физико-химических реакций [110 - 112], изменяет структуру твердеющих и затвердевших вяжущих, что ведёт к повышению их механических свойств и решает таким образом технико-экономические задачи.

1.3 Активные минеральные добавки и их роль в структурообразовании твердеющих цементных систем

При рассмотрении строительных материалов как полидисперсных и полиминеральных композиционных материалов и их сравнении с композитами иных природы и назначения нельзя не отметить следующие достаточно принципиальные различия: - полиминеральность твердых составляющих (от минеральных вяжущих до крупных заполнителей); различие в размерах компонентов как в исходном составе, так и в конечном

продукте (от размеров продуктов новообразований – 10^{-3} мм и меньше до размеров крупных заполнителей – 10^{-2} м) [1]. Подобное разнообразие качественных и количественных составов строительных материалов на основе минеральных вяжущих (от инъекционных цементных клеев до бетонных массивов) ставит задачи анализа механизмов организации структуры с учетом роли отдельных составляющих.

В работах В.С. Дорофеева, В.Н. Вырового, Г.Н. Сиверцева [113, 114] предлагается применение физико-механических методов анализа механизмов организации структуры грубогетерогенных материалов. Отмечается, что в материалах полидисперсного строения целесообразно выделять структурные уровни по качественно сходным механизмам структурообразования. Эти уровни характеризуются структурными неоднородностями, под которыми понимаются переход полидисперсной системы от одного механизма к иному механизму организации структуры. Сосуществование бесконечного множества структурных неоднородностей на одном уровне ставит задачу принятия тех или иных моделей системы, удовлетворяющей поставленным целям анализа. По мнению В.С. Дорофеева и В.Н. Вырового [113] в бетонах можно выделять следующие уровни структурных неоднородностей по качественно сходным механизмам организации структуры:

- уровень продуктов новообразований;
- уровень водовяжущих минеральных композиций;
- уровень матричного материала и заполнителей;
- уровень образца (конструкций).

На каждом выделенном уровне предлагается своя модель и свои механизмы структурообразования систем. Так, на уровне продуктов новообразований, организацию их структуры можно анализировать с учётом термофлуктуационных процессов образования устойчивых зародышей как на твёрдой подложке, так и в объёме дисперсной среды. На уровне зёрен вяжущего с водой затворения, композицию предлагается рассматривать как высококонцентрированную грубодисперсную лиофобную систему с

лиофильной границей раздела фаз. С учётом принятых допущений [65, 115] организация структур такой системы реализуется за счёт самопроизвольного стремления системы к минимизации поверхностной энергии путем образования структурных агрегатов (кластеров) за счет межчастичных взаимодействий, при которых каждая частица переходит в равновесное механическое состояние. Авторы отмечают, что в результате спонтанного образования структурных блоков в системе образуются новые составляющие структуры – межкластерные поверхности раздела. Так как организация подобных структур развивается во времени, то зародившиеся на начальных этапах структурообразования, межкластерные поверхности раздела сохраняют способность превратиться в технологические трещины, определяющие поврежденность готового материала технологическими дефектами. В работе В.И. Соломатова и В.Н. Вырового [115] предложены способы управления процессами организации структуры на уровне минеральных вяжущих с целью снижения поврежденности и улучшения качественных характеристик цементного камня. В той же работе, при анализе механизмов на уровне структурных неоднородностей «матричный материал – заполнитель» предлагается в качестве модели использовать структурную ячейку модели бетона, представляющей собой диски заполнителя, определенным образом расположенных в матричном материале. При этом матричный материал представлен как непрерывный материал, у которого объемные деформации пропорциональны объему материала. Это позволило предложить и реализовать графо-аналитический метод анализа динамик распределения усадочных деформаций матричного материала в зависимости от укладки заполнителей, соотношения скоростей набора структурной прочности и развития объемных деформаций, соотношения адгезионно-когезионных сил связи на границе с заполнителем. Возникающие градиенты собственных деформаций вызывают формоизменение матричного материала, образование трещин соизмеримых с самой структурной неоднородностью и формирование остаточного локального деформативного состояния. На

уровне образца и конструкции формируется интегральное поле остаточных (технологических) деформаций и, в участках градиентов деформаций зарождаются и развиваются технологические трещины. Особенное внимание авторы [113] уделили механизмам зарождения и развития трещин на всех анализируемых уровнях структурных неоднородностей и показали их влияние на усадку бетонов, стойкость в условиях малоцикловых воздействий среды эксплуатации, на трещиностойкость и механические характеристики цементного камня, растворов и бетонов.

Исследователи И.Н. Ахвердов, В.С. Колокольников, А.М. Невиль [116 - 118] отмечают особую роль пористых заполнителей в процессах формирования контактной зоны растворной части и заполнителей, что сказывается на свойствах бетонов. Часть исследователей объективные процессы влагообмена между растворной частью и заполнителями относят к положительным явлениям, обеспечивающим «самовакуумирование» зоны контакта и улучшения свойств бетонов.

Анализ показывает, что в работах многих исследователей и научных коллективов строительные материалы представлены материалами с достаточно сложной структурной организацией. Если для бетонов модели структур отличаются незначительно, при разных начальных предпосылках, то на уровне вяжущего процессы организации структуры, находятся лишь на начальных этапах постановки задачи. Это связано с тем, что и по настоящее время не определено общее понятие «структуры» и не установлены структурные параметры, которые подлежат регулированию для получения материалов с заданным комплексом свойств. Опыт назначения состава материалов на основе минеральных вяжущих показывает, что, например, для получения бетонов одной марки (класса) можно реализовать достаточно много составов, что позволяет решать задачи оптимизации по различным критериям. В силу изменения исходных составов можно утверждать, что различные структуры позволяют получить материалы с одинаковыми характеристиками. Однако, достаточно изменить соотношения компонентов

в конкретном составе (изменить структуру), чтобы изменить свойства бетона. Поэтому, исходя из существующих подходов, достаточно трудно установить причинную связь между структурой и свойствами.

Исторически сложилось, что механические характеристики материалов связываются, в основном, с процессами и явлениями, протекающими при твердении минеральных вяжущих. После исследований Ле-Шателье, которые он изложил в диссертации, защищенной в 1887 г., установилась прочная тенденция оценивать результаты реакций минеральных вяжущих с водой затворения по осредненным показателям образования продуктов реакций. При этом подходе механизм протекания реакций и структура конечного продукта остаются, как правило, не раскрыты. Сам Ле-Шателье и сторонники его подхода исходили из экспериментально подтвержденной посылки различной растворимости начальных составляющих и продуктов их растворения. Это ведет к образованию растворов, пересыщенных по отношению к продуктам новообразований, что вызывает появление зародышей кристаллов новой фазы.

Продукты растворения выделяются в виде геля путем проникновения воды в поверхностные слои безводного вяжущего. По П.А. Ребиндеру [119] схватывание и твердение представляет собой динамичный процесс образования коагуляционных тиксотропных структур с дальнейшим развитием кристаллизационной структуры гидратных новообразований путем кристаллизации через пересыщенный водный раствор.

Авторами П.П. Будниковым, Б. Дельмоном а также Л.Б. Сватовской [120 - 122] предложено отнести гидратацию минеральных вяжущих к классу топохимических реакций, одним из реагентов которых является твердое тело. Особенностью топохимических реакций является их локализация на поверхности раздела твердого тела и продуктов реакций. В работе [121] показан механизм взаимодействия жидкой фазы с поверхностью твердых тел и предложен коэффициент критической концентрации зародышеобразования. Показано, что при массовом появлении ионов в приповерхностных участках

образуются зародыши новой фазы, определяя дальнейшую кинетику процесса гидратации диффузией молекул воды вглубь зерен вяжущего.

А.В. Волженский [9] полагает, что на начальных этапах твердения гидратация идет по схеме поверхностного растворения с дальнейшим гетерофазным взаимодействием.

В работе М.М. Сычева [122] достаточно подробно рассматривается стадийность процесса гидратации по топохимическому механизму и роли активных центров поверхности частичек вяжущего и жидкой фазы в скорости протекания процессов.

Проведенный анализ механизмов структурообразования позволяет заключить, что совокупность предложенных механизмов, протекающих на межфазных границах раздела при схватывании и твердении минеральных вяжущих не позволяют в должной мере оценить структурные изменения, и следовательно, макропараметры вяжущих, как дисперсных систем.

Структуру твердеющих и затвердевших цементных композиций описывает А.Ф. Полак [123]. По его мнению, после растворения и образования большого числа зародышей новообразования происходит обрастание и образование кристаллического скелета. Пространственное ориентирование кристаллических сростков дает возможность представить затвердевший цементный камень как пространственную структуру, в которой определенным образом ориентированы кристаллы с известными свойствами, что позволяет оценить свойства материала.

В зависимости от типа контактов и их количества П.А. Ребиндер [119] выделяет характерные типы структуры дисперсной системы, что, зная уровень межчастичных взаимодействий, позволяет оценить механические характеристики всей системы. Подобные зависимости для дисперсных систем различной природы приведены в работах Н.Б. Урьева [65, 115], Д.А. Зимона [124].

Как правило, исследуется не только структура цементных теста или камня, сколько структура продуктов новообразований. В работах [9, 125-127]

приведены структуры цементного клинкера, представляющие наборы геометрических фигур, в которых определенным образом распределены ионы и молекулы основных минералообразующих элементов. Приводится кристаллохимическое описание клинкера как такового. В зависимости от периодов структурообразования Х.Ф.У. Тейлор предложил схему развития микроструктуры на уровне фрагмента зерна цемента, состоящего из C_3S и C_3A . При этом не учитывается переходная зона между минералами и состояние поверхности каждого минерала (наличие дефектов и микротрещин). Наличие дефектов в твердеющем и затвердевшем цементном камне отмечает П.Г. Комохов [128], что позволяет заключить – трещины различного размера являются своеобразным структурным элементом камня.

Д.И. Штакельберг [129] отмечает, что в структурообразующих системах совершается два сопряженных процесса: химической реакции и структурообразования. Л.Г. Шпынова [130] отмечает «бугорки роста» в виде усеченных конусов, которые при их ориентировании перпендикулярно поверхности зерна цемента и последующем росте превращаются в плоские зерна-чешуйки. Отмечается наличие блоков из параллельно ориентированных слоев и бесформенная масса – гель гидросиликатов. Независимо от разных подходов к явлению гидротации, отмечается роль поверхности раздела как в случае проявления эффектов растворения, так и протекание гетерофазных реакций.

1.4 Влияние микрокремнезема на свойства бетона

В последние годы в связи с разработкой суперпластификаторов и комплексных модификаторов полифункционального действия открылись перспективы получения бетонов с уникальными свойствами за счет использования пылевидных отходов ферросплавного производства, создания новых видов вяжущих, получивших название «вяжущие низкой водопотребности – ВНВ», и тонко молотого цемента (ТМЦ) с

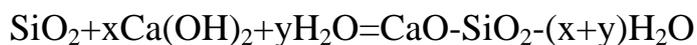
использованием минеральных добавок природного и техногенного происхождения. По мнению В.Г. Батракова, С.С. Каприелова, Д. Дж. Паркера [15, 16] применение микрокремнезема в качестве активного микрозаполнителя является одним из наиболее перспективных направлений в технологии получения высокопрочных бетонов, на основе портландцементов.

Микрокремнезем представляет собой побочный продукт металлургического производства при выплавке ферросилиция и его сплавов, образующийся в результате восстановления углеродом кварца высокой чистоты в электропечах [27 - 30]. В процессе выплавки кремниевых сплавов некоторая часть монооксида кремния SiO переходит в газообразное состояние и, подвергаясь окислению и конденсации, образует чрезвычайно мелкий продукт в виде шарообразных частиц с высоким содержанием аморфного кремнезема. Частицы микрокремнезема имеют гладкую поверхность и сферическую форму. Средний размер частиц составляет 0,1-0,2 микрон, то есть они в 50-100 раз мельче цемента или летучей золы, а удельная площадь поверхности составляет от 13000 до 25000 м²/кг. Порошок, собранный в фильтрах, фактически состоит из рыхлых агломератов с очень низкой насыпной плотностью.

Микрокремнезем можно получать в трех состояниях - природном и уплотненном, а также в виде водной суспензии (около 50%). Весьма мелкий гранулометрический состав и значительная удельная поверхность зерен аморфного кремнезема обуславливают высокие пуццолановые свойства и позитивное влияние на свойства бетона.

Новые возможности использования микрокремнезема тесно связаны с прогрессом в области создания эффективных суперпластификаторов - их сочетание дало толчок к созданию бетонов нового поколения, обладающих высокой прочностью (от 60 до 150МПа), повышенной удобоукладываемостью, долговечностью, водонепроницаемостью, а также высокой коррозионной стойкостью [16, 131, 132].

Микрокремнезем легко вступает в реакцию с гидроксидом кальция, высвобождаемой в процессе гидратации цемента, повышая тем самым количество гидратированных силикатов типа CSH в результате реакции:



Эта вновь образовавшаяся фаза CSH характеризуется меньшим отношением C/S (даже до 1,4), чем CSH в результате гидратации цемента. Как следствие, она обладает способностью присоединять другие ионы, особенно щелочи, что имеет существенное значение в связи с применением микрокремнезема для уменьшения расширения, вызванного реакциями между щелочами и заполнителем. Известно, что прочность переходной зоны между цементным раствором и крупным заполнителем меньше прочности самого раствора [133].

Эта зона содержит больше пустых пространств, образующихся вследствие скопления свободной воды около зерен заполнителя, а также сложностей, связанных с более плотной упаковкой частиц у его поверхности. В этом пространстве скапливается больше частиц портландита. В случае отсутствия добавки микрокремнезема образуются крупные кристаллы $\text{Ca}(\text{OH})_2$, ориентированные параллельно поверхности заполнителя или арматуры. Кристаллы портландита обладают меньшей прочностью, чем гидратированные силикаты кальция CSH.

Именно поэтому переходная зона и является самым слабым звеном в обычном бетоне. Добавка микрокремнезема даже в малом количестве приводит к повышению стойкости бетона к воздействиям агрессивных сред. Микрокремнезем способствует устранению расширения бетона при реакциях щелочей с реакционно-способным заполнителем.

Первые сведения о применении микрокремнезема (далее - «МК») в современной технологии производства бетонов относятся к началу 50-х годов, когда специалистами Норвежского Университета была показана принципиальная возможность и эффективность улучшения комплекса технически важных свойств бетонов введением в их состав

ультрадисперсных отходов металлургических производств, содержащих кремний. На территории бывшего СССР МК применялся с середины 80-х годов и завоевал достойную нишу добавок в новых разработках рецептур бетонов на портландцементе. С распадом СССР основные производства ферросплавов оказались в основном в Украине и Казахстане, где велись основные разработки по внедрению МК. Быстрота, с которой МК завоевал внимание, как научных кругов, так и специалистов-практиков, может быть отнесена на счет уникальных свойств материала, которые делают его сочетание с портландцементом эффективным. В процессе исследований проводимых Каприеловым С.С., Шенфельдом А.В. и Ивановым Ф.М. [26] в сравнении с традиционными активными микронаполнителями по данным рентгенофазового анализа, диоксид кремния аморфной модификации играет важнейшую роль в механизме взаимодействия активных микронаполнителей с гидратирующими минералами цемента.

Введение МК взамен частиц цемента приводит к естественному уменьшению в составе вяжущего минералов C_3H и O_3S , обладающих наибольшей адсорбционной способностью. Это объясняется увеличением количества образующихся высокодисперсных новообразований - гидросиликатов кальция, способствующих энергичному поглощению суперпластификатора из раствора. Анализ многочисленных экспериментальных данных работ В.Г. Батракова, С.С. Каприелова, А.В. Шейнфельда [26, 28, 29] по влиянию МК разного химического состава на основе цементных систем позволил разработать классификацию добавок на основе сравнительной эффективности МК разных кремнесодержащих сплавов. Наиболее эффективны отходы производства кристаллического кремния и ферросилиция, высоких марок, содержащих SiO_2 в количестве выше 89%. Менее эффективны отходы производства силикомарганца и феррохрома, которые по своей эффективности можно приравнять к трепелу и золе. Касаясь особенности механизма действия МК в цементных системах можно отметить следующее: при введении определенного количества

суперпластификатора легкие частицы МК могут заменять некоторое количество воды между флокулированными цементными зернами. Некоторые исследователи заострили внимание на очень высоких пуццолановых свойствах МК.

Как и все пуццолановые материалы, микрокремнезем вступает в реакцию с гидроксидом кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$, освобождаемой при гидратации портландцемента для образования вяжущих соединений. Очень высокая чистота и мелкость микрокремнезема способствует более эффективной и быстрой реакции. При надлежащем рассеивании тысячи реактивных сферических микрочастиц окружают каждое зерно цемента, уплотняя цементный раствор, заполняя пустоты прочными продуктами гидратации и улучшая сцепление с заполнителями. Степень пуццолановой активности зависит от содержания реактивного кремнезема, но на практике между двумя видами материала с высоким содержанием кремнезема существует довольно незначительное различие.

Микрокремнезем может обеспечить прочность на сжатие, намного превышающую прочность обычных бетонов, и здесь ограничивающим фактором является только прочность заполнителя. При использовании природных заполнителей достигается прочность свыше 150 Н/мм^2 , а при использовании специальных высокопрочных заполнителей можно достичь прочности 300 Н/мм^2 .

Известно, что пуццолан более чувствителен к изменениям температуры, нежели портландцемент, и микрокремнезем - не исключение. При низких температурах пуццолановая реакция замедляется, а при высоких - ускоряется, причем в обоих случаях значительно по сравнению с портландцементом.

По количеству теплоты, выделяемой при гидратации, микрокремнезем находится между обычным портландцементом и портландцементом РНРС, хотя нарастание теплоты происходит медленнее. Для смесей эквивалентной прочности тепловыделение в целом будет меньше, поскольку общее содержание вяжущих материалов значительно снижено.

Доказано, что микрокремнезем оказывает существенное влияние на щелочность воды в порах цементного геля [16]. Пуццолановая реакция, по-видимому, приводит к образованию геля с высоким содержанием кремнезема, связывающего щелочные металлы, и возможно, с высоким содержанием связанной воды. Уровень водородного показателя рН воды в порах бетона на обычном портландцементе равен 14. При добавлении даже умеренного количества микрокремнезема он очень быстро снижается до 13. При добавлении свыше 15% микрокремнезем в конечном счете забирает из воды в порах практически все ионы щелочных металлов, понижая уровень рН до 12,5. При добавлении около 25% микрокремнезем нейтрализует всю свободную известь, освобожденную силикатами портландцемента. При этом общий уровень рН бетона едва ли снижается до того, что это оказывает неблагоприятное воздействие на инертность арматуры.

Эффект заполнения пор, создаваемый пуццолановыми сферическими микрочастицами, способствует значительному уменьшению капиллярной пористости и проницаемости бетона. Фактически непроницаемый бетон можно получить при умеренном содержании микрокремнезема и сравнительно низком содержании обычного портландцемента. Поскольку микрокремнезем оказывает большее влияние на проницаемость, чем на прочность, бетон с содержанием микрокремнезема всегда будет гораздо менее проницаемым, чем бетон эквивалентной прочности на обычном портландцементе.

Низкая проницаемость и повышенная плотность цементного камня обеспечивает прекрасную морозостойкость бетона с микрокремнеземом [27, 30, 134]. По всей видимости, не существует теоретической несовместимости микрокремнезема с воздухововлекающими добавками, в действительности стабильная реологическая структура пластичного бетона с микрокремнеземом должна уменьшать потерю вовлеченного воздуха при транспортировке и вибрировании.

Известно, что низкая проницаемость и низкое содержание свободной извести повышает устойчивость бетона к воздействию агрессивных

химических веществ [16]. Бетон с содержанием микрокремнезема обладает этими качествами и проявляет прекрасную устойчивость к воздействию целого ряда веществ. Долгосрочные полевые испытания в Норвегии показали, что по своей потенциальной устойчивости к сульфатам он равен сульфатостойкому портландцементу.

Благодаря относительно высокому содержанию цемента, использованию микрокремнезема и низкому водоцементному отношению высокопрочные бетоны при затвердевании развивают следующие качества (в сравнении с традиционными бетонами):

- более быстрое нарастание температуры в строительной конструкции;
- повышенная скорость потребления и связывания воды в процессе гидратации;
- ускоренное нарастание прочности в первые дни.

Воздействие микрокремнезема на бетон двояко. Во-первых, микрокремнезем заполняет пространство между «крупными» частицами цемента, что способствует уплотнению структуры бетона и уменьшению количества дефектных (ослабленных) участков. Это ведет к снижению проницаемости бетона и повышению стойкости во всех средах, росту долговечности цементного бетона. Во-вторых, химическое взаимодействие микрокремнезема с цементом вызывает резкий рост прочности бетона и его ускоренное твердение. Применение микрокремнезема возможно лишь в комплексе с суперпластификатором, так как МК поглощает достаточно большое количество воды и без пластификатора весь эффект от пуццолановой добавки был бы сведен к нулю.

Немаловажно отметить, что применение микрокремнезема конденсированного в массовом строительстве также позволяет экономить до 40% цемента без ухудшения характеристик бетона и сокращать расход тепловой энергии при тепловлажной обработке изделий. Использование микрокремнезема в сборном бетоне позволяет уменьшить сечения некоторых элементов, облегчая их транспортировку и монтаж.

Роль микрокремнезема в формировании структуры цементного камня является многоплановой: во-первых тонкодисперсные зерна заполняют пространство микропор, тем самым повышая плотность и прочность системы; во-вторых могут являться активными центрами кристаллизации; в-третьих – участвуют в химических реакциях образования новой фазы, обеспечивая формирование кристаллических сростков низко основных гидросиликатов кальция с соотношением $C/S = 1,0$ вместо первичных кристаллогидратов типа портландита и высокоосновных гидросиликатов кальция.

1.5 Раздельная технология приготовления бетонных смесей

Представление бетонов как композиционных материалов предопределяет интенсификацию процессов приготовления бетонных смесей, активацию составляющих и раздельную технологию перемешивания. Существенные резервы ресурсосбережения заложены и в процессах приготовления бетонных смесей. Технология производства бетонной смеси совершенствуется в следующих направлениях: модернизация существующих типов смесительных установок и создание новых типов смесителей, поиск оптимальной последовательности загрузки и перемешивания компонентов бетонной смеси; разработка комплексных методов, совмещающих в себе интенсивные способы приготовления предварительным разогревом бетонной смеси; введением минеральных наполнителей и химических добавок, направленно регулирующих свойства растворных и бетонных смесей и скорость физико-химических процессов твердения; автоматизация бетонных узлов. Экономия цемента в производстве бетонной смеси достигается при использовании отечественных турбулентных смесителей, окружные скорости которых вдвое втрое выше, чем у рабочих органов смесителей других типов. Качество и продолжительность процесса приготовления бетонной смеси зависят от последовательности загрузки и перемешивания составляющих. В

этом смысле по мнению В.С. Дорофеева, В.И. Соломатова, В.Н. Вырового, [113, 135 - 138] перспективной представляется отдельная технология приготовления бетонных смесей.

По отдельной технологии отдельно в скоростных смесителях готовится растворная часть и в обычных (гравитационных) – смесь заполнителя с растворной частью. Раздельное приготовление смесей позволяет управлять микро- и макроструктурой бетона. При этом появляется возможность модифицировать цементное вяжущее химическими добавками и минеральными наполнителями, производить перемешивание в заданном температурном режиме и активировать поверхность наполнителей [139 - 147].

Принцип работы турбулентного смесителя по характеру воздействия на перемешиваемый материал аналогичен действию рабочего колеса центробежного насоса. Загруженные в смеситель вода и вяжущее смешиваются ротором, который при вращении отбрасывает смесь лопатками к стенкам корпуса и которые под собственной массой опускаются на ротор. При перемешивании в турбулентном смесителе частицам смеси сообщаются высокие скорости и сложные траектории движения. В результате столкновения частичек и при частых ударах о ротор частичек вяжущего и минеральных добавок повышается степень смачивания, что обеспечивает равномерное распределение воды, приводящее к физическому и химическому диспергированию, сдиранию экранирующих гидросульфоаллюминатных пленок с клинкерных частиц с обнажением новых активных центров поверхности. В результате достигается ускорение и увеличение степени гидратации цемента, повышение прочности наполненного цементного камня [139, 142, 148]. Таким образом, раздельная технология бетонной смеси предполагает комплексное использование раздельного перемешивания вяжущего вещества и заполнителей, введение пластифицирующей добавки и дисперсного микронаполнителя.

Внедрение раздельной технологии не требует коренной перестройки производства бетонных смесей и предполагает лишь оборудование бетоносмесительных узлов заводов ЖБИ путем установки дополнительного смесителя-активатора растворной смеси.

Опыт освоения раздельной технологии на заводах строительной индустрии показал, что имеются резервы по улучшению физико-механических характеристик бетона, связанные с совершенствованием конструкции смесителя-активатора, подбором оптимальных составов бетонных смесей, соблюдением технологической дисциплины. Значительное улучшение качества бетона может быть обеспечено при комплексном использовании раздельной технологии (РТ), активных минеральных добавок и суперпластификатора [139 – 147, 149].

Применение активных минеральных добавок для бетонов диктуется теоретическими предпосылками и практической необходимостью. Теоретические предпосылки наполнения цементного теста базируются на представлении о неполной гидратации клинкерных минералов и длительной сохранности в цементном камне оставшихся ядер цементных зерен (30 % и более), выполняющих в результате роль наполнителей.

По активности минеральные добавки, как указывалось выше, подразделяют на активные и инертные. Однако следует отметить, что такое деление минеральных добавок носит чисто условный характер, ибо, под активностью понимают гидравлическую активность. В более широком смысле необходимо учитывать не один, а комплекс активных факторов структурообразования.

По мнению ряда исследователей Р.Д. Азелицкой, А.М. Дмитриева, А.С. Пантелеева [92, 150 - 152] тонкомолотая минеральная добавка с момента затворения оказывает в цементном тесте пептизирующие и структурообразующие действия, участвуя тем самым в процессах гидратации и твердения цементного камня. Такое действие дисперсных минеральных добавок объясняется тем, что его частицы, располагаясь между отдельными

зернами цемента, раздвигают их увеличивают к ним доступ воды. Образующиеся продукты гидратации распределяются в большем объеме, так как осуществляется их отвод из зоны реакции к поверхности частиц наполнителя.

Исследования Ю. Строка [153] показали, что интенсивность влияния поверхности дисперсных минеральных добавок на процесс кристаллизации гидратных образований зависит не только от количества активных центров, но и от силы их взаимодействия, которая обусловлена кристаллическим строением минералов.

Установлено, что прочность цементного камня при различном водосодержании смеси зависит от тонкости помола цемента и минеральных добавок, а также от контактных сил сцепления между зернами минеральных добавок и продуктами гидратации портландцемента. Тонкодисперсные фракции участвуют в образовании цементного геля, более грубые – вследствие продолжающейся гидратации цемента – отсасывают воду из ранее образовавшихся пористых гелей, что приводит к затвердеванию цементного камня. Скорость твердения и набора прочности цементного камня зависит от размеров поверхности зерен минеральных добавок. Чем больше поверхность зерен АМД, тем тоньше прослойки продуктов гидратации между ними, тем больше их влияние на аморфную фазу и тем быстрее твердеет цементный камень.

Активацию АМД, в основном, выполняют механическим (измельчением), химическим (модификация поверхности органическими и минеральными добавками) или комбинированными способами. К примеру, измельчение кварца приводит к изменению его кристаллической структуры, он частично становится аморфным, что в сочетании с вскрытием новых активных поверхностей зерен повышает его реакционную способность, существенное повышение эффективности применения дисперсных минеральных веществ может быть обеспечено при комплексном использовании АМД и пластифицирующих добавок.

В процессах направленного структурообразования, регулирования реологических характеристик, стабилизации цементных композиций особенно при наличии в системе минеральных добавок, существенную роль играют различного вида химические модификаторы [35, 87, 117, 154 - 158].

Поверхностно-активные вещества (ПАВ) являются наиболее распространенными пластификаторами. Они имеют сложное химическое строение и, как правило, включают гидрофильные группы и гидрофобные углеводородные цепи. Характер действия ПАВ на цементное тесто определяется строением молекул ПАВ и соотношением гидрофильных и гидрофобных частей (молекул) .

В технологии бетона наибольшее распространение получили анионоактивные ПАВ. Однако известны и добавки с другим строением молекул – катионоактивные и неионогенные [157, 158]. Механизм их воздействия также основывается на активном влиянии на поверхностные явления в системе твердое тело – жидкость, в результате чего облегчается течение смеси и улучшается ее технологичность.

Эффективным модификатором структуры и свойства бетонной смеси являются пластификаторы и суперпластификаторы.

Рассматривая механизм активирующего действия интенсивного перемешивания связующей части (наполненной и ненаполненной), имеющего место при раздельной технологии (РТ), представляется целесообразным рассмотреть под другим углом зрения поведение модификаторов, структурообразующая роль которых формируется при значительных динамических воздействиях [1].

Рабочий орган быстроходного смесителя обеспечивает непрерывный приток энергии в цементную систему, что значительно уводит ее в область сильной термодинамической неравновесности. При достаточном притоке энергии, создаваемой при значительных скоростях вращения ротора, устанавливается турбулентный режим. В результате водный раствор цемента быстро пересыщается, начинается образование зародышей новой фазы.

Происходит насыщение околозернового пространства дисперсными новообразованиями и прогрессирующий рост этих частиц до малых и конечных значений. Дальнейший подвод энергии к системе стимулирует увеличение суммарной поверхности этих частиц до весьма значительных размеров. Обводнение вновь созданных новообразований переводит значительную часть воды в состояние физически связанной, как бы, исключая ее с процесса гидратации. Продолжающийся приток энергии способствует агрегатированию частиц новообразований в агрегаты-кластеры, и ее воздействие на процессы структурообразования выражается недостаточно интенсивно. Роль же пластификаторов и суперпластификаторов в такой динамической среде заключается, очевидно, в интенсификации процессов кластерообразования, обеспечивая тем самым уменьшение суммарной поверхности новообразований и высвобождение физически связанной воды. В итоге резко увеличивается обводненность и повышается эффект разжижения смеси.

Разжижитель С-3 является производным сульфокислот. Природа его действия на цементные системы является единой и регулирование кластерообразования обеспечивается доминирующим влиянием сульфатных анионов. Образование гидросульфоалюмината кальция со связыванием части воды в твердеющей системе не противоречит гипотезе структурообразующей роли ПАВ в режимах РТ, т.е. с увеличением концентрации новообразований происходит рост удельной поверхности твердой фазы, которая ведет к нарастающему лавинообразному повышению количества активных центров и поверхностной активности составляющих растворной части. Скорость реакции резко возрастает. Возникает автокаталитический процесс, характеризующийся тем, что в ходе многоступенчатой реакции гидратации ее продукты на определенной стадии инициируют процесс предыдущей стадии [154, 159].

Исследования роли ПАВ в отдельной технологии позволили также расширить диапазон технологических приемов модифицирования

минеральных добавок. Активацию минеральных добавок для цементных бетонов можно осуществлять различными способами, о которых говорилось выше. Так, если механический и комбинированный методы требуют специального измельчающего оборудования, то химическое модифицирование наполнителей в кратчайшие сроки выполнимо в скоростных трибосмесителях-активаторах [160].

Таким образом, проведенный анализ показал, что использование раздельной технологии в сочетании с добавками поверхностно-активных веществ способствует активизации процессов гидратации минеральных вяжущих веществ и различных тонкомолотых добавок.

1.6 Основная гипотеза

В современных условиях в практической деятельности широкое применение получили высокопрочные бетоны с прочностью при сжатии 50...80 МПа. Непременным условием получения высокопрочного бетона является использование высокомарочного портландцемента (М500 и выше), что приводит к значительному удорожанию бетонных и железобетонных изделий и конструкций.

Получение бетонов повышенной прочности на рядовых цементах является одной из основных проблем современной технологии бетона. Учитывая накопленный опыт в этом направлении, следует отметить, что решение этой проблемы возможно только при целенаправленном управлении процессами гидратации и структурообразования вяжущей системы. Одним из основных направлений развития строительства является применение высокопрочных бетонов, что связано с использованием зданий и сооружений каркасных конструкций с повышенными нагрузками, а также с расширением области применения специальных бетонов в дорожном, энергетическом, водохозяйственном, шахтном строительстве [161]. Так, например, применение высокопрочных бетонов для строительства

многоэтажных зданий позволяет снизить расход металла на 15...20%, трудозатраты – на 30...60%, издержки производства – на 20...30%.

Поскольку экономичность бетонов возрастает при замене части цемента активными минеральными добавками, в последние годы учёные вернулись к исследованиям и применению активных минеральных добавок, но уже на другом качественном уровне [162, 163]. Прежде всего появилось значительное количество помольных механизмов, получили развитие силовые и вибросиловые методы уплотнения бетонных смесей. Различными исследователями приводятся данные о замене 10...50% цемента активной минеральной добавкой без ухудшения физико-механических свойств бетона. Активные минеральные добавки применяют как природные, так и искусственные, в том числе различные отходы предприятий [9, 164].

Применение активных минеральных добавок, в частности, микрокремнезема в сочетании с суперпластифицирующей добавкой, позволяют резко повысить прочность бетона. Такой технологический прием позволяет получать высокопрочный бетон на рядовом портландцементе.

Существенным резервом повышения прочности бетонов является совершенствование способов приготовления бетонной смеси. В настоящее время внимание отечественных и зарубежных исследователей сосредоточено на совершенствовании традиционных методов смешения компонентов смеси, основными из которых являются способы активации цементных систем.

Существенное влияние на кинетику протекания реакций гидратации портландцемента также оказывает механохимическая активация.

Для реализации трибоэффектов при механохимической активации минеральных вяжущих была предложена конструкция трибоактиватора, при помощи которой реализуются процессы механоактивации частиц минеральных вяжущих и смешивание компонентов вяжущих [165]. Как показали исследования, рациональными областями использования трибоактиваторов являются: приготовление и активация минеральных вяжущих с активными минеральными добавками разной природы,

количества и дисперсности; получение механоактивированных минеральных вяжущих с химическими добавками разных видов и назначения; механоактивация минеральных вяжущих с последующим их использованием в растворах и бетонах самой широкой номенклатуры.

Предложенные режимы работы трибоактиватора практически не изменяют продолжительности приготовления растворов и бетонов. При помощи механохимических методов активации реализуются потенциальные возможности активных минеральных вяжущих. Использование активных минеральных вяжущих, включая побочные продукты других производств и химических добавок широкого назначения, позволяют решать задачи повышения качества и снижения материалоемкости строительных материалов и изделий, а также повышать производительность вследствие расширения области применения местных материалов и отходов других производств [166].

Применение методов механохимической активации с одновременным использованием активной минеральной добавки (микрокремнезема) рационального состава в сочетании с суперпластифицирующей добавкой, позволит улучшить свойства твердеющих и затвердевших систем путём изменения их структуры за счёт использования рациональных исходных составов и при технологически заданных режимах переработки.

РАЗДЕЛ 2

МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Основные этапы исследований

Принципы анализа сложных систем с вычислением основных элементов и взаимосвязей между ними необходимо применять не только к изучаемому объекту, но и к самому процессу исследования. Такой анализ позволяет обеспечить как чёткую логику исследования так и обосновать его процедуру. Проведение научных исследований было разбито на три основных этапа.

Первый этап. Проведен обзор литературных источников по особенностям технологии высокопрочного бетона, рассмотрены методы и способы активации минеральных вяжущих, роль в структурообразовании активных минеральных добавок твердеющих цементных систем, а также влияние микрокремнезема на свойства бетона. В результате анализа априорной информации, приведенной в первом разделе, были сформулированы цели и задачи исследований.

Второй этап. На данном этапе выбраны оптимальные режимы активации цементосодержащей суспензии в скоростном смесителе (трибоактиваторе). Были определены зависимости эффективной вязкости суспензий от количества суперпластификатора С-3, концентрации микрокремнезема, режима активации (время скоростного смешения, количество оборотов). Критерием оценки эффективности активации вяжущего была выбрана степень разрушения начальной структуры суспензии, определяемая эффективной вязкостью.

Третий этап. На данном этапе исследовались физико-механические и физико-химические свойства цементного камня ($R_{ФА}$, ДТА, МА, $R_{сж}$, $R_{изг}$) и бетона, вяжущее которого подвергалось механоактивации. Для контроля использовалось немеханоактивированное вяжущее аналогичных составов. В исследованиях использована математическая теория планирования эксперимента. Блок - схема исследований приведена на рис.2.1



Рис. 2.1. Блок - схема исследований

2.2 Характеристики материалов, применяемых в исследованиях

Вяжущее. В качестве вяжущего использовался портландцемент, полученный в лабораторной шаровой мельнице совместным помолотом клинкера и 5% гипсового камня. Активность цемента - 48 МПа. Минералогический состав клинкера приведен в табл. 1.

Таблица 2.1

Минералогический состав клинкера

Минералы	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	P _н	N	P
Среднее значение, %	53	22	6	15	0,87	2,12	1,06

Пластификатор. В качестве пластификатора использовался разжижитель С-3 (ТУС – 36020429-625);

Мелкий наполнитель. Использовался кварцевый песок Александровского карьера Одесской области с $M_{кр} = 2,2$. Содержание SiO₂ в песке составляла 96,22 %.

Крупный наполнитель. В качестве крупного наполнителя в экспериментах использовался гранитный щебень фракции 5...20 мм Никитинского гранитного карьера.

Микрокремнезём. В качестве активной минеральной добавки использовался микрокремнезем (Никопольский завод ферросплавов). Химический состав микрокремнезема приведен в табл.2.2, физические свойства – в табл.2.3.

Таблица 2.2

Химический состав микрокремнезема

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	C	S
90-92%	0,68%	0,69%	0,85%	1,01%	0,61%	1,23%	0,98%	0,26%

Таблица 2.3

Физические свойства микрокремнезема

Размер частиц	<1мкм
Плотность	
- неуплотненный	от 130 до 350 кг/м ³
- уплотненный	от 480 до 720 кг/м ³
- суспензия	от 1320 до 1440 кг/м ³
Площадь поверхности	от 13 000 до 30 000 м ² /кг

2.3 Методики исследований

Определение эффективной вязкости суспензий осуществлялось при помощи вискозиметра "Полимер - РПЭ – 1м" с коаксиальными цилиндрами.

Определение сроков схватывания цементных суспензий определялись на приборе Вика по ДСТУ Б.В.2.7-185:2009 Цемент. Методи визначення нормальної густоти, строків тужавлення та рівномірності зміни об'єму.

Определения пластической прочности твердеющей суспензии осуществлялось при помощи модернизированного пластометра Ребиндера.

Определение предела прочности при сжатии цементного камня и бетона проводилось согласно методике по ГОСТ 310.4 (СТ СЭВ 3920-82).

2.3.1 Определение эффективной вязкости суспензий вяжущих

Измерение вязкости основано на законе Ньютона, записанного в форме

$$F = \eta \frac{dv}{dy} S, \quad (2.1)$$

где: F – сила внутреннего трения в слое жидкости с поверхностью S;

v – скорость жидкости;

y – направление, перпендикулярное скорости течения.

Для изучения эффективной вязкости цементосодержащей суспензии применялся ротационный вискозиметр "Полимер - РПЭ - 1м" с коаксиальными цилиндрами. Общий вид вискозиметра показан на рис.2.2.

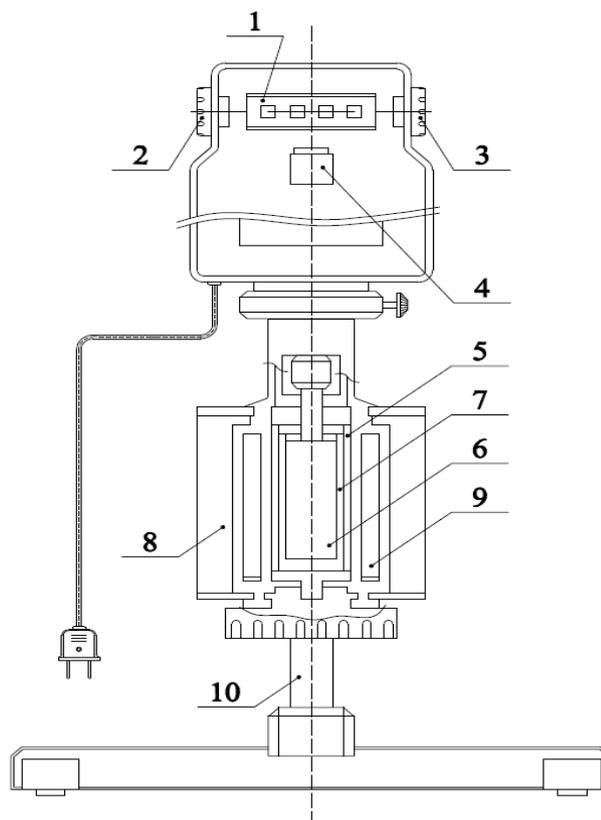


Рис.2.2. Общий вид вискозиметра "Полимер - РПЭ – 1м":

- 1 - цифровой индикатор; 2 - переключатель скорости вращения ротора;
 3 - переключатель коэффициентов воспринимающих элементов; 4 - кнопка включения привода; 5 - наружный цилиндр; 6 - внутренний цилиндр;
 7 - анализируемый материал; 8 - термостатирующая камера;
 9 - теплоноситель; 10 - кронштейн

Принцип действия прибора основан на измерении момента сопротивления сдвигу испытываемого материала, помещенного между воспринимающими элементами, при вращении одного из них с постоянной угловой скоростью. Расчетное уравнение реологических характеристик при этом имеет вид:

$$\eta = \frac{M * R^2 - r^2}{4\pi l * \omega_n - \omega_b * R^2 - r^2}, \quad (2.2)$$

где: M – момент действующих на цилиндр сил на определенном отрезке;

R, r – радиус наружного и внутреннего цилиндров;

ω_n, ω_v – условные скорости наружного и внутреннего цилиндров.

Система воспринимающих элементов выбиралась в зависимости от вязкости исследуемого материала и необходимости обеспечения заданных напряжений сдвига.

2.3.2 Определение тепловыделения суспензий вяжущего

Для определения температуры гидратации цементной суспензии использовался термостат, рис. 2.3.

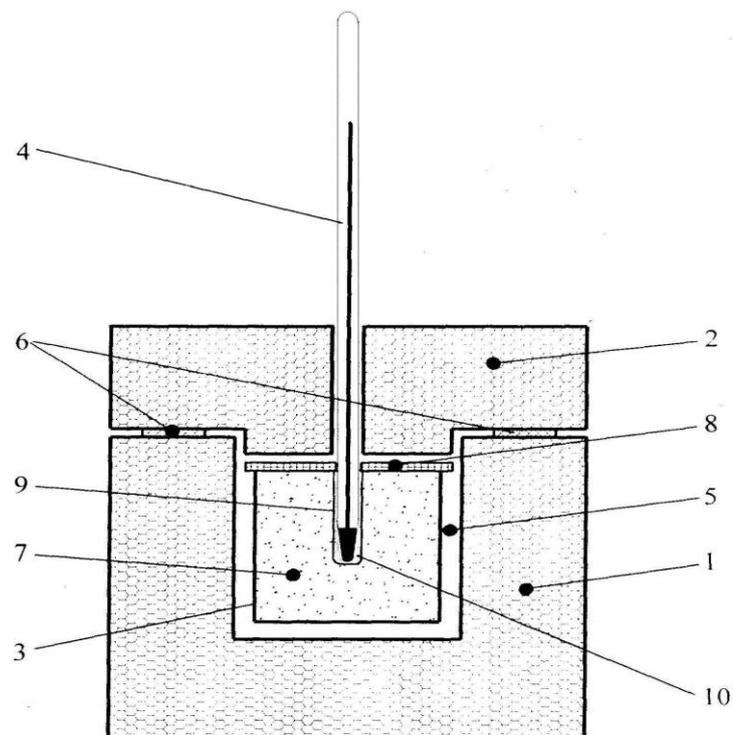


Рис. 2.3. Схема установки для определения изменения температуры твердеющего вяжущего

1 – корпус; 2 – крышка; 3 – емкость; 4 – термометр; 5 – воздушная прослойка; 6 – теплоизоляционная прокладка; 7 – цементная суспензия; 8 – крышка емкости; 9 – металлическая втулка; 10 – масло

Предварительно приготовленная суспензия вяжущего в количестве 200мл помещалась в цилиндрическую емкость, накрывалась крышкой с отверстием.

Теплота гидратации твердеющей цементной суспензии передавалась на термометр через цилиндрическую втулку, выполненную из меди и заполненную машинным маслом. Данная методика позволила определить температуру гидратации без существенных потерь тепла в окружающую среду.

2.3.3 Определение пластической прочности

Определение пластической прочности твердеющей суспензии осуществлялось при помощи модернизированного пластометра акад. Ребиндера П.А. (рис.2.4).

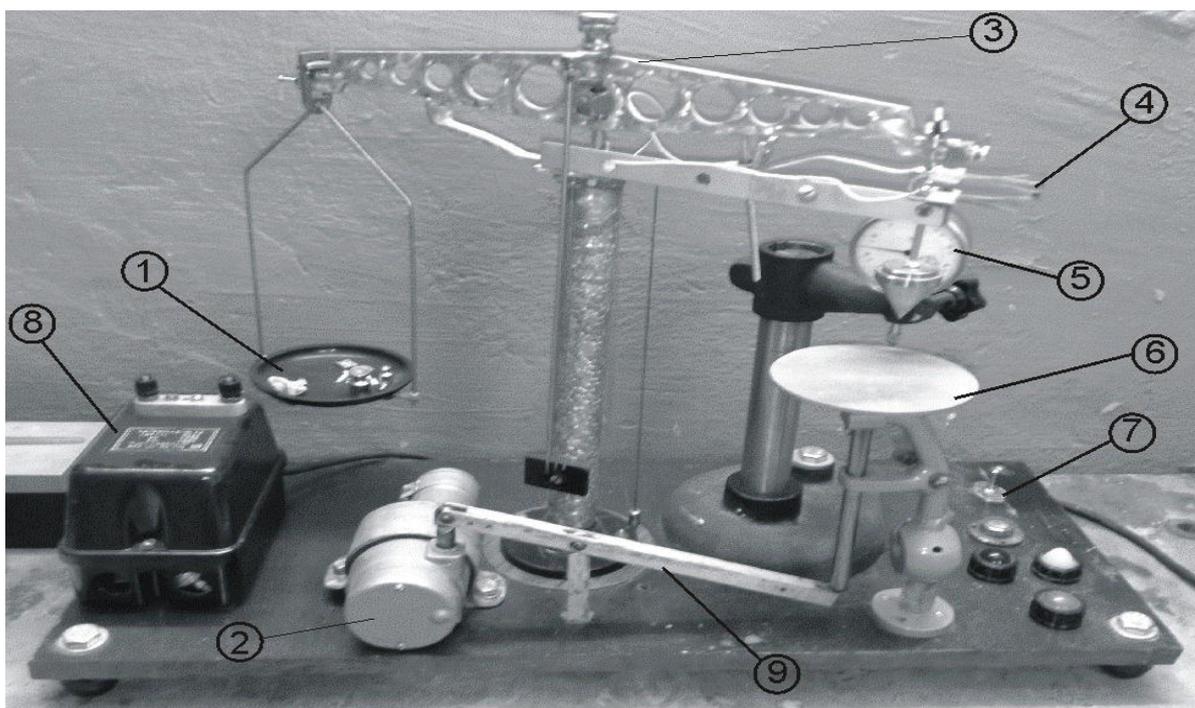


Рис. 2.4. Вид модернизированного пластометра акад. Ребиндера П.А.:

1 – навески, уравнивающие массу конуса; 2 – приводной электродвигатель; 3 – весовое коромысло; 4 – контактные клеммы; 5 – индикатор погружения; 6 – столик; 7 – пульт подъема и опускания столика; 8 – трансформатор; 9 – рычаг для подъема и опускания столика

Его конструкция дает возможность измерения величины погружения конуса в испытуемую смесь при механическом подъеме столика, автоматически останавливающегося при достижении заданной нагрузки P за счет размыкания контактов микровыключателя.

Величину пластической прочности P_m (МПа) определяли по формуле [167]:

$$P_m = K_\alpha (P/h^2), \quad (2.3)$$

где K_α - константа, зависящая от угла α при вершине конуса и определяемая как $K_\alpha = (1/\pi)\cos^2(\alpha/2)\operatorname{ctg}(\alpha/2)$; P – усилие пенетрации, Н; h – глубина погружения конуса, м.

2.3.4 Определение физико-механических характеристик цементного камня и бетона

Физико-механические характеристики исследуемого цементного камня (прочность на изгиб, прочность при сжатии, водопоглощение) определялись на образцах-балочках размером 40x40x160 мм.

Определение физико-механических характеристик бетона (прочность при сжатии, водопоглощение, коэффициент размягчения) осуществлялось путем испытания образцов-кубов с ребром 10 см. Определение предела прочности при сжатии кубиков и балочек проводилось согласно методике по ГОСТ 310.4 (СТ СЭВ 3920-82). Прочность образцов-балочек на изгиб определялась на приборе МИИ-100.

2.3.5 Методы физико-химических исследований

Рентгенофазовые исследования проводили методом порошков на дифрактометре ДРОН-2.0 при CuK_α -излучении. Исследуемые образцы размельчали в агатовой ступке к полному прохождению сквозь сито № 008. Приготовленную пробу наносили равномерным шаром на кварцевую кювету, которую предварительно смазывали вазелином. Кювету устанавливали на

гонометрическое устройство ГУР-5. С помощью детектора рентгеновского излучения, в качестве которого применялся сцинтиляционный счетчик с скоростью подсчета 500 имп/с, записывали дифрактограммы в интервале углов $2\theta = 8-50^\circ$.

Дифференциально-термический анализ проводили с целью определения температуры, при которой изменяется физическое состояние вещества или ее химический состав. Термограммы снимались с помощью дериватографа OD-1500Q системы Ф. Паулик, Й. Паулик и Л. Ердей рис 2.5.

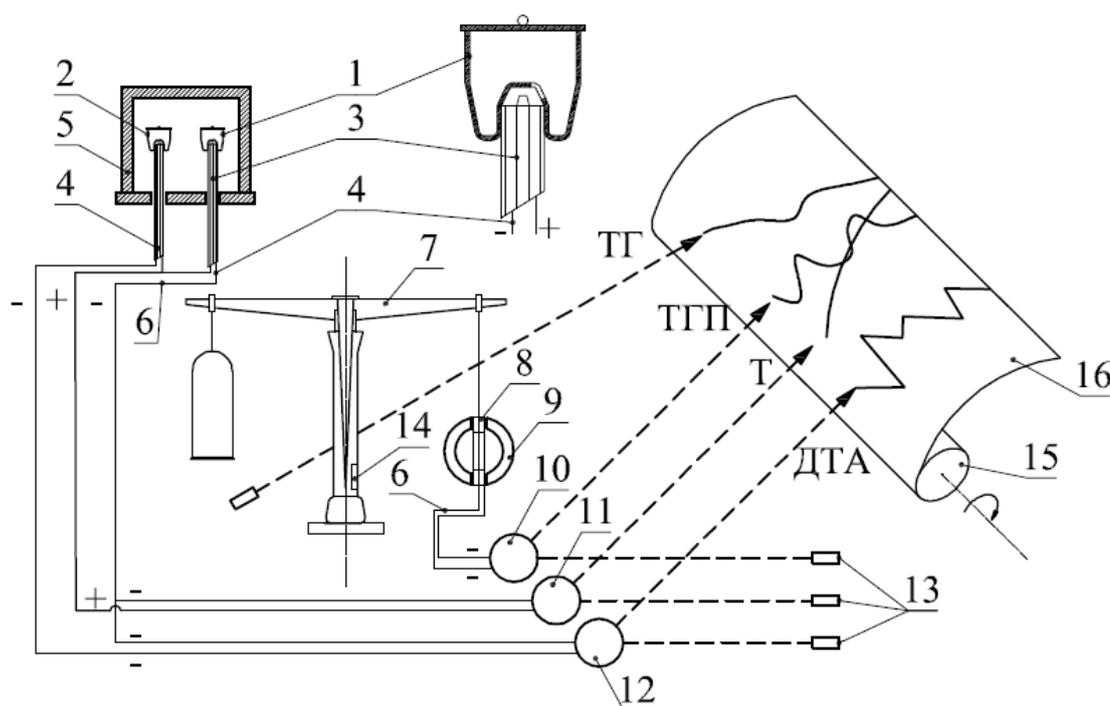


Рис. 2.5. Дериватограф OD-1500Q:

1 – тигель для образца; 2 – тигель для инертного вещества; 3 – фарфоровая трубка; 4 – термопары; 5 – электрическая печь; 6 – нескручивающийся провод; 7 – весы; 8 – катушка; 9 – магнит; 10 – гальванометр для ТГП; 11 – гальванометр для измерения температуры; 12 – гальванометр для ДТА; 13 – лампы; 14 – оптическая щель; 15 – цилиндр для фоторегистрации; 16 – фотобумага

Дериватографом гидратированных композиционных цементов снимали при величине навески 500-1000 мг и скорости подъема температуры

10град/мин. Пробы для термического анализа готовились аналогично с пробами для рентгенофазового анализа.

Исследования микроструктуры препарированных образцов и фотографирование сколов цементного камня, гидратированного в разных условиях, были проведены на растровом электронном микроскопе TESLA BS-300, который дает возможность прямого исследования поверхности твердых объектов. Растровый электронный микроскоп работает при ускоряющих напряжениях до 30 кВ. При этом достигается раздельная способность 20 нм. Электронно-оптическое увеличение 5-50000 раз.

2.4 Обработка результатов эксперимента

Вычисления результатов эксперимента и обработка их проводились с помощью компьютерных технологий. Для накопления, анализа и сортировки полученных экспериментальных данных применялись программы, входящие в комплект программ Microsoft Office 2007. Редактирование части рисунков и графиков производилось с помощью профессиональных графических редакторов. Построение и статистический анализ экспериментально-статистических моделей (ЭСМ) выполнялся по стандартным методикам с применением диалоговой системы COMPEX, разработанной на кафедре ПАТСМ Одесской государственной академии строительства и архитектуры (проф. Вознесенский В.А., проф. Ляшенко Т.В.). Все модели построены со степенью риска $\alpha = 0,2$.

РАЗДЕЛ 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕМЕНТНЫХ СУСПЕНЗИЙ С ДОБАВКОЙ МИКРОКРЕМНЕЗЕМА

3.1 Влияние микрокремнезема на эффективную вязкость механоактивированных цементных суспензий

Формирование микроструктуры цементных материалов происходит в результате протекания сложных процессов гидратации и твердения минеральных вяжущих веществ и характеризуется индукционным и кристаллизационным периодами структурообразования.

В индукционный период с момента перемешивания цемента с водой на поверхности зерен вяжущего начинается быстрое растворение клинкерных минералов с переходом в гидратную форму с образованием пересыщенного раствора. В дальнейшем, вследствие пересыщения, продукты гидратации выпадают из раствора в виде сильно обводненных коллоидных осадков.

Отличительной способностью композиционных строительных материалов на основе неорганических вяжущих является то, что на начальной стадии их получения самопроизвольно возникает термодинамически устойчивые пространственные структуры с обратимо разрушающимися коагуляционными контактами между частицами [112, 168]. Такие структуры отличаются относительно слабыми по силе взаимодействия контактами между частичками, так называемыми «надмолекулярными связями» [168, 169]. Прочность этих контактов определяется ван-дер-ваальсовыми молекулярными силами сцепления частиц через тончайшие прослойки дисперсионной среды. В процессе сближения частиц они преодолевают электростатические силы отталкивания в структурированной жидкости, возникающие вследствие двойных адсорбционных слоев. Частицы в коагуляционных структурах могут фиксироваться на расстояниях ближней ($h_{\min} \approx 10^{-9}$ м) или дальней ($h_{\max} \approx 10^{-7}$ м) коагуляции, что и определяет разницу

почти на два порядка в силе связи между ними [168]. Энергия связи коагуляционных контактов резко падает при покрытии поверхностей частичек монослоями ПАВ. Адсорбируясь, ПАВ раздвигают частички на расстояние минимум двух мономолекулярных слоев, одновременно экранируя наиболее энергетически активные участки их поверхности [129, 150, 169, 170]. Обязательным условием образования истинно коагуляционных структур является наличие во всей совокупности твердых фаз частиц коллоидных размеров ($<0,1\mu\text{м}$), способных совершать броуновское движение. Распределяясь в общем объеме среды они образуют в совокупности с более крупными частицами пространственный трехмерный каркас, состоящий из цепочек и агрегатов [169]. Вторым важнейшим компонентом дисперсных систем на основе минеральных вяжущих является вода затворения, выполняющая роль дисперсионной среды композиции. Коагуляционные структуры отличаются ярко выраженной зависимостью структурно-механических характеристик от воздействия физико-химических и механических факторов. Наиболее эффективными технологическими воздействиями на высококонцентрированные суспензии вяжущего являются те, которые позволяют достичь предельного разрушения начальной структуры системы, характеризуемой минимальным показателем ее эффективной вязкости [169]. Для этой цели использовался скоростной трибосмеситель с количеством оборотов рабочего органа смесителя 2800 об/мин.

Для приготовления суспензии использовался портландцемент активностью 48 МПа с удельной поверхностью $S_{уд} = 400\text{м}^2/\text{кг}$ и микрокремнезем в количестве до 10% массы портландцемента. Для пластификации смеси использовался разжижитель С-3 в количестве от 0 до 1% массы вяжущего. Время активации цементосодержащих суспензии в эксперименте варьировалось от 0 до 120 сек.

Критерием оценки эффективности рецептурно-технологических воздействий на цементосодержащие суспензии был выбран безразмерный

коэффициент K , определяемый как отношение вязкости, которую суспензия приобретает в результате:

а) только применения скоростного смешения ($K_{см}$);

б) только введения суперпластификатора С-3 ($K_{ПАВ}$);

в) совместного воздействия на суспензию скоростного смешения в присутствии добавки С-3 (K_{Σ}^3):

$$K_{см} = \frac{\eta_0}{\eta_{см}}; \quad (3.1)$$

$$K_{ПАВ} = \frac{\eta_0}{\eta_{ПАВ}}; \quad (3.2)$$

$$K_{\Sigma}^3 = \frac{\eta_0}{\eta_{см+ПАВ}}, \quad (3.3)$$

где: η_0 - эффективная вязкость практически неразрушенной структуры цементосодержащей суспензии, сП; $\eta_{см}$ - эффективная вязкость суспензии (С-3=0%) после скоростного смешения, сП; $\eta_{ПАВ}$ - эффективная вязкость суспензии (скоростное смешение отсутствует) с содержанием С-3=1%.

Результаты исследований эффективной вязкости суспензий приведены в табл. 3.1. Общий анализ экспериментальных данных свидетельствует о влиянии на эффективную вязкость суспензии, как времени скоростного смешения, так и содержания микрокремнезема и суперпластификатора С-3.

Так, в немеханоактивированных суспензиях без суперпластификатора С-3 (время скоростного смешения суспензии 0 сек.) введение в портландцемент 10% микрокремнезема приводит к повышению эффективной вязкости суспензии с 1520 сП до 3868 сП, т.е. почти в 2,5 раза.

Таблица 3.1.
Влияние содержания микрокремнезема в портландцементе,
концентрации С-3 и времени смешения на изменение эффективной вязкости
(η) суспензии

№ п/п	Портландцемент, %	МК, %	С-3, %	Время скоростного смешения суспензии, сек				
				0	30	60	90	120
1	100	0	0	1520	780	580	618	621
2	98	2		1680	950	1010	1286	1339
3	96	4		3530	1842	1850	2006	2250
4	94	6		3760	2198	2391	2868	2880
5	92	8		3832	2855	3209	3311	3325
6	90	10		3868	3230	3405	3628	3720
7	100	0	0,25	961	178	234	324	492
8	98	2		984	182	247	320	408
9	96	4		1390	330	385	420	570
10	94	6		1550	700	820	970	990
11	92	8		2050	630	720	872	1116
12	90	10		2731	1470	1570	1941	2132
13	100	0	0,5	860	101	91	90	116
14	98	2		840	101	96	116	136
15	96	4		1170	95	86	99	115
16	94	6		1220	92	85	98	117
17	92	8		1807	157	134	158	199
18	90	10		2200	194	180	219	251
19	100	0	0,75	740	82	74	75	82
20	98	2		572	106	85	94	108
21	96	4		1150	179	82	127	110
22	94	6		1480	90	78	75	71
23	92	8		1220	112	94	105	128
24	90	10		1802	120	104	119	205
25	100	0	1,0	643	80	77	79	84
26	98	2		720	111	86	72	65
27	96	4		840	130	80	69	75
28	94	6		980	78	80	67	65
29	92	8		1190	104	81	89	74
30	90	10		1780	97	83	92	78

Примечание: МК – микрокремнезем Никопольского ферросплавного завода.

Для активированной суспензии увеличение количества микрокремнезема в портландцементе от 0 до 10% приводит к увеличению эффективной вязкости почти в 6 раз [171]. По иному введение микрокремнезема оказывает влияние на изменение эффективной вязкости в присутствии суперпластификатора С-3. Так, если для немеханоактивированной суспензии с содержанием С-3 в количестве 1%, увеличение концентрации микрокремнезема от 0 до 10% приводит к увеличению эффективной вязкости с 643 до 1780сПа, т.е. почти в 2,8 раза, то в активированных суспензиях увеличение концентрации микрокремнезема до 10% практически не сказывается на изменении эффективной вязкости рис.3.1.

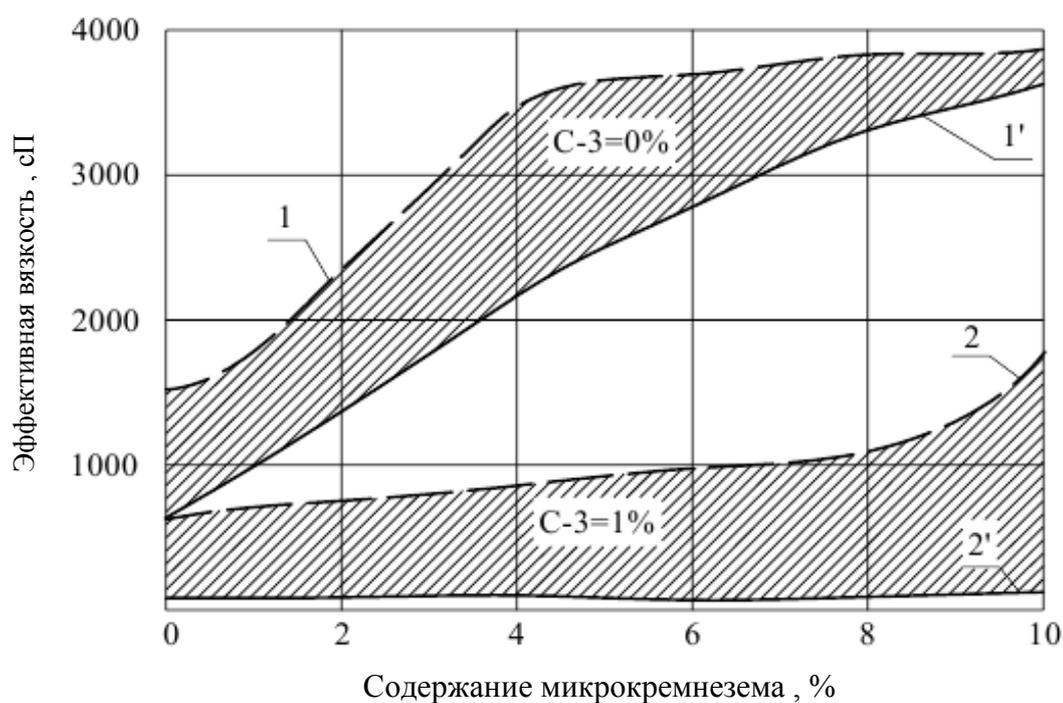


Рис. 3.1. Влияние микрокремнезема на эффективную вязкость цементосодержащей суспензии

- - механоактивированная суспензия;
- - - - контроль

Наличие в немеханоактивированных суспензиях С-3 приводит к снижению эффективной вязкости как в «чистых» (МК=0%) цементных суспензиях, так и цементных суспензиях, содержащих в своем составе микрокремнезем, рис. 3.2.

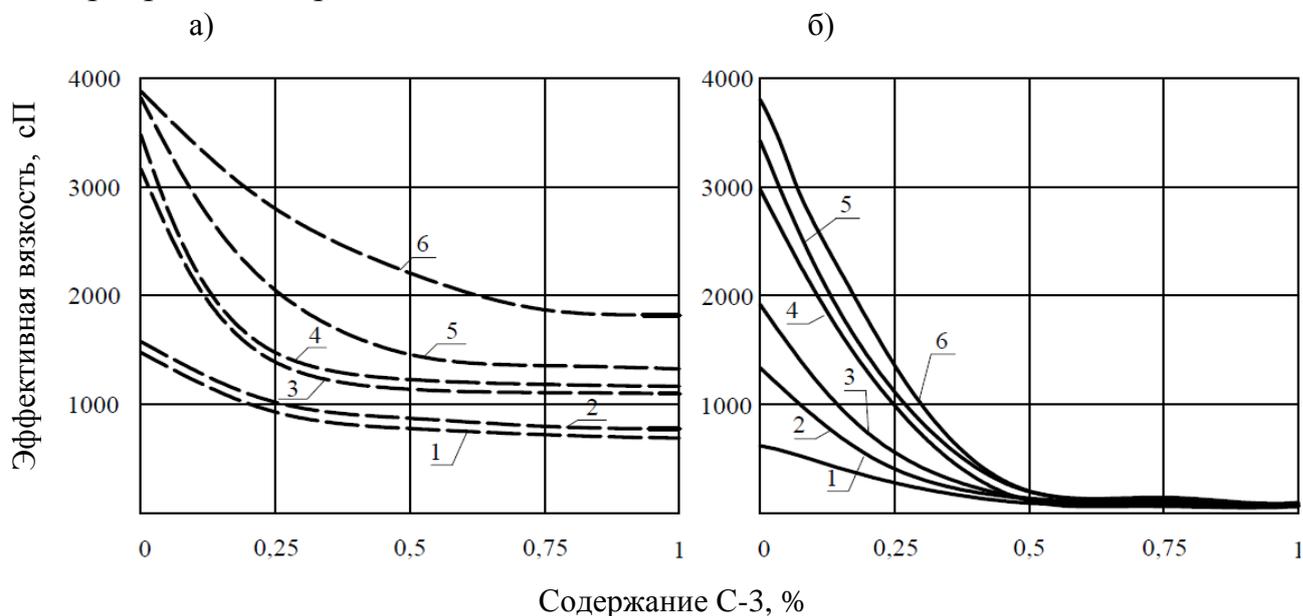


Рис. 3.2. Влияние добавки С-3 на изменение эффективной вязкости цементосодержащей суспензии: 1 – МК=0%; 2 – МК=2%; 3 – МК=4%; 4 – МК=6%; 5 – МК=8%; 6 – МК=10%
а) контроль; б) активированная суспензия

Выявлено влияние времени активации суспензии на изменение эффективной вязкости цементосодержащих суспензий рис.3.3. Если для суспензии без суперпластификатора С-3 скоростное смешение приводит лишь к незначительному снижению вязкости (от 1,04 до 2,45 раз), то в присутствии С-3 эффективная вязкость в процессе скоростного смешения снижается от 7,65 до 22,8 раза [172].

В результате проведенных исследований выявлен значительный синергетический эффект снижения вязкости цементных суспензий с добавкой МК при воздействии на них скоростного смешения в присутствии суперпластификатора С-3. Критерием количественной оценки данного эффекта был принят уровень синергизма (Y_c), определяемый как отношение

реального коэффициента снижения эффективной вязкости (K_{Σ}^{ε}), полученного экспериментальным путем, к его расчетному значению ($K_{\Sigma}^P = K_{cm} \times K_{ПAB}$) из условия аддитивности влияния данных факторов на изменение вязкости:

$$Y_c = \frac{K_{\Sigma}^{\varepsilon}}{K_{\Sigma}^P}. \quad (3.4)$$

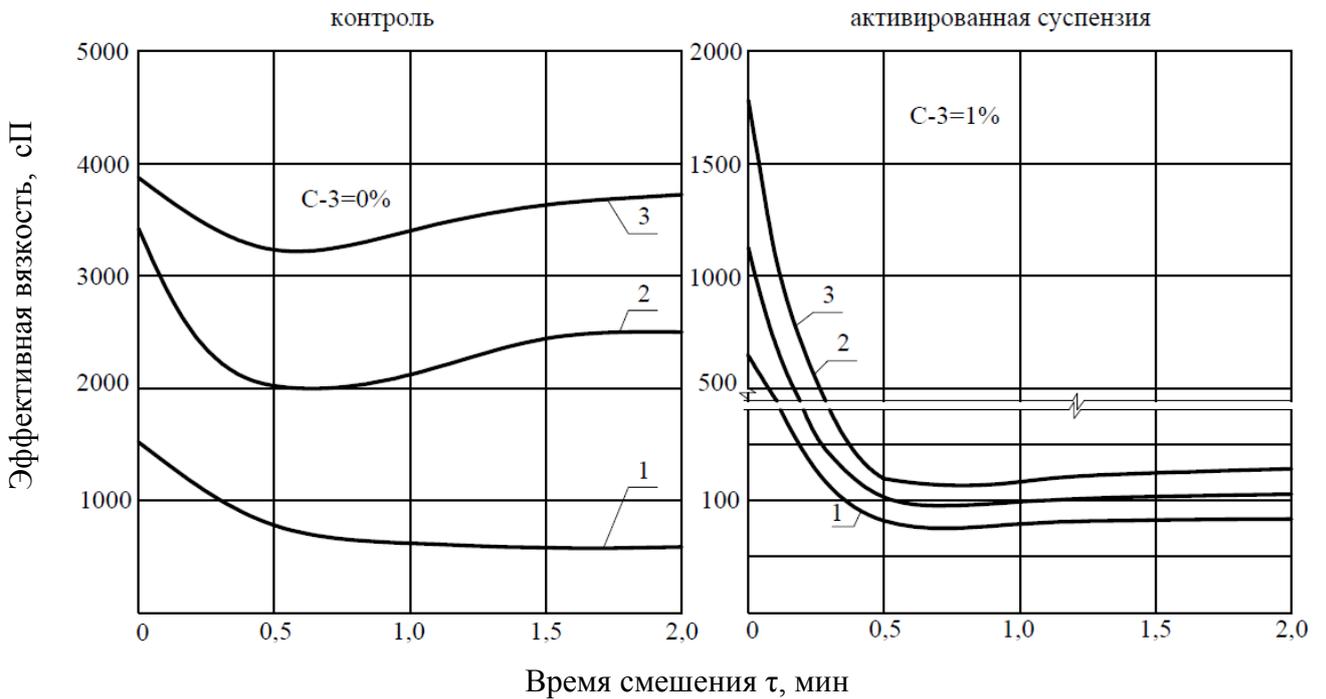


Рис. 3.3. Влияние времени активации на изменение эффективной вязкости цементосодержащей суспензии

1 – содержание микрокремнезема 0%; 2 – содержание микрокремнезема 5%;
3 – содержание микрокремнезема 10%

Установлено, что уровень синергизма тем выше, чем больше концентрация МК в цементных суспензиях, табл. 3.2.

Так, увеличение содержания МК в портландцементе от 0 до 10% приводит к увеличению Y_c с 3,7 до 17,9, т.е. больше чем в 4,8 раза рис 3.4. [173].

Таблица 3.2

Влияние содержания МК в портландцементе на изменение Y_c

Концентрация микрокремнезема, %	K_{CM}	$K_{ПЛАВ}$	K_{Σ}^P	K_{Σ}^9	Y_c
0,0	2,46	2,36	5,8	21,7	3,7
2,0	2,00	2,87	5,74	24,3	4,23
4,0	1,86	3,06	5,69	51,8	9,1
6,0	1,56	3,05	4,76	57,1	12,0
8,0	1,34	2,59	3,47	51,8	14,9
10,0	1,2	2,17	2,6	46,6	17,9

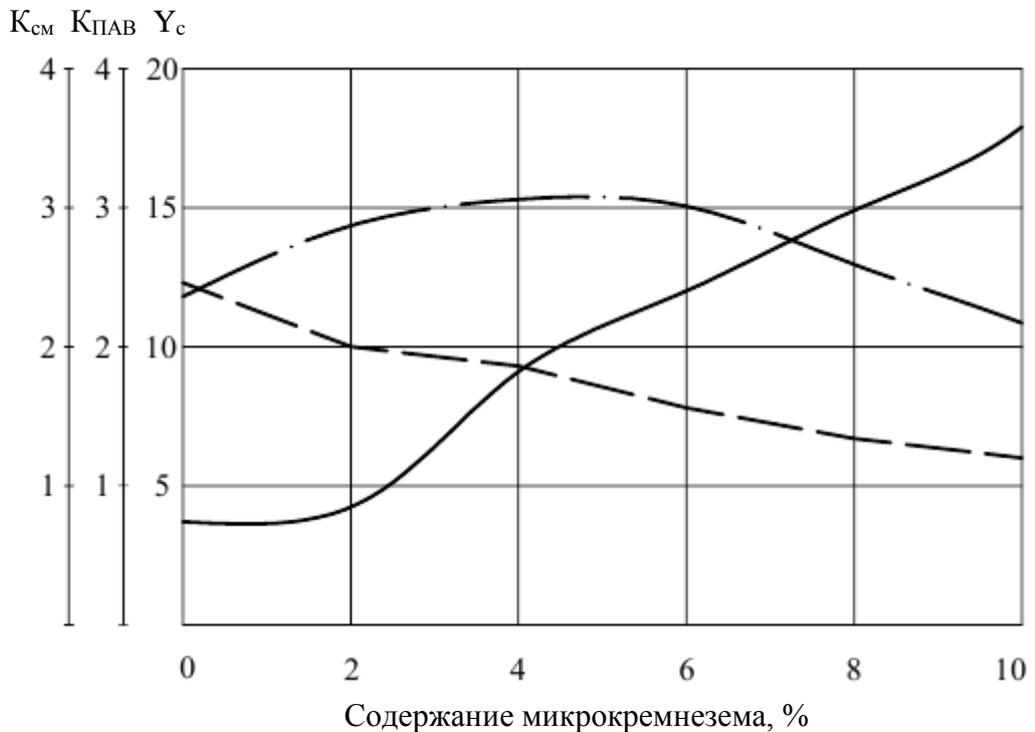


Рис. 3.4. Влияние количества микрокремнезема на показатель Y_c , K_{CM} , $K_{ПЛАВ}$

- - уровень синергизма Y_c ;
- - коэффициент K_{CM} ;
- · - · - · - коэффициент $K_{ПЛАВ}$

Таким образом приведенные данные свидетельствуют о влиянии на эффективную вязкость суспензии времени скоростного смешения, содержания микрокремнезема и суперпластификатора С-3. Введение

микрокремнезема в портландцемент приводит к увеличению эффективной вязкости суспензии. Необходимым условием получения равновязких суспензий является введение суперпластификатора С-3 в количестве не менее 1%.

Скоростное смешение цементных суспензий с добавками микрокремнезема до 10% в присутствии С-3 приводит к резкому снижению эффективной вязкости, что позволит получать бетонные смеси с повышенной удобоукладываемостью.

3.2 Влияние механоактивации на сроки схватывания, пластическую прочность и тепловыделение цементных суспензий с добавкой микрокремнезема

В результате активации цементных суспензий изменяется количественный и качественный составы продуктов новообразования, определяющие структурно-механические свойства материала [174]. Происходит изменение также энергетического состояния частиц минерального наполнителя, что переводит их в состояние большей химической активности [92].

Организация структуры механоактивированных систем происходит за счёт межчастичных взаимодействий, сопровождающихся появлением большого количества продуктов новообразований, что возможно оценить сроками схватывания твердеющих суспензий. Определение сроков схватывания проводилось на механоактивированных цементных суспензиях одинаковых составов с $V/T=0,16$; время обработки суспензии в скоростном смесителе принималось равным 90 сек., концентрация суперпластификатора С-3 составляла 1% от массы вяжущего. Концентрация микрокремнезема варьировалась от 0 до 10%. Для контроля готовились аналогичные по составу неактивированные суспензии.

Проведенные результаты исследований свидетельствует о том, что активация сокращает как начало сроков схватывания цементных суспензий (с 58 до 48 мин, т.е. на 17,2%) так и конец сроков схватывания суспензий (с 306 мин. до 252 мин, т.е. на 18,6%) табл. 3.3.

Таблица 3.3

Сроки схватывания цементосодержащей суспензии

№ п/п	Кол-во микрокремнезема в вяжущем, %	С-3, %	В/Т	Сроки схватывания			
				Начало схватывания, мин		Конец схватывания, мин	
				МА	контроль	МА	контроль
1	0	1,0	0,16	48	58	252	306
2	2,5	1,0	0,16	39	48	225	260
3	5	1,0	0,16	31	37	200	232
4	7,5	1,0	0,16	28	33	181	218
5	10	1,0	0,16	23	29	160	191

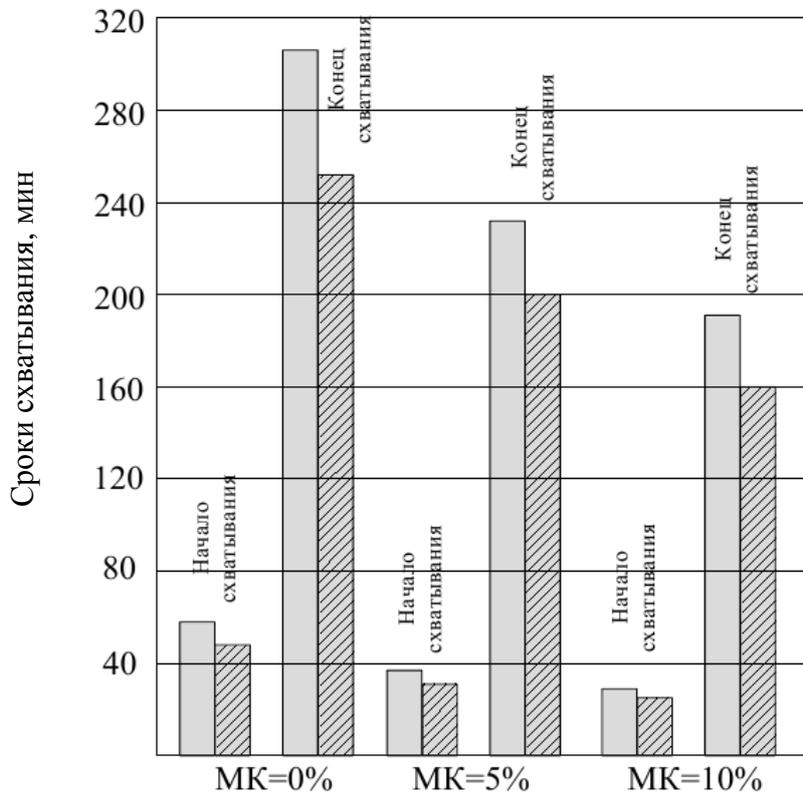


Рис. 3.5. Влияние механоактивации на сроки схватывания цементосодержащей суспензии при содержании микрокремнезема 0, 5 и 10%

-  - суспензия на механоактивированном вяжущем;
-  - контроль

Введение в состав портландцемента микрокремнезема оказывает ускоряющее влияние на сроки схватывания суспензий, рис. 3.5. Так при введении микрокремнезема в портландцемент в количестве 10% начало схватывания активированной суспензии наступает через 23мин, т.е. в 2,1 раза быстрее по сравнению с началом сроков схватывания суспензий на чистом портландцементе (48мин.). Аналогичное влияние микрокремнезема также и для суспензий на неактивированном вяжущем.

Изменение сроков схватывания цементных композиций в зависимости от способов их приготовления и количества микрокремнезема предполагает изменение такой важной в процессах структурообразования характеристики, как структурная прочность.

По мнению П.А. Ребиндера [175], можно выделить три стадии структурообразования: 1 – растворение клинкерных фаз и выделение кристаллов; 2 – образование коагуляционной структуры; 3 – рост и срастание кристаллов. При анализе кинетики гидратации авторы [176] выделяют пять периодов: I, II – индукционный период; III – период ускорения и IV, V – замедление гидратации.

В силу того, что активация частиц ведет к изменению энергетического состояния поверхности, можно предположить, что это приведет к изменению длительности периодов организации структуры твердеющих вяжущих, которые можно количественно оценить через изменение структурной прочности.

Установлено, что скорость набора структурной прочности механоактивированной суспензии значительно выше по сравнению с контролем (рис.3.6). Кроме того, установлено, что на изменение структурной прочности оказывает влияние количество добавки микрокремнезема.

Так при 10%-ом содержании микрокремнезема интенсивный прирост пластической прочности наблюдается после 6-ти часов твердения, при контроле после 8 час. При применении бездобавочного портландцемента,

прирост структурной прочности механоактивированных суспензий достигается после 10 час., а при контроле после 13 час.

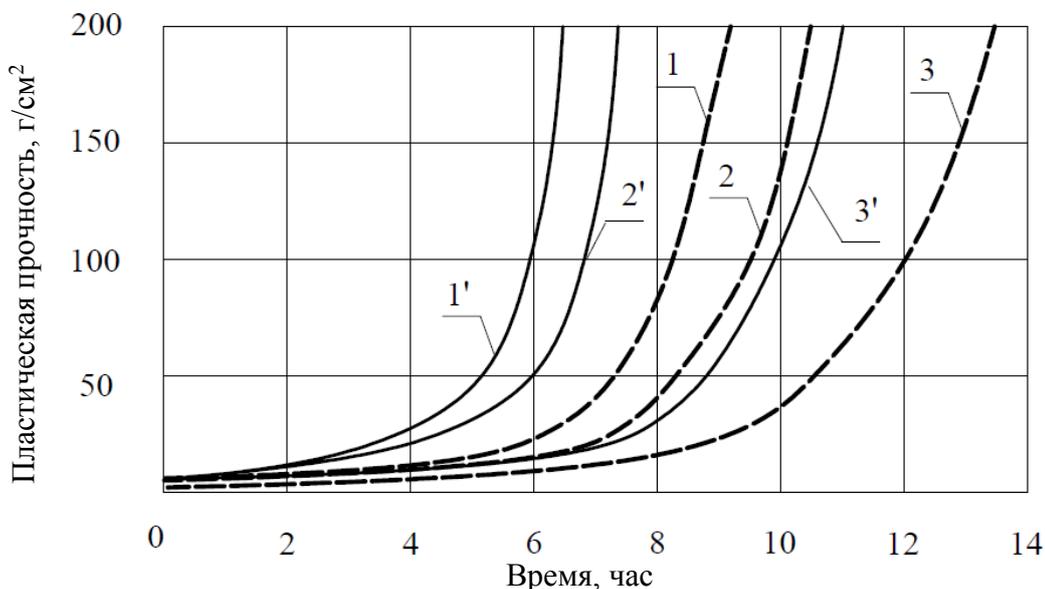


Рис. 3.6. Кинетика изменения пластической прочности твердеющих суспензий:

- активированная суспензия;
- - - - - контроль;

Содержание МК: 1,1' — 10%; 2,2' — 5%; 3,3' — 0%

Результаты экспериментов подтверждают влияние механоактивации на изменение химической активности и характера структурообразования активированных вяжущих.

Реакции гидратации цементных минералов являются экзотермическими, и взаимодействие портландцемента с водой сопровождается выделением тепла.

Для выявления влияния механоактивации цементосодержащих суспензий с добавкой микрокремнезема на изменение температуры твердеющей системы проведен ряд экспериментов, в которых контролировались температура как активированных цементосодержащих суспензий, так и температура неактивированных суспензий.

Фиксация температуры твердеющей цементной суспензии производилась через каждый час твердения. Начальная температура

цементной суспензии ($V=200\text{мл}$) принималась равной $+20^{\circ}\text{C}$. Установлено, что механоактивация вызывает большую интенсивность разогрева твердеющей суспензии.

Так, если для механоактивированной суспензии максимальная интенсивность изменения температуры наблюдается в возрасте 6 - 8 часов, то максимальная интенсивность изменения температуры для немеханоактивированной суспензии (контроль) наблюдается через 8 - 10 часов (рис. 3.7.). Также следует отметить, что время наступления пика разогрева цементной суспензии для всех изученных концентраций микрокремнезема уменьшается.

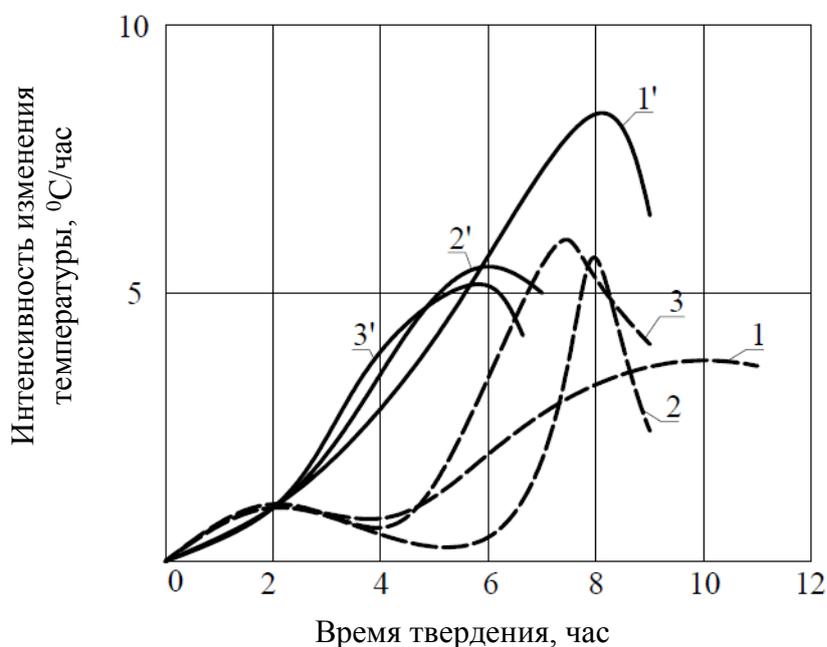


Рис. 3.7. Интенсивность изменения температуры твердеющих цементных суспензий:

- - активированная суспензия;
- - - - - контроль;

Введение микрокремнезема снижает величину разогрева цементной суспензии, рис. 3.8.

Увеличение концентрации МК в портландцементе от 0 до 10% приводит к снижению максимального разогрева суспензии на механоактивированном вяжущем с 62 до $46,8^{\circ}\text{C}$ (рис.3.8). Аналогичное снижение максимального

разогрева наблюдается и для немеханоактивированной суспензии (контроль), при этом происходит снижение температуры с 54 до 40°C (рис.3.8).

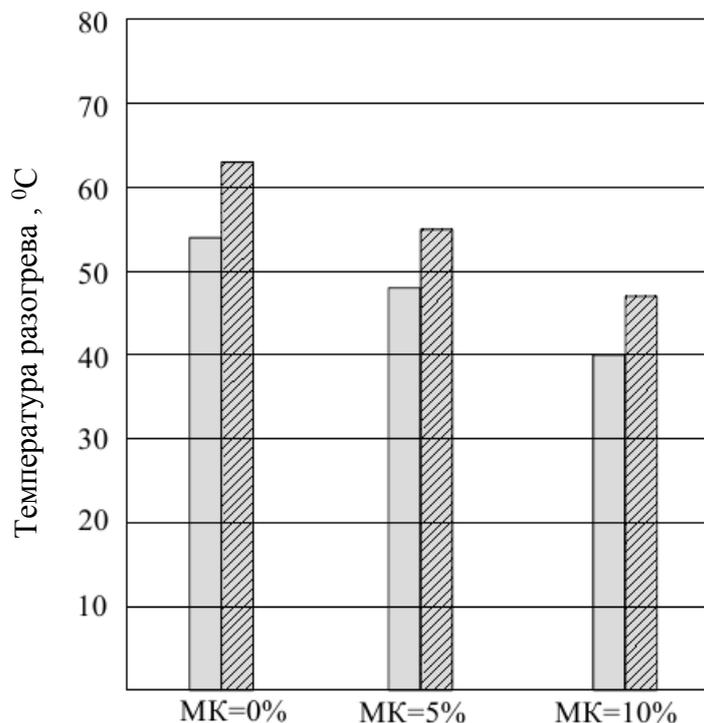


Рис. 3.8. Влияние механоактивации на температуру разогрева цементно-содержащих суспензии при содержании микрокремнезема в вяжущем 0, 5 и 10%

 - механоактивированная суспензия;
 - контроль

Экспериментальные данные по срокам схватывания, пластической прочности и тепловыделения [177] подтверждают ранее высказанное предположение о влиянии количества микрокремнезема на кинетику структурообразования.

3.3 Влияние содержания микрокремнезема в вяжущем на прочность цементного камня

Проведенные исследования показали, что механоактивация портландцемента с добавкой микрокремнезема изменяет их качественный и количественный составы, что ведёт к изменению условий организации их

структуры. В свою очередь, изменение характера структурообразования вызывает изменение свойств твердеющих композиций по сравнению с цементными композициями, полученными по обычной технологии. Можно предположить, что структурная модификация приведёт к изменению прочностных характеристик затвердевших цементных композиций. Представлял интерес выяснить влияние механоактивации портландцемента в присутствии микрокремнезема на изменение механических характеристик цементного камня. Суспензии готовились путем последовательной загрузки в трибоактиватор отдозированных количеств воды затворения, разжижителя С-3, портландцемента и микрокремнезема.

В эксперименте использовался портландцемент 3-х удельных поверхностей: 300; 400 и 500 м²/кг. Время активации суспензии составляло 120 сек. Концентрация суперпластификатора С-3 варьировалась в диапазоне от 0 до 1% массы вяжущего. Скорость вращения ротора смесителя принималась равной 2800 об/мин. Расход воды затворения для приготовления суспензий составлял 35% от массы вяжущего (портландцемент + микрокремнезем). Столь высокое значение водовяжущего отношения (0,35) вызвано конструктивными особенностями скоростного смесителя. Суспензии с более низкими значениями водовяжущего отношения, при отсутствии в его составе суперпластификатора, характеризуются относительно высокой эффективной вязкостью и поэтому не могут быть эффективно активированы в камере смешения.

После активации цементосодержащие суспензии выдерживались в формах в течении одних суток при $t=+20^{\circ}\text{C}$, после чего образцы разопалубливались и помещались в камеру нормального твердения. Испытания образцов на изгиб и на сжатие осуществлялись через 3, 7, 28 суток.

Для контроля готовились образцы аналогичных составов, вяжущее которых не подвергалось активации. Результаты экспериментальных данных приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Влияние органо-минеральной добавки на прочность цементного камня

№ п/п	Состав вяжущего, %		Водовязущее отношение	Концентрация С-3, % от массы вяжущего	Прочность цементного камня, МПа, в возрасте					
	Портланд- цемент	Микро- кремнезем			3 сут.		7 сут.		28 сут.	
					R _{изг.}	R _{сж.}	R _{изг.}	R _{сж.}	R _{изг.}	R _{сж.}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	100	0	0,35	1,0	<u>4,2</u> 3,2	<u>13,7</u> 9,8	<u>5,3</u> 4,14	<u>19,9</u> 14,6	<u>8,66</u> 6,32	<u>39,8</u> 28,6
2	97,5	2,5			<u>4,5</u> 3,4	<u>15,3</u> 11,5	<u>5,9</u> 4,4	<u>21</u> 15,7	<u>8,9</u> 6,5	<u>45</u> 33
3	95	5			<u>4,8</u> 3,64	<u>16,8</u> 13,12	<u>6,4</u> 4,72	<u>22,1</u> 16,6	<u>9,1</u> 6,62	<u>50,2</u> 36,1
4	92,5	7,5			<u>5,2</u> 4,0	<u>18</u> 13,6	<u>7,4</u> 5,4	<u>24,2</u> 18,3	<u>10,0</u> 7,3	<u>58,1</u> 41,2
5	90	10			<u>5,5</u> 4,3	<u>18,2</u> 14,12	<u>8,3</u> 6,04	<u>26,1</u> 20,1	<u>10,7</u> 7,83	<u>64,8</u> 46,3
6	100	0	0,35	0,5	<u>4,62</u> 3,52	<u>15,1</u> 10,8	<u>5,83</u> 4,6	<u>21,9</u> 16,1	<u>9,5</u> 7,02	<u>44,2</u> 32,0
7	97,5	2,5			<u>5,01</u> 3,74	<u>17,1</u> 12,9	<u>6,7</u> 4,9	<u>23,5</u> 17,7	<u>9,9</u> 7,2	<u>50,4</u> 37,3
8	95	5			<u>5,3</u> 4,1	<u>18,8</u> 14,7	<u>7,1</u> 5,2	<u>24,8</u> 18,7	<u>10,1</u> 7,4	<u>56</u> 40,7
9	92,5	7,5			<u>5,72</u> 4,4	<u>20,2</u> 15,2	<u>8,4</u> 6,1	<u>27,2</u> 20,7	<u>11,3</u> 8,3	<u>65,3</u> 46,2
10	90	10			<u>6,1</u> 4,73	<u>20,7</u> 16,1	<u>9,4</u> 6,8	<u>29,5</u> 22,7	<u>12,1</u> 8,8	<u>74,5</u> 53,3
11	100	0	0,35	0	<u>5,08</u> 4,1	<u>17,1</u> 12,2	<u>6,7</u> 5,3	<u>25,2</u> 18,4	<u>10,9</u> 8,1	<u>50,8</u> 36,8
12	97,5	2,5			<u>5,8</u> 4,3	<u>19,3</u> 14,6	<u>7,7</u> 5,6	<u>27</u> 20,4	<u>11,5</u> 8,3	<u>58,0</u> 42,9
13	95	5			<u>6,1</u> 4,7	<u>21,2</u> 16,6	<u>8,0</u> 6,0	<u>28,8</u> 21,5	<u>11,6</u> 8,51	<u>64,4</u> 46,8
14	92,5	7,5			<u>6,58</u> 5,06	<u>22,8</u> 17,2	<u>9,7</u> 7	<u>31,1</u> 23,8	<u>13</u> 9,5	<u>75,1</u> 53,2
15	90	10			<u>7,02</u> 5,4	<u>23,4</u> 18,2	<u>10,8</u> 7,8	<u>34</u> 26	<u>14</u> 10,1	<u>85,7</u> 61,3

Примечание: над чертой приведены значения прочности цементного камня, вяжущее которого подвергалось механоактивации; под чертой – значения прочности контрольных образцов.

Обращает на себя внимание тот факт, что повышение концентрации С-3 от 0 до 1% (при $V/V=\text{const}=0,35$) приводит к снижению прочности при изгибе и сжатии образцов из цементного камня на механоактивированном вяжущем в исследуемом диапазоне сроков твердения 3, 7 и 28 суток (рис. 3.10, 3.11). Это, на наш взгляд, обусловлено резким снижением эффективной вязкости суспензии, подверженной активации, рис. 3.9. Если для немеханоактивированной суспензии увеличение концентрации С-3 от 0 до 1% приводит к снижению эффективной вязкости с 3868 до 1780 сП (на 46%), то активация приводит к снижению эффективной вязкости суспензии не менее чем в 49 раз.

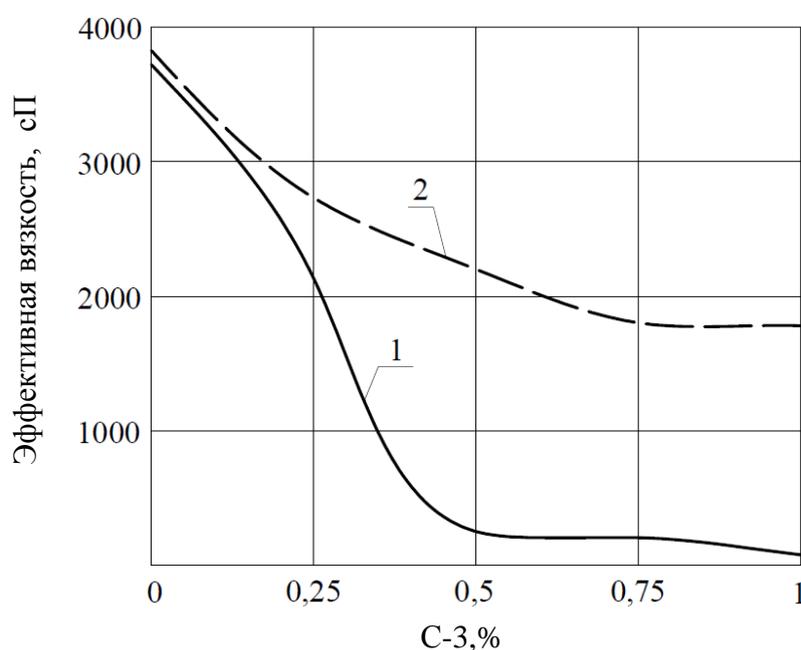


Рис. 3.9. Влияние С-3 на изменение эффективной вязкости цементосодержащей суспензии (содержание МК в вяжущем – 10%):

1 – механоактивированная суспензия; 2 – контроль

Как видно из рис. 3.12 осветление суспензии тем больше, чем ниже исходная минимальная вязкость суспензии. К 60-и минутам выдерживания суспензии седиментация практически прекращается вследствие связывания воды затворения минералами портландцементного клинкера.

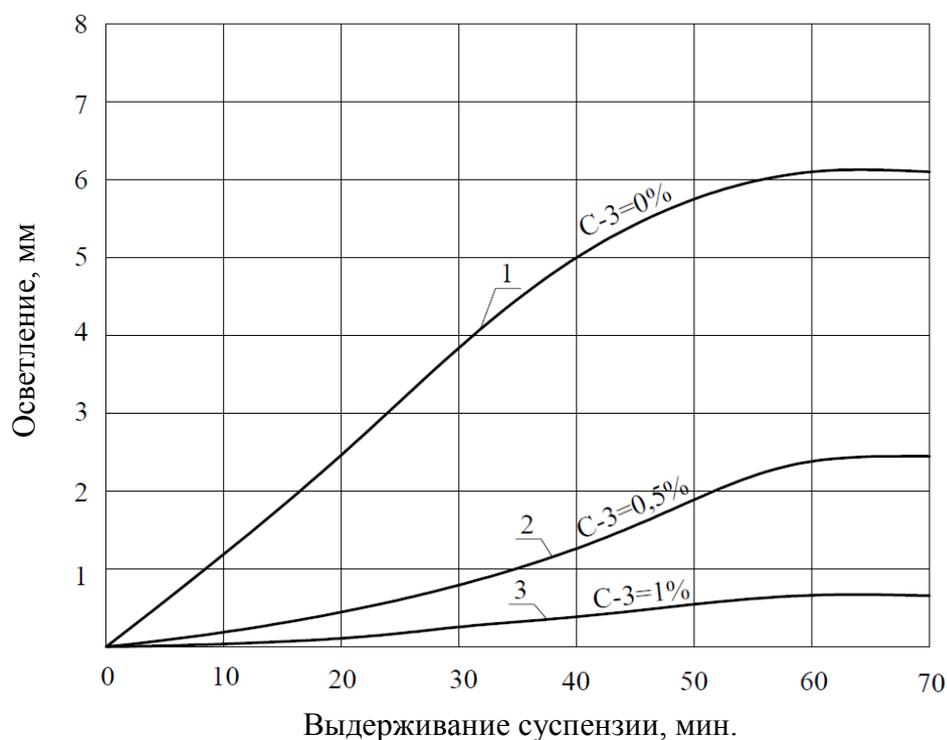


Рис. 3.12. Влияние эффективной вязкости суспензии на величину водоотделения

- 1 – эффективная вязкость – 3720 сП; 2 – эффективная вязкость – 251 сП;
 3 – эффективная вязкость – 78 сП;
 1, 2, 3 – содержание микрокремнезема в вяжущем - 10%

Установлено, что при прочих равных условиях механоактивация цементосодержащих суспензий приводит к повышению прочностных характеристик цементного камня во всем исследованном временном интервале, рис. 3.13.

Экспериментально установлено, что увеличение содержания микрокремнезема в вяжущем приводит к возрастанию прочности цементного камня на механоактивированном вяжущем, рис. 3.14.

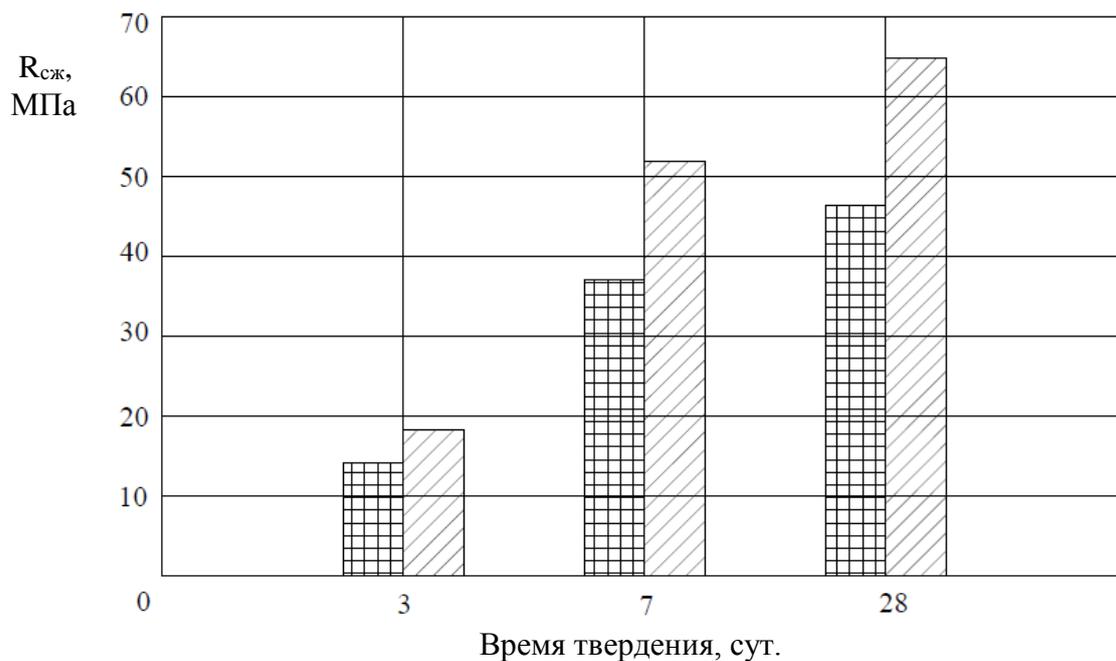
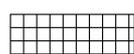


Рис. 3.13. Влияние механоактивации на $R_{сж}$ цементного камня
(содержание МК=10%, концентрация С-3=1%)



- контроль;



- цементный камень на механоактивированном вяжущем

В большей степени влияние микрокремнезема на прочность цементного камня сказывается в отдаленные сроки твердения (28 сут.). Так, если в 3-х суточном возрасте прочность цементного камня (содержание С-3=1%) при увеличении микрокремнезема до 10% повышается на 25 %, то в 28-и суточном возрасте прирост прочности составляет не меньше 40 %, рис. 3.14.

При отсутствии С-3 в воде затворения, прочность цементного камня на механоактивированном вяжущем в возрасте 3-х суток возрастает с 17,1 до 23,4 МПа, а в возрасте 28-и суток с 50,8 до 85,7 МПа, при увеличении содержания микрокремнезема в вяжущем от 0 до 10% (рис. 3.15.)

Приведенные на рис. 3.16 кривые нарастания прочности цементного камня во времени свидетельствуют о существенном вкладе микрокремнезема в кинетику набора прочности. Это характерно как в ранние сроки (3, 7 сутки) так и в более отдаленные сроки твердения (28 сутки).

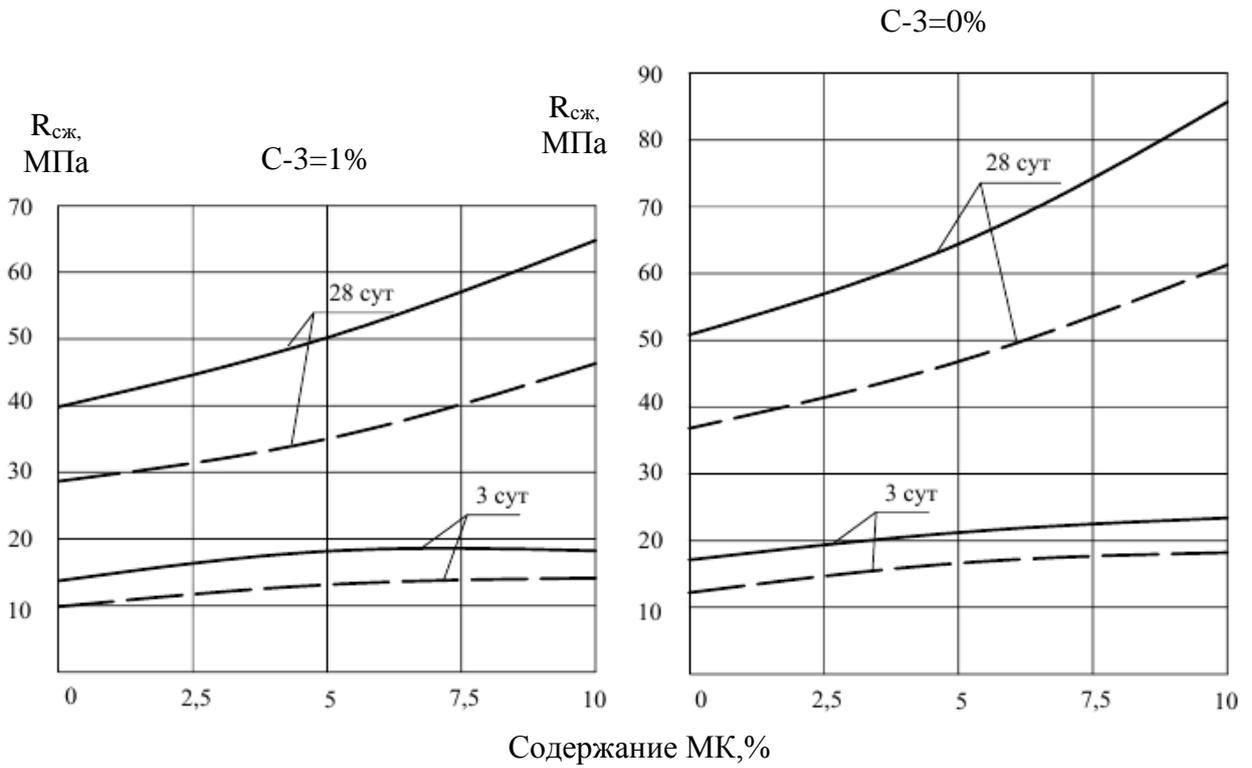


Рис. 3.14. Влияние содержания микрокремнезема в вяжущем на прочность цементного камня:

— - цементный камень на механоактивированном вяжущем;
 - - - - - контроль

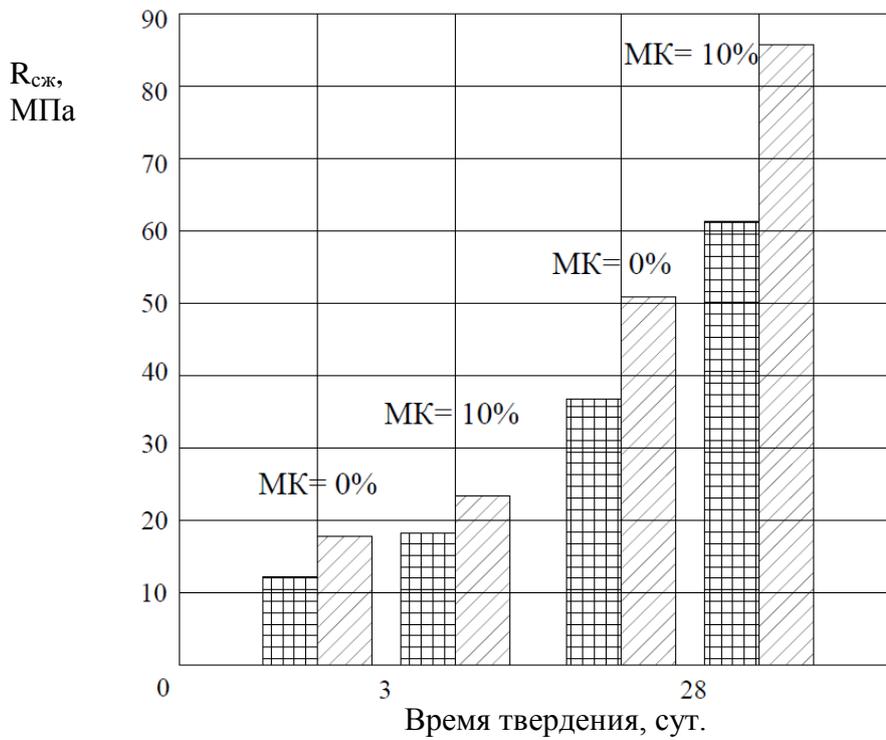


Рис. 3.15 Влияние микрокремнезема на $R_{сж}$ цементного камня (C-3=0%):

▣ - контроль;
 ▨ - цементный камень на механоактивированном вяжущем

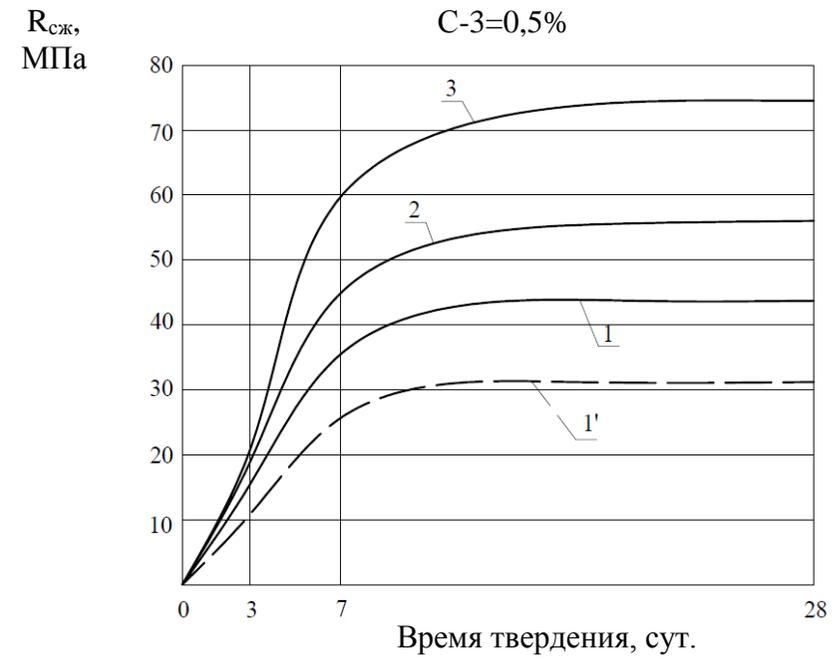
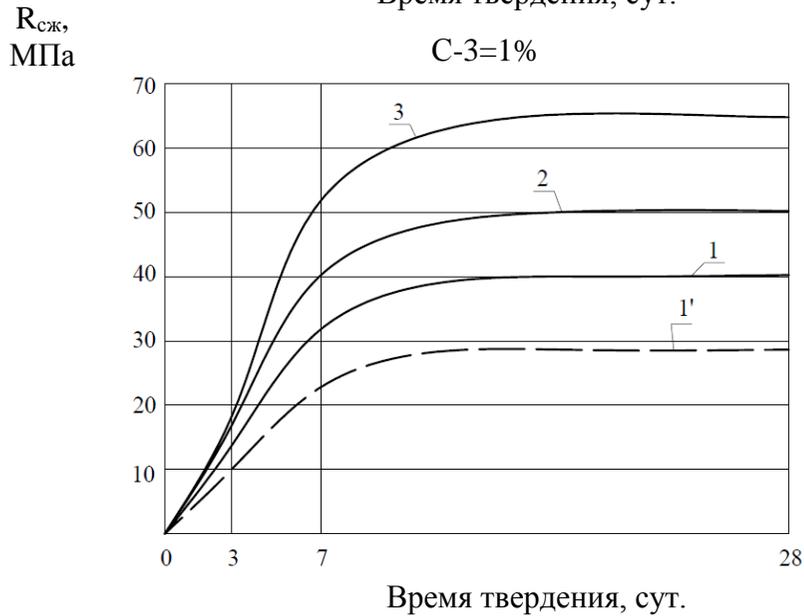
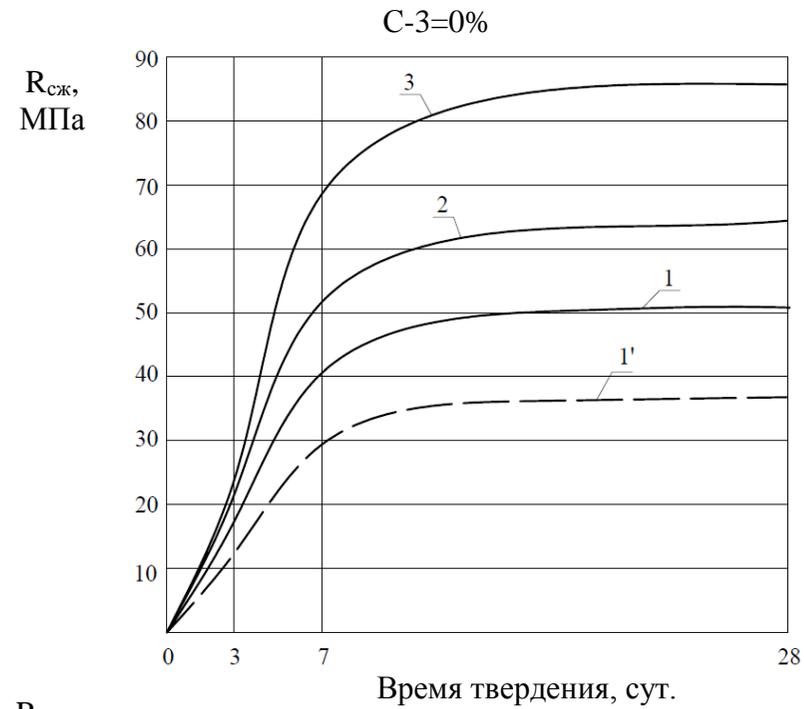


Рис.3.16. Кинетика нарастания прочности при сжатии цементного камня: 1,1' – МК=0%; 2 – МК=5%; 3 – МК=10%
 ———— - цементный камень на механоактивированном вяжущем;
 - - - - - контроль

Совместное исследование факторов воздействия – механоактивации и микрокремнезема, при определенной концентрации С-3 позволяет увеличить прочность цементного камня с 39,8 до 85,7 МПа, то есть больше чем на 2,2 раза.

Аналогичное влияние при введении микрокремнезема наблюдается и при проверке прочности цементного камня на изгиб. Так при увеличении содержания микрокремнезема с 0 до 10% прочность материала при изгибе увеличивается с 8,66 до 10,7 МПа (механоактивация, концентрация С-3=1%), т.е. в 1,2 раз, при контроле прочность материала на изгиб увеличивается с 6,32 до 7,83 МПа (рис. 3.17, 3.18).

При отсутствии в составе суперпластификатора С-3, прочность при изгибе цементного камня на механоактивированном вяжущем (на 28 суток твердения) увеличилась с 10,9 до 14 МПа, для контрольных образцов прочность увеличилась с 8,1 до 10,1 МПа (рис. 3.17. 3.18).

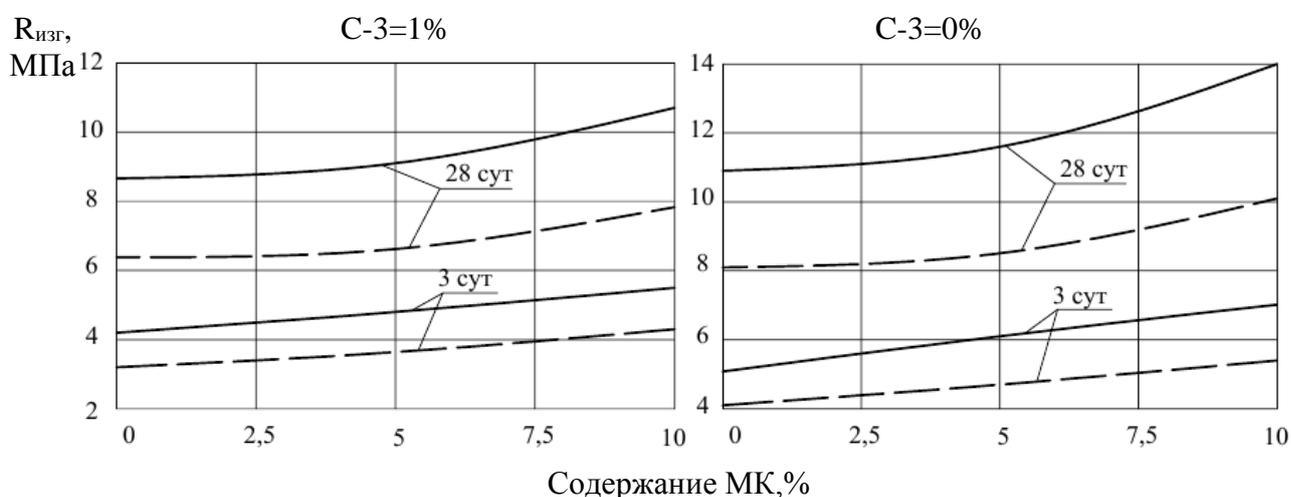


Рис. 3.17. Влияние содержания микрокремнезема на прочность при изгибе цементного камня:

- - цементный камень на механоактивированном вяжущем;
- - - - - контроль

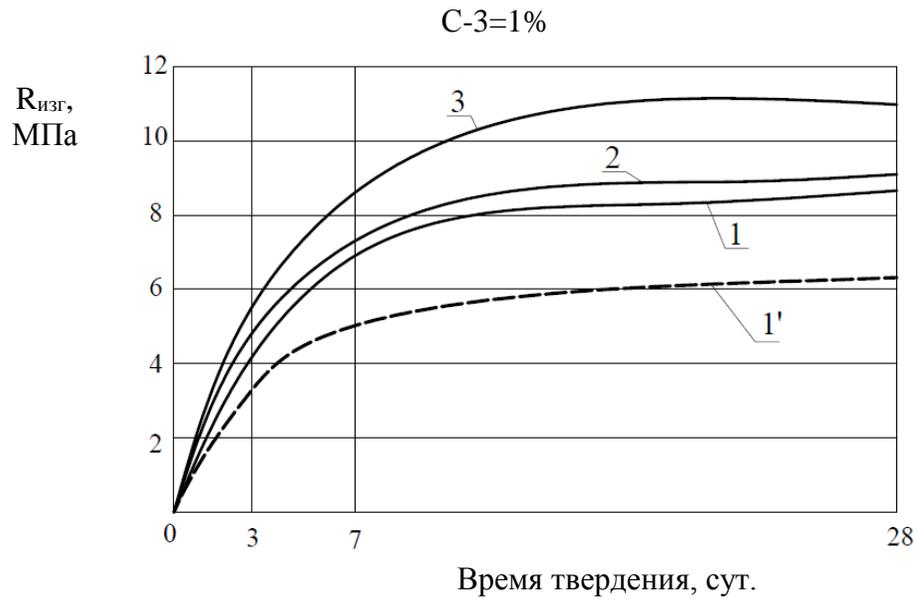
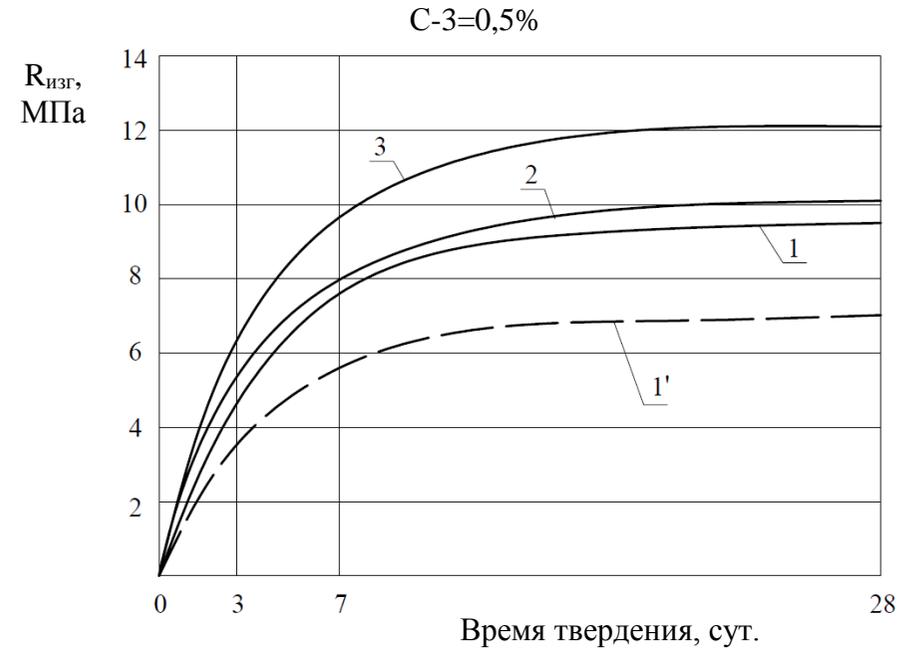
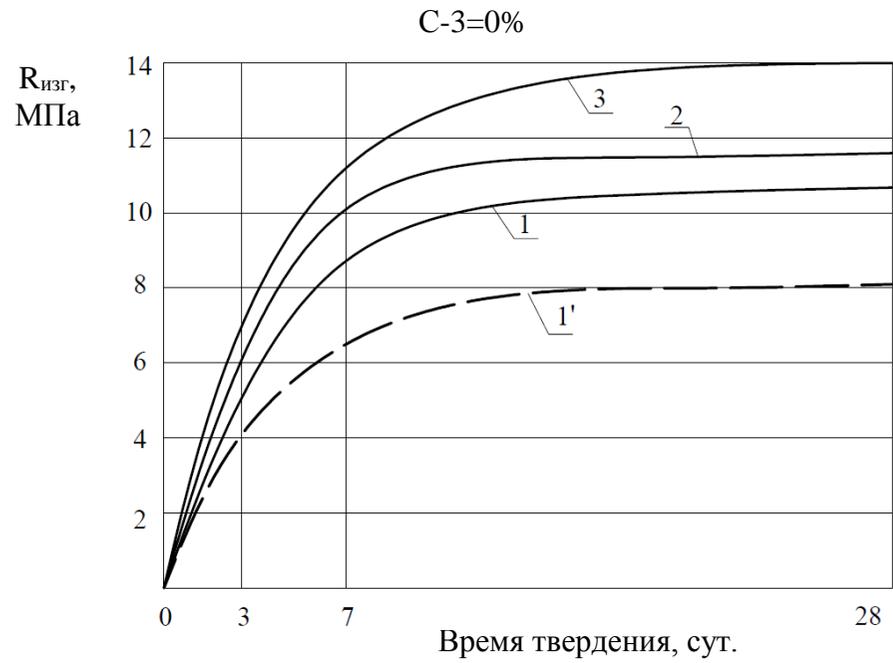


Рис. 3.18. Кинетика нарастания прочности при изгибе
цементного камня:

1,1' – МК=0%; 2 – МК=5%; 3 – МК=10%

— — — — — цементный камень на механоактивированном
вяжущем;

- - - - - контроль

Проведенные опыты подтвердили участие микрокремнезема в физико-химических и физико-механических процессах организации структуры твердеющего цементного вяжущего. Механоактивация зёрен цемента и микрокремнезема обеспечивает как ускорение процессов структурообразования, так и повышение механических характеристик цементного камня.

3.4 Физико-химические исследования фазового состава и структуры цементного камня с содержанием микрокремнезема

Методами физико-химического анализа исследованы процессы гидратации портландцементов без добавок, так и портландцементов с добавкой микрокремнезема, что подлежали механоактивации [178].

Для проведения экспериментальных исследований применялся портландцемент марки 500 (клинкер производства Одесского цементного завода) и добавка микрокремнезёма (Никопольского завода ферросплавов). Химический состав микрокремнезёма приведен в разделе 2.

С целью изучения процессов формирования фазового состава и микроструктуры механоактивированного цементного камня с добавкой 10 % микрокремнезема необходимо более глубокое их исследования с использованием комплекса современных методов физико-химического анализа.

Анализ дифрактограмм цементного камня через 28 суток твердения свидетельствует об образовании основных характерных гидратных фаз.

В процессе механоактивации значительно интенсифицируются процессы гидратации, что подтверждается некоторым снижением интенсивности линий негидратированного цемента ($d/n=0,26; 0,260; 0,217$ нм), а также увеличением интенсивности линий гидроксида кальция ($d/n=0,26; 0,49$ нм).

Введение 10% микрокремнезема сопровождается некоторым закономерным снижением интенсивности линий основных клинкерных минералов и снижение интенсивности линий CaOH_2 ($d/n=0,49$; $0,261$ нм). Это объясняется активной пуццолановой реакцией между портландцементом и микрокремнеземом (рис.3.19).

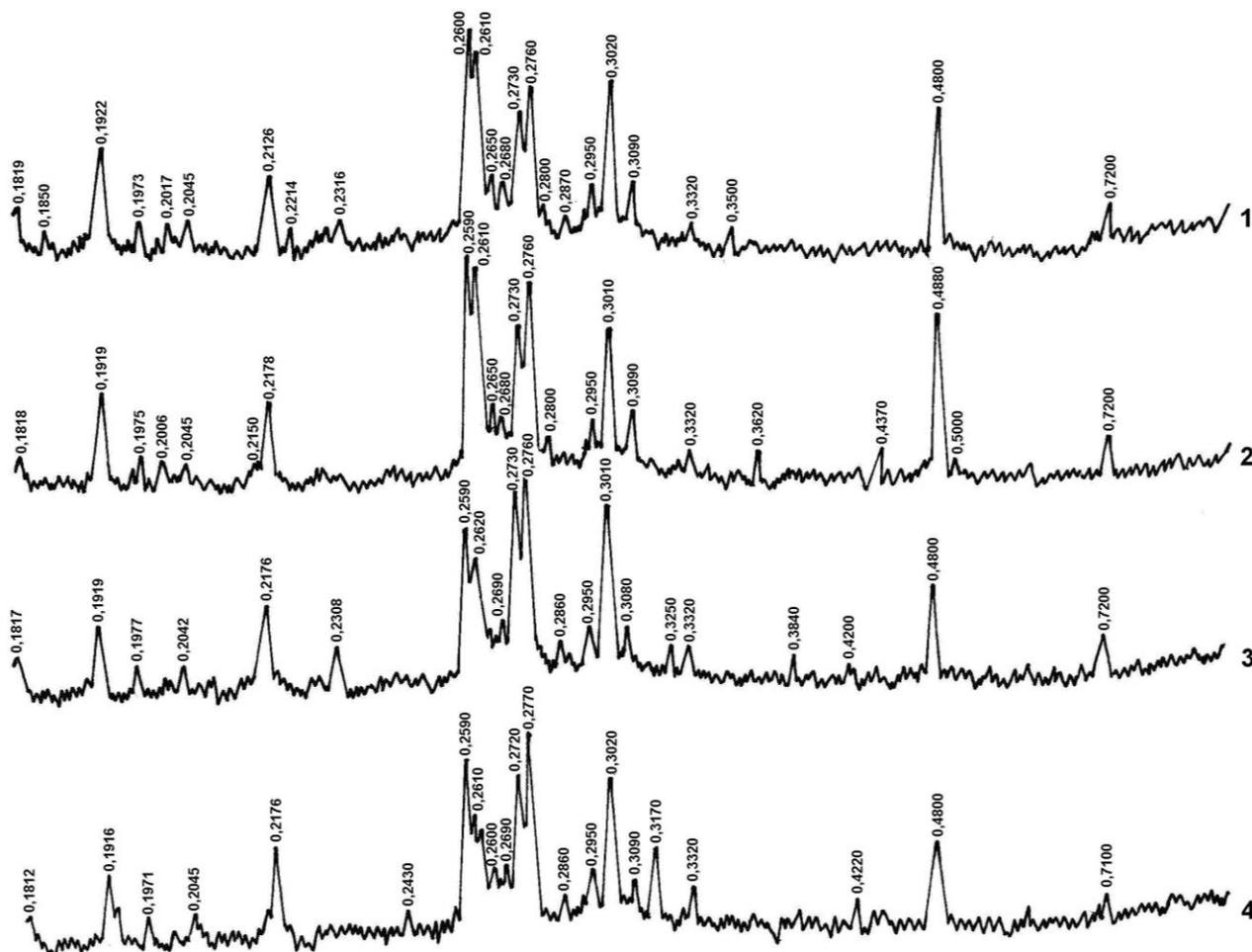


Рис. 3.19. Дифрактограммы портландцементного камня на основе:

1 - портландцемента без добавок; 2 - механоактивированного портландцемента без добавок; 3 - портландцемента с 10 мас.% микрокремнезема; 4 - механоактивированного портландцемента с 10 мас.% микрокремнезема

Об эффективности использования механоактивации в комплексе с добавкой пуццоланового действия микрокремнеземом свидетельствуют

также исследования процессов гидратации цемента, проведенные с помощью дифференциально-термического анализа. Масса образцов становила 1000 мг, чувствительность за шкалой ТГ- 200 мг, за шкалой ДТА – 250 мкВ, за шкалой ДТГ – 500 мкВ. Образцы исследовали в атмосфере воздуха со скоростью нагрева $10^{\circ}\text{C}/\text{мин}$.

На термограммах исследуемых образцов наблюдается три эндотермических эффекты: при 150°C , что соответствует выделению воды; при 520°C связан с распадом гидроокиси кальция; при $740\text{-}760^{\circ}\text{C}$ соответствует распаду карбоната кальция (рис. 3.19) уменьшение интенсивности эндоэффекта $\text{Ca}(\text{OH})_2$ на кривых ДТА в образцах, содержащих добавку микрокремнезема указывает на ускорение процессов реакции пуццоланизации.

Проведенный термический анализ контрольных образцов **1** (содержание МК=0%, без механоактивации, при естественной температуре твердения $t=20^{\circ}\text{C}$) и **2** (содержание МК=0%, с механоактивацией, при естественной температуре твердения $t=20^{\circ}\text{C}$) показал, что первый эндотермический эффект, который на термографах образцов появляется в области температур $20 - 455^{\circ}\text{C}$, с максимумом при температуре 150°C , соответствует выделению воды. Для образца **1** потеря массы на этой стадии составляет 5,4%, а для образца **2** – 5,2%.

Второй эндотермический эффект, который соответствует процессу распада гидроокиси кальция, для образца **1** наблюдается в области температур $455 - 585^{\circ}\text{C}$, для образца **2** – в области температур $455 - 615^{\circ}\text{C}$. потеря массы образцов на этой стадии одинаковая и составляет 1,8%.

Третий эндотермический эффект, который соответствует процессу распада карбоната кальция и выделению воды гидрокарбонатами, на термограмме образцов проявляется в области температур $615 - 900^{\circ}\text{C}$. Для образца **1** потеря массы на этой стадии составляет – 2 %, а для образца **2** – 3% (рис. 3.20, 3.21).

На термограммах образцов **3** (содержание МК=10%, без механоактивации, при естественной температуре твердения $t=20^{\circ}\text{C}$) и **4** (содержание МК=10%, с механоактивацией, при естественной температуре твердения $t=20^{\circ}\text{C}$) присутствуют три ярко выраженных эндотермических эффекта. Согласно данным дифференциально-термогравиметрического анализа (кривая ДТА) первый эффект на термограммах образцов наблюдается в области температур 20-470 $^{\circ}\text{C}$ и соответствует процессу выделения физико- и химически связанной влаги. Вторым эндотермическим эффектом, который проявляется в области температур 470 – 555 $^{\circ}\text{C}$, соответствует процессу распада $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с выделением воды ($\text{Ca}(\text{OH})_2 = \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$). Согласно данным термогравиметрического анализа (кривая ТГ) потеря массы образца **3** на этой стадии составляет 0,6%, а для образца **4** она является больше и равно 1%. Такой результат свидетельствует о большем содержании в образце **4** $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Третий эндотермический эффект проявляется в области температур 600 – 875 $^{\circ}\text{C}$ и соответствует процессу распада карбоната кальция ($\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$). Потеря массы образца **3** на этой стадии составляет 2%, а для образца **4** – 2,3% (рис.3.22, 3.23) [178, 179].

Проведение механоактивации с одновременным введением в цементную систему микрокремнезема дает возможность регулировать процессы структурообразования вяжущих. Анализ микроструктуры гидратированного цементного камня в 28 суток, свидетельствует о интенсивном ходе процесса гидратации. В основной массе микроструктура представлена большим количеством гидратных образований, причем некоторые из них уже хорошо сформированы, другие еще только формируются (рис.3.24).

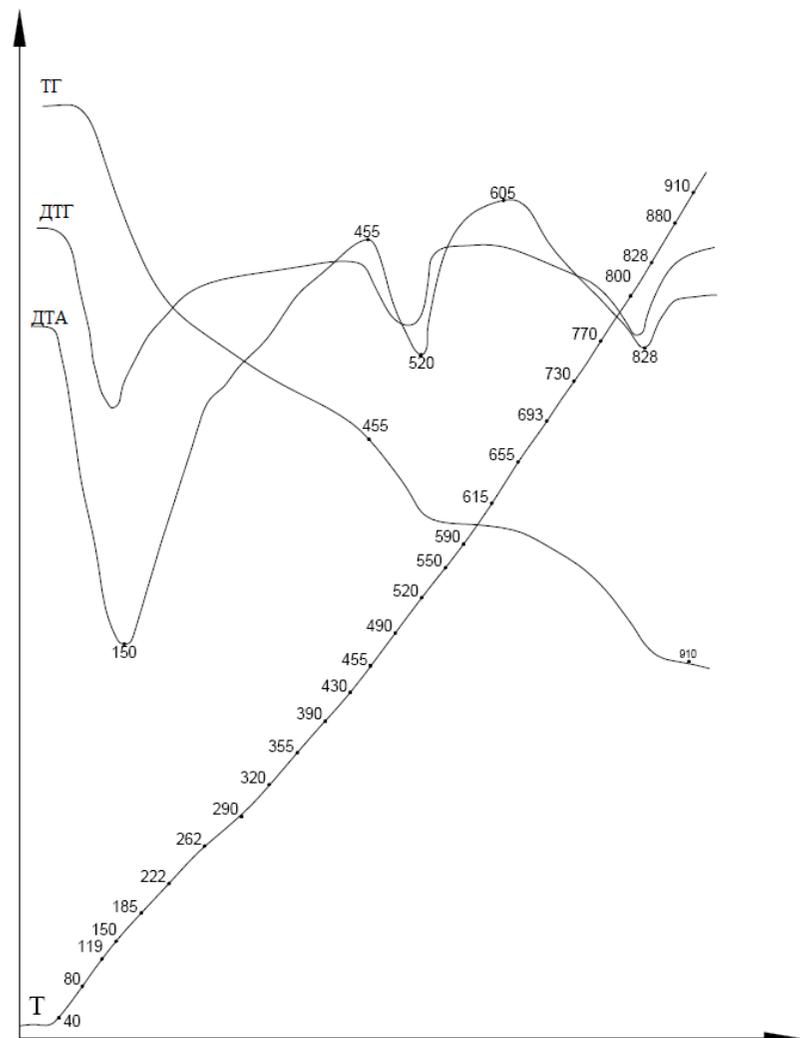
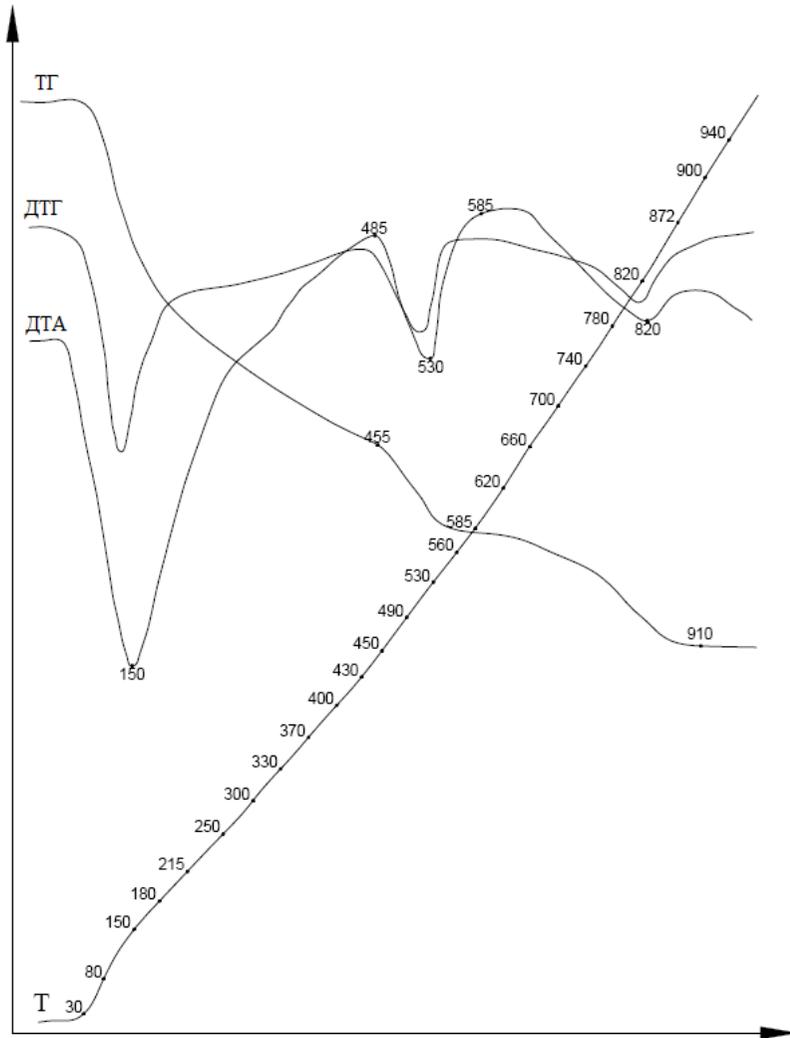


Рис.3.20. Данные термогравиметрического анализа образца 1 (содержание МК=0%, без механоактивации, при естественной температуре твердения $t=20^{\circ}\text{C}$)

Рис.3.21. Данные термогравиметрического анализа образца 2 (содержание МК=0%, с механоактивацией, при естественной температуре твердения $t=20^{\circ}\text{C}$)

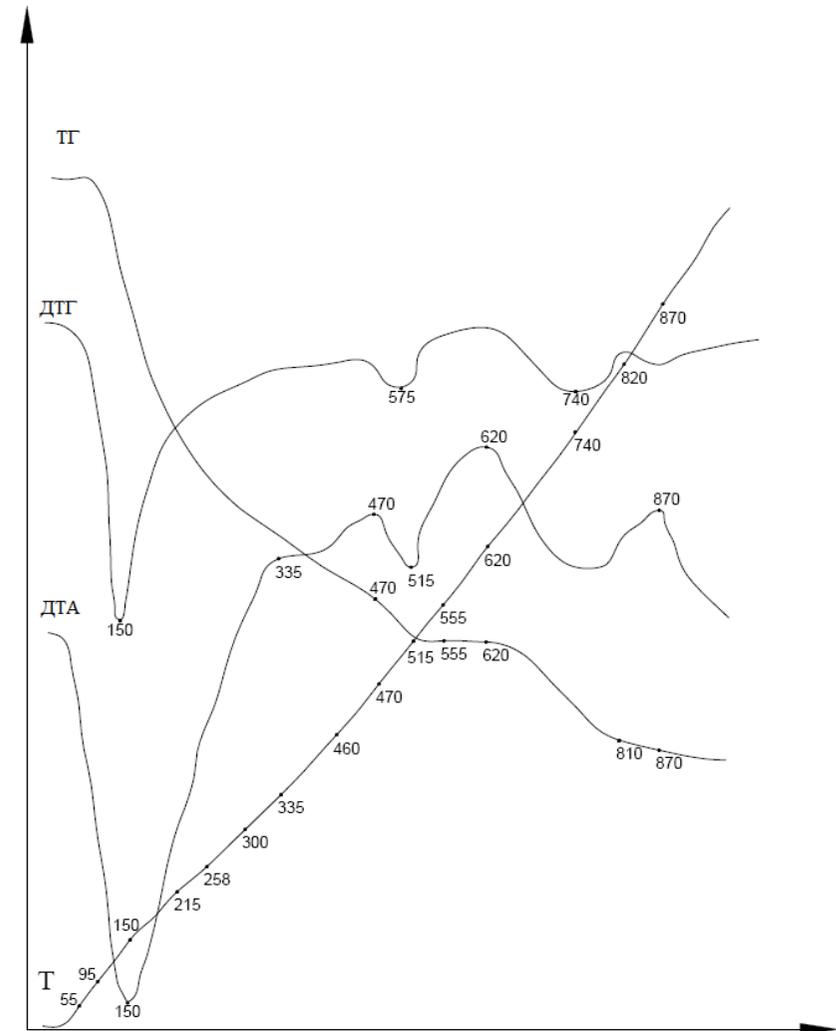
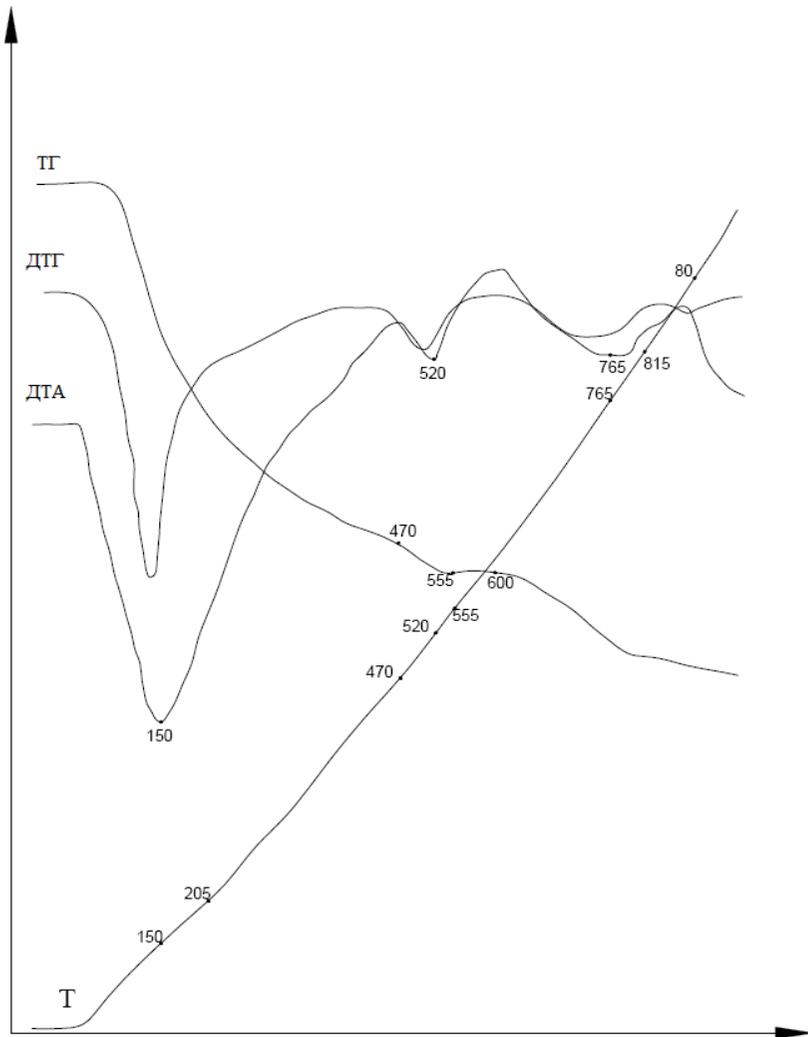
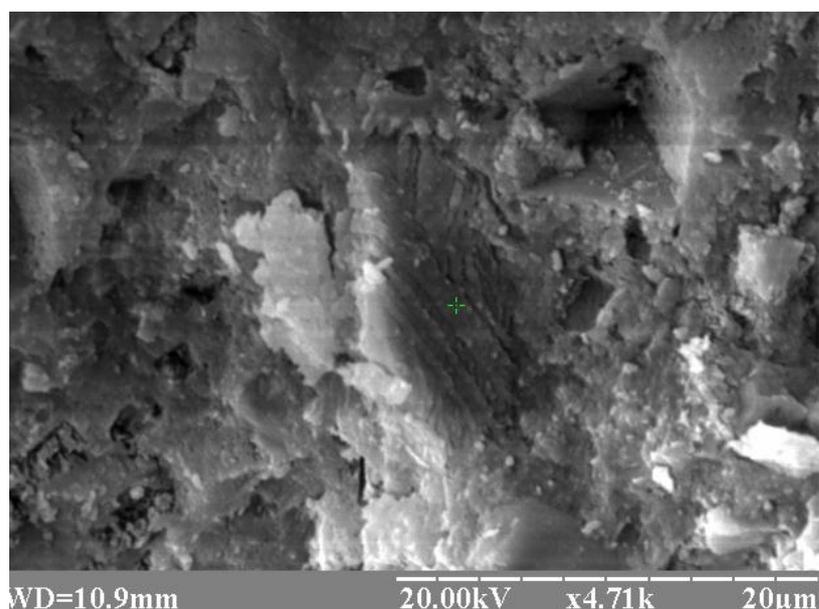


Рис.3.22 Данные термогравиметрического анализа образца 3 (содержание МК=10%, без механоактивации, при естественной температуре твердения $t=20^{\circ}\text{C}$)

Рис.3.23 Данные термогравиметрического анализа образца 4 (содержание МК=10%, с механоактивацией, при естественной температуре твердения $t=20^{\circ}\text{C}$)

На микрофотографиях наблюдается также часть плотно упакованных гексагональных пластин, которые относятся к гидроксиду кальция (рис.3.24а). Это подтверждается также данными микрозондового анализа. На другой микрофотографии можно увидеть зерно микрокремнезема, которое еще не вступило в реакцию с $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (рис.3.24 а, рис.3.24 б).

а)



б)

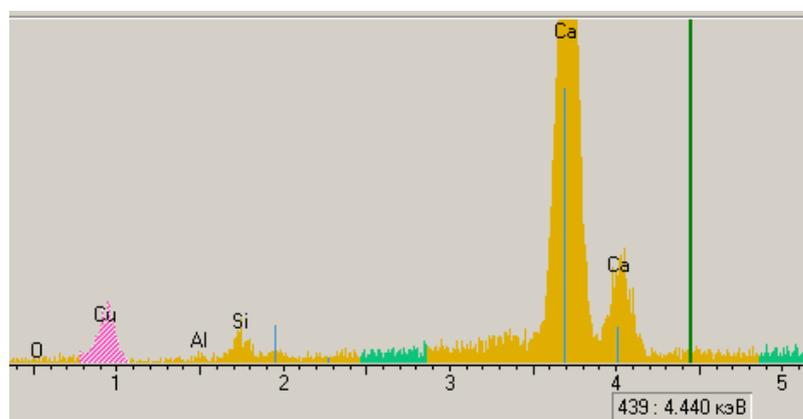
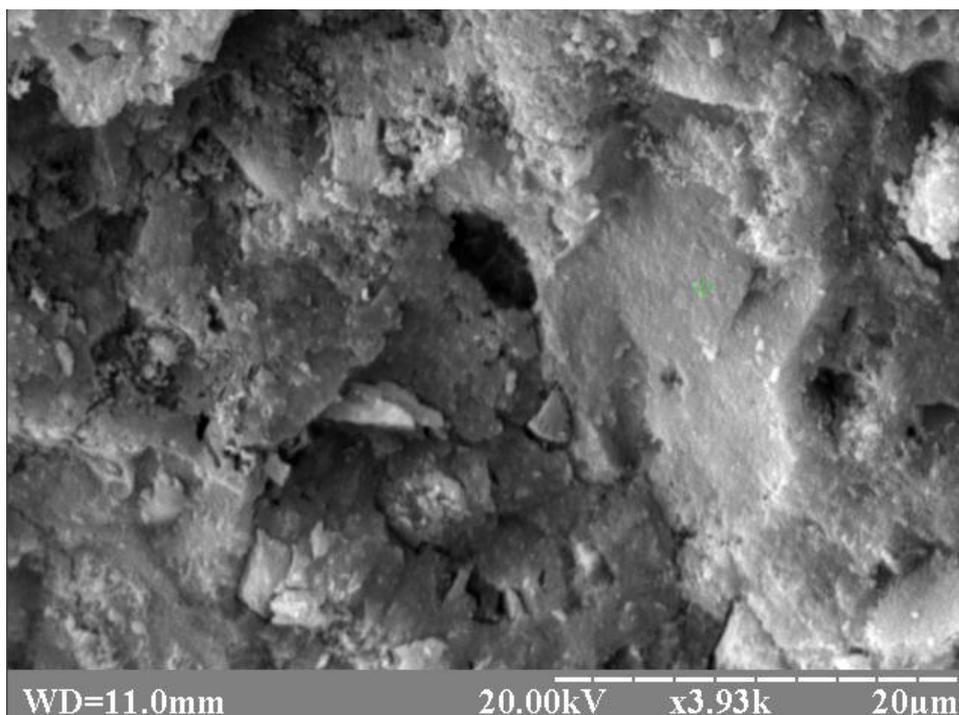


Рис. 3.24. Микроструктура (а) и спектр характеристического рентгеновского излучения (б) с поверхности цементного камня на основе механоактивированного портландцемента с приложением 10 мас.% микрокремнезема

a)



б)

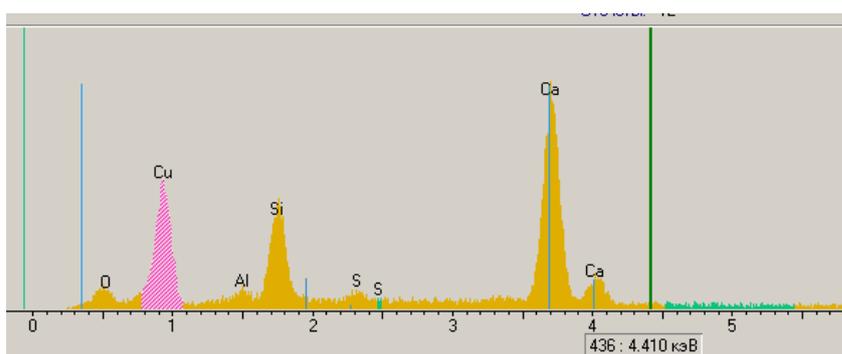
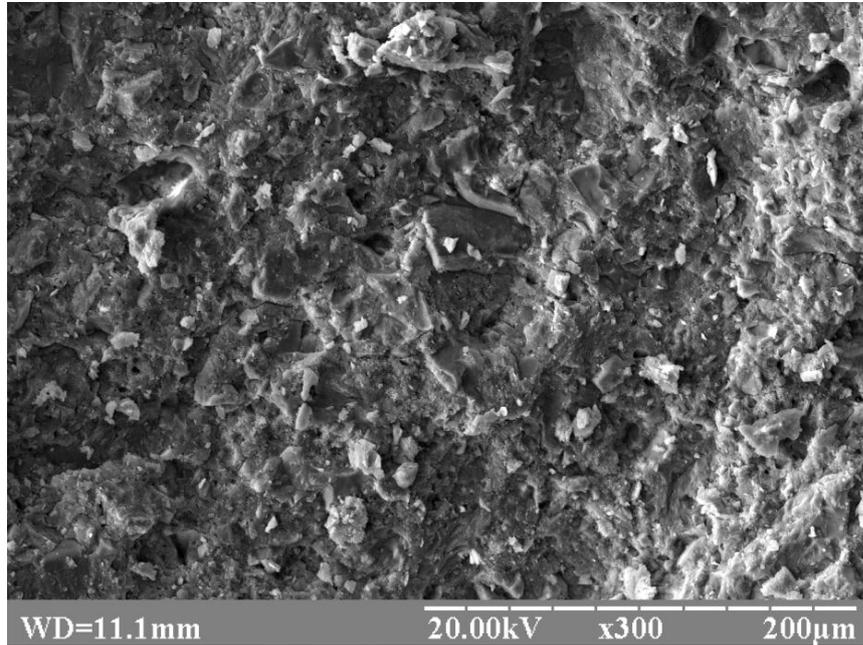


Рис.3.25. Микроструктура (а) и спектр рентгеновского характеристического излучения (б) с поверхности цементного камня на основе механоактивированного портландцемента с 10 мас.% микрокремнезема

Однако большая часть введенного микрокремнезема за счет реакции пуццоланизации взаимодействует с $\text{Ca}(\text{OH})_2$ создавая значительное количество игольчатых кристаллов гидросиликата кальция (рис. 3.25 а, рис. 3.25 б). Низкоосновные С-S-H кристаллизуются в виде игл, способствуют образованию прочных связей между продуктами гидратации цемента,

повышая плотность и механическую прочность камня (рис.3.26 а, рис.3.26 б).

а)



б)

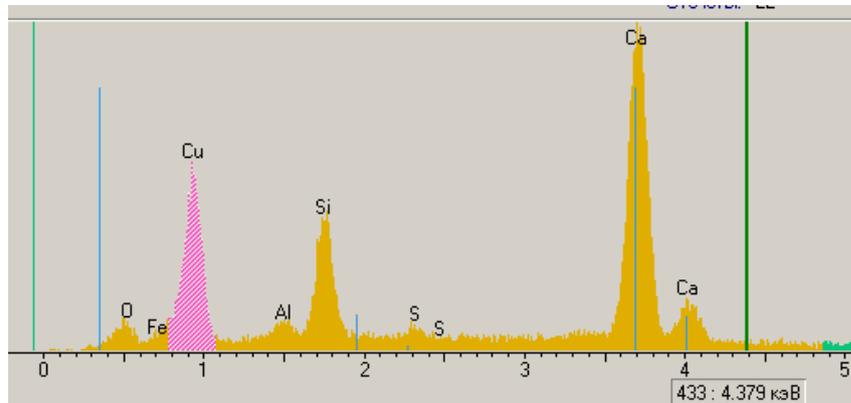


Рис. 3.26. Микроструктура (а) и спектр характеристического рентгеновского излучения (б) с поверхности цементного камня на основе механоактивированного портландцемента с приложением 10 мас.% микрокремнезема

Введение в портландцемент органо-минеральной добавки с одновременной механоактивацией вяжущего дает возможность регулировать процессы структурообразования. Анализ дифрактограмм цементного камня, показывает, что в процессе механоактивации значительно

интенсифицируются процессы гидратации, а введение 10% микрокремнезема приводит к активной пуццолановой реакцией между портландцементом и микрокремнеземом. Кривая дифференциально-термического анализа свидетельствует о том, что введение микрокремнезема в вяжущее приводит к уменьшению количества гидроксида кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$ за счет связывания микрокремнеземом.

ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 3

1. Введение в немеханоактивированную цементную суспензию микрокремнезема в количестве от 0 до 10% от массы вяжущего приводит к увеличению ее эффективной вязкости с 1520 сП (МК=0%) до 3868 сП (МК=10%).

2. Выявлен синергетический эффект снижения эффективной вязкости цементосодержащей суспензии при совместном воздействии на нее скоростного смешения в присутствии суперпластификатора С-3. Уровень синергизма Y_c возрастает с увеличением концентрации микрокремнезема в вяжущем с 3,7 (МК=0%) до 17,9 (МК=10%).

3. Выявлено ускоряющее влияние механоактивации вяжущего на изменение сроков схватывания и температуры твердеющих цементных суспензий.

4. Введение микрокремнезема в вяжущее (до 10%) приводит к ускорению процессов структурообразования, что подтверждается сокращением сроков схватывания (от 17,2 до 18,6%). Механоактивация повышает разогрев суспензии от 23,3 до 62 °С (МК=0%) и с 27 до 46,8 °С при содержании 10% микрокремнезема в вяжущем.

5. Методами физико-химического анализа исследованы процессы гидратации портландцементов без добавок, так и портландцементов с добавкой микрокремнезема, что подлежали механоактивации. Выявлено совместное влияние механоактивации и содержания микрокремнезема на ускорение процессов структурообразования.

РАЗДЕЛ 4

СВОЙСТВА ВЫСОКОПРОЧНЫХ БЕТОНОВ НА МЕХАНОАКТИВИРОВАННОМ ВЯЖУЩЕМ

4.1 Планирование и реализация трехфакторного эксперимента

Возможность повышения прочности бетона, более интенсивного ее набора, особенно в ранние сроки твердения, возможно при целенаправленном изменении структуры цементного камня как за счет активации зерен цемента и микрокремнезема в условиях интенсивных гидродинамических воздействий на них, так и за счет модификации их поверхности добавками ПАВ.

Проведенные исследования (раздел 3) показали, что механохимическая активация портландцемента изменяет качественный и количественный состав продуктов новообразования, что ведёт к изменению условий организации структуры цементного камня. В свою очередь, изменение характера структурообразования вызывает изменение свойств твердеющего цементного камня по сравнению с цементным камнем на неактивированном вяжущем. Структурная модификация поверхности зерен цемента и микрокремнезема привела к повышению прочности цементного камня, являющегося основным носителем прочности бетона. Предстоял интерес выяснить влияние механоактивации вяжущего (портландцемент + микрокремнезем) на механические характеристики бетона.

Исследования проводились по 15-ти точечному трехфакторному Д-оптимальному плану. В эксперименте варьировались следующие рецептурно-технологические факторы:

x_1 – содержание микрокремнезема (МК) в портландцементе (по массе) – $5\pm 5\%$;

x_2 – расход вяжущего в бетоне – 450 ± 100 кг/м³;

x_3 – удельная поверхность ($S_{уд}$) портландцемента – 400 ± 100 м²/кг.

Пластификация бетонной смеси осуществлялась за счет введения в ее состав вместе с водой затворения разжижителя С-3. Содержание С-3 принималось равным 1% (в пересчете на сухое вещество) массы вяжущего.

В качестве заполнителей использовался кварцевый песок с $M_{кр} = 2,2$ и гранитный щебень фракции 5...20 мм.

Приготовление бетонных смесей происходило как по отдельной технологии (РТ) с предварительной активацией вяжущего, так и по традиционной технологии (ТТ). Особенность приготовления бетонной смеси по отдельной технологии заключается в том, что суспензия вяжущего, предварительно полученная совместным скоростным смешением в трибоактиваторе последовательно введенных в него воды затворения, добавки С-3, портландцемента и микрокремнезема, совмещалась впоследствии с кварцевым песком и гранитным щебнем в обычном бетоносмесителе. Активация суспензии происходила в течение 3 – х минут при скорости вращения рабочего ротора смесителя 2800 об/мин.

Для контроля готовились бетонные смеси аналогичного состава, перемешивание компонентов которых производилось в обычном бетоносмесителе. Подвижность бетонных смесей (ОК) принималась постоянной и находилась в пределах 1-3 см осадки конуса, как по каждой строчке плана, так и относительно сравниваемых технологий. Равноподвижность бетонных смесей достигалось корректировкой расхода воды затворения. Формование образцов-кубов с ребром 10см производилось на лабораторной виброплощадке с временем вибрации 120 с. Твердение образцов происходило в нормальных условиях при температуре $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности воздуха не менее 95%.

Определение показателей прочности при сжатии, водопоглощения и коэффициента размягчения (K_p) бетонных образцов производилось по стандартным методикам, приведенным в разделе 2. Прочность бетона при сжатии определялась в возрасте 3, 7, и 28 суток. Водопоглощение – по истечению 28 суток нормального твердения [180].

План эксперимента и значения рецептурных факторов приведены в табл.4.1.

Таблица 4.1

План эксперимента и значения рецептурно-технологических факторов

№ п/п	x ₁	x ₂	x ₃	МК, %	Расход вяжущего, кг/м ³	S _{уд.} м ² /кг
1	-	-	-	0	350	300
2	+	-	-	10	350	300
3	-	+	-	0	550	300
4	+	+	-	10	550	300
5	-	-	+	0	350	500
6	+	-	+	10	350	500
7	-	+	+	0	550	500
8	+	+	+	10	550	500
9	-	0	0	0	450	400
10	+	0	0	10	450	400
11	0	-	0	5	350	400
12	0	+	0	5	550	400
13	0	0	-	5	450	300
14	0	0	+	5	450	500
15	0	0	0	5	450	400

Показатели прочности бетона при сжатии и водопоглощения по всем строчкам математического плана приведены в таблице 4.2.

Составы бетонных смесей в пересчете на 1 м³ приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.2

План эксперимента и физико-механические характеристики бетона

№ пп	Уровни варьирования			МК, %	Расход вяжущего, кг/м ³	S _{уд.} , м ² /кг	Отклики									
	x ₁	x ₂	x ₃				R _{сж} ^к , МПа			R _{сж,вод} ^к , МПа	R _{сж} ^а , МПа			R _{сж,вод} ^а , МПа	W ^к , %	W ^а , %
							3сут.	7сут.	28сут.	28сут.	3сут.	7сут.	28сут.	28сут.		
1	-	-	-	0	350	300	18,6	29,5	43,6	41,8	25,1	40,4	59,7	56,4	5.08	4.59
2	+	-	-	10	350	300	23,8	42,1	52,3	43,3	32,2	58,9	73,2	60,6	5.57	4.80
3	-	+	-	0	550	300	26,9	45,1	53,9	49,5	34,9	63,1	75,5	64,4	3.91	4.36
4	+	+	-	10	550	300	29,5	54,3	69,5	61,4	39,8	76	97,3	85,9	4.60	4.42
5	-	-	+	0	350	500	24,8	34,8	52,7	44,8	33,5	45,3	68,5	58,2	5.49	5.85
6	+	-	+	10	350	500	27,6	40,8	64,3	51,3	38,6	57,1	90	71,8	5.82	6.34
7	-	+	+	0	550	500	29,14	60,9	72,8	69,3	37,9	82,2	98,3	90,1	5.37	4.70
8	+	+	+	10	550	500	37,4	69,6	88,4	71,3	52,4	97,4	123,8	99,8	6.07	6.15
9	-	0	0	0	450	400	28,6	47,3	64,9	55,9	40	61,5	84,4	72,7	4.96	4.41
10	+	0	0	10	450	400	36,2	60,1	81,4	67,5	50,7	78,1	105,8	94,5	5.08	4.72
11	0	-	0	5	350	400	26,9	52,5	61,6	57,6	37,7	70,9	83,2	77,8	4.82	4.58
12	0	+	0	5	550	400	32,9	62,3	75,2	66,1	44,4	84,1	101	89,2	5.60	5.45
13	0	0	-	5	450	300	26,9	40,7	53,9	50,4	37,7	54,9	72,8	68,0	5.02	4.67
14	0	0	+	5	450	500	30	48,2	58,1	50,5	42	65,1	78,4	68,2	3.51	3.84
15	0	0	0	5	450	400	32,2	56,6	73,4	63,5	45,1	73,6	99,1	89,8	4.94	4.97

Примечание: R_{сж}^а, МПа - прочность при сжатии бетона на механоактивированном вяжущем; R_{сж}^к, МПа - прочность при сжатии бетона (контроль); R_{сж,вод}^а, МПа - прочность при сжатии бетона в водонасыщенном состоянии на механоактивированном вяжущем; R_{сж,вод}^к, МПа - прочность при сжатии бетона в водонасыщенном состоянии (контроль); W^а, % - водопоглощение бетона на активированном вяжущем; W^к, % - водопоглощение бетона (контроль).

Таблица 4.3

Составы бетонных смесей в планированном эксперименте

№ п/п	Расход компонентов бетонной смеси, кг/м ³						ОК, см
	Портланд-цемент	Кварцевый песок	Гранитный щебень	Микро-кремнезем	Суперпластификатор С-3	Вода	
1	350	800	1050	-	3,5	113	1
2	450	700	1100	-	4,5	120	3
3	550	550	1100	-	5,5	129	3
4	332,5	800	1050	17,5	3,5	118	2
5	427,5	700	1100	22,5	4,5	116	1
6	522,5	550	1100	27,5	5,5	123	3
7	315	800	1050	35	3,5	123	3
8	405	700	1100	45	4,5	125	3
9	495	550	1100	55	5,5	123	3
10*	350	800	1050	-	-	136	2
11*	550	550	1100	-	-	149	3

10* , 11*- состав бетонной смеси (контроль).

4.2 Влияние рецептурно-технологических факторов на физико-механические свойства высокопрочного бетона

Как отмечалось выше, исследованию подвергались бетоны на механоактивированном вяжущем с добавкой микрокремнезема от 0 до 10%. Для контроля формовались образцы-кубы аналогичных составов, вяжущее которых механоактивации не подвергались. Влияния исследуемых факторов (x_1, x_2, x_3) на прочность при сжатии бетона в 3-х, 7-и и 28-и суточном возрасте отражено в математических моделях (4.1. – 4.6.).

$$R_{сж}^a(3 \text{ сут.}) = 45 + 4,2x_1 + 0,9x_1x_2 + 0,95x_1x_3 + 4,2x_2 - 3,6x_2^2 + 3,5x_3 - 4,8x_3^2 \quad (4.1)$$

$$R_{сж}^a(7 \text{ сут.}) = 71 + 7,5x_1 + 13x_2 + 5,6x_2^2 + 4,7x_2x_3 + 5,4x_3 - 11,9x_3^2 \quad (4.2)$$

$$R_{сж}^a(28 \text{ сут.}) = 92,3 + 10,4x_1 + 6,1x_1^2 + 12,1x_2 + 3x_2x_3 + 8,1x_3 - 13,4x_3^2 \quad (4.3)$$

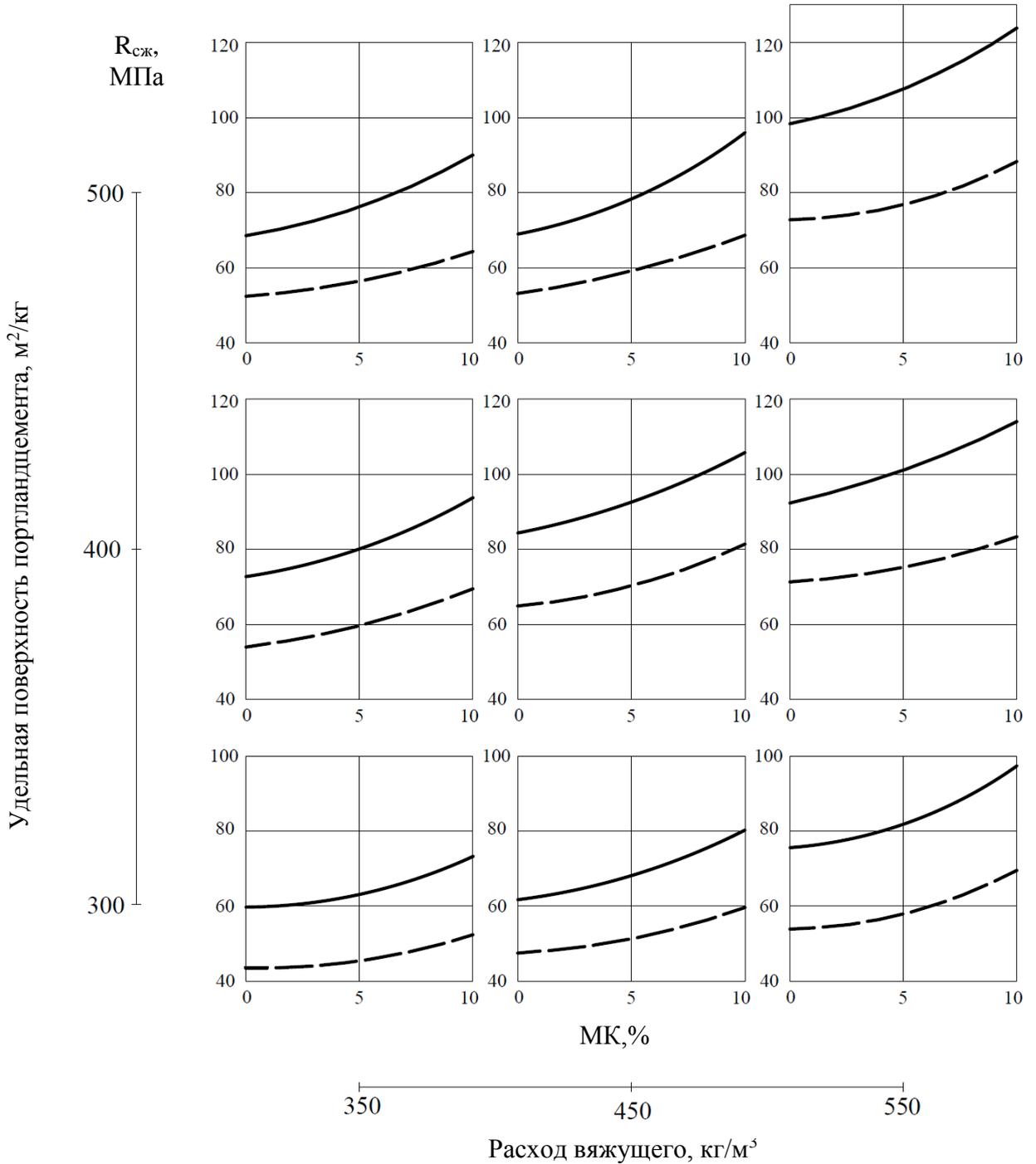
$$R_{сж}^k(3 \text{ сут.}) = 32 + 2,7x_1 + 3,41x_2 - 1,75x_2^2 + 2,32x_3 - 3,2x_3^2 \quad (4.4)$$

$$R_{сж}^k(7 \text{ сут.}) = 54,7 + 4,9x_1 + 9,3x_2 + 2,7x_2^2 + 3,4x_2x_3 + 4,26x_3 - 10,2x_3^2 \quad (4.5)$$

$$R_{сж}^k(28 \text{ сут.}) = 69,4 + 6,8x_1 + 4,9x_1^2 + 1,4x_1x_2 + 8,5x_2 + 2,1x_2x_3 + 6,3x_3 - 12,3x_3^2 \quad (4.6)$$

Первичный анализ математических моделей позволяет сделать вывод о том, что каждый из перечисленных независимых факторов (содержание микрокремнезема, расход вяжущего, удельная поверхность) оказывает существенное влияние на прочность бетона, как на механоактивированном вяжущем, так и на прочность контрольных образцов [181, 182].

Подтверждением этому являются графические отображения прочности бетона при сжатии в 28-и суточном возрасте от исследуемых факторов, рис. 4.1. – 4.2.



контроль), а также содержанием микрокремнезема в вяжущем, удельной поверхностью портландцемента и расходом вяжущего, можно регулировать прочность бетона, твердение которого проходит в нормальных условиях, в пределах от 41,8 до 123,8 МПа.

4.3 Влияние механоактивации на кинетику набора прочности бетона

Для высокопрочного бетона, наряду с обеспечением требуемой механической прочности в проектном возрасте, важную роль играет также кинетика нарастания прочности бетона в относительно раннем возрасте (3, 7 суток твердения). Приведенные на рис. 4.3. кривые зависимости прочности бетона от времени твердения свидетельствуют о значительном влиянии механоактивации вяжущего на прочность.

Прирост прочности бетона только за счет механоактивации (при значениях независимых рецептурно-технологических факторов $x_1=x_2=x_3=-1$) составляет от 35 до 37%.

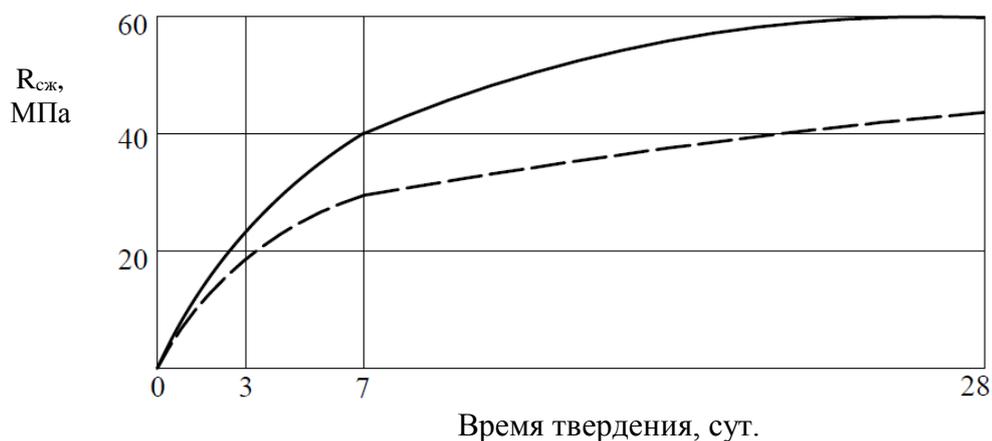


Рис. 4.3. Кинетика нарастания прочности бетона, твердение в нормальных условиях:

— — — — — механохимическая активация;

- - - - - контроль;

расход вяжущего – 350кг/м³; $S_{уд}=300\text{м}^2/\text{кг}$; МК=0%

Следует отметить, что использование рядового портландцемента с $S_{уд.}=300\text{м}^2/\text{кг}$ (расход вяжущего – $350\text{кг}/\text{м}^3$; МК=0%) подверженного активации в скоростном трибосмесителе в присутствии С-3 в количестве 1%, позволяет получить в 28-и суточном возрасте бетон с прочностью при сжатии около 60 МПа. Контрольные образцы аналогичного состава показали за тот же период твердения прочность при сжатии 40МПа, т.е. в 1,5 раза меньше. Для данного состава бетона на механоактивированном вяжущем повышение удельной поверхности портландцемента с 300 до $500\text{ м}^2/\text{кг}$ приводит к повышению прочности бетона в 3-х суточном возрасте с 25,1 до 33,5 МПа (т.е. на 25%). В 28-и сут. возрасте прирост прочности составляет 13%, рис. 4.4.

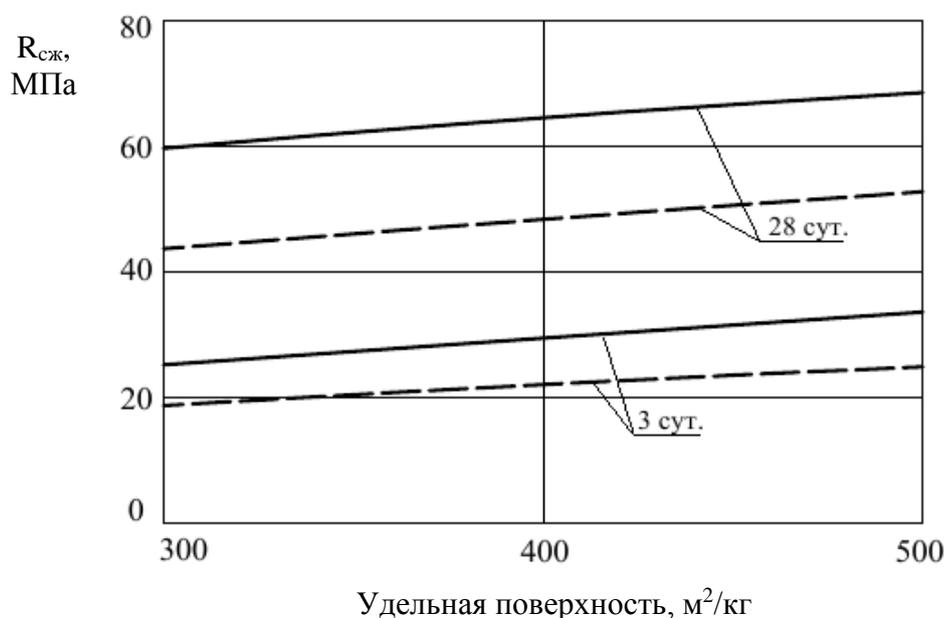


Рис. 4.4. Влияние $S_{уд}$ портландцемента на $R_{сж}$ бетона

— — — — — механохимическая активация;
 - - - - - контроль

Что касается влияния микрокремнезема на прочность бетона ($x_2=-1$, $x_3=-1$), то как видно из результатов экспериментальных исследований, замена портландцемента микрокремнеземом в диапазоне от 0 до 10% приводит к росту прочности бетона как в ранние (3, 7 сут.) так и в более отдаленные сроки твердения (28 сут.) рис. 4.5.

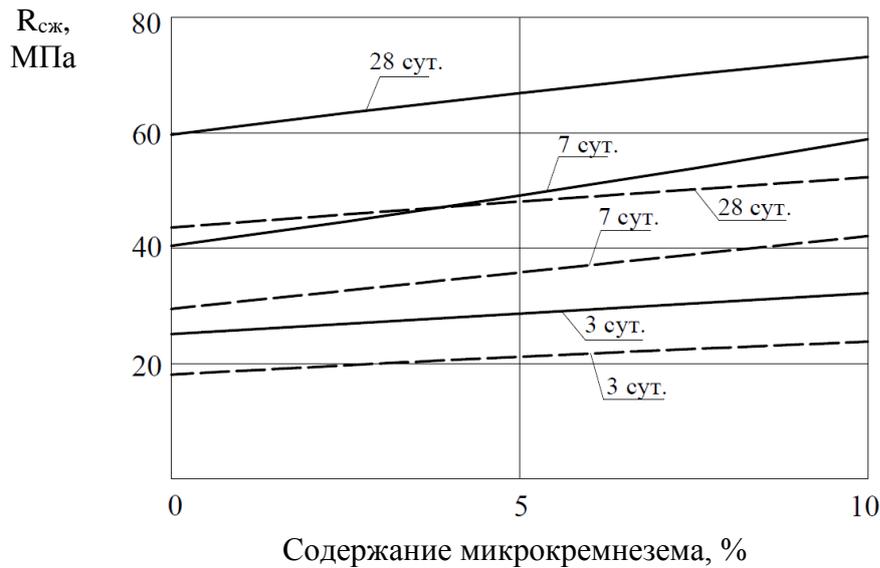


Рис. 4.5. Влияние содержания микрокремнезема в вяжущем на прочность бетона при сжатии

— - бетон на механоактивированном вяжущем;
 - - - - контроль

Аналогичное влияние микрокремнезем оказывает на прочность бетона с расходом вяжущего 450 и 550кг/м³ рис. 4.6 а,б.

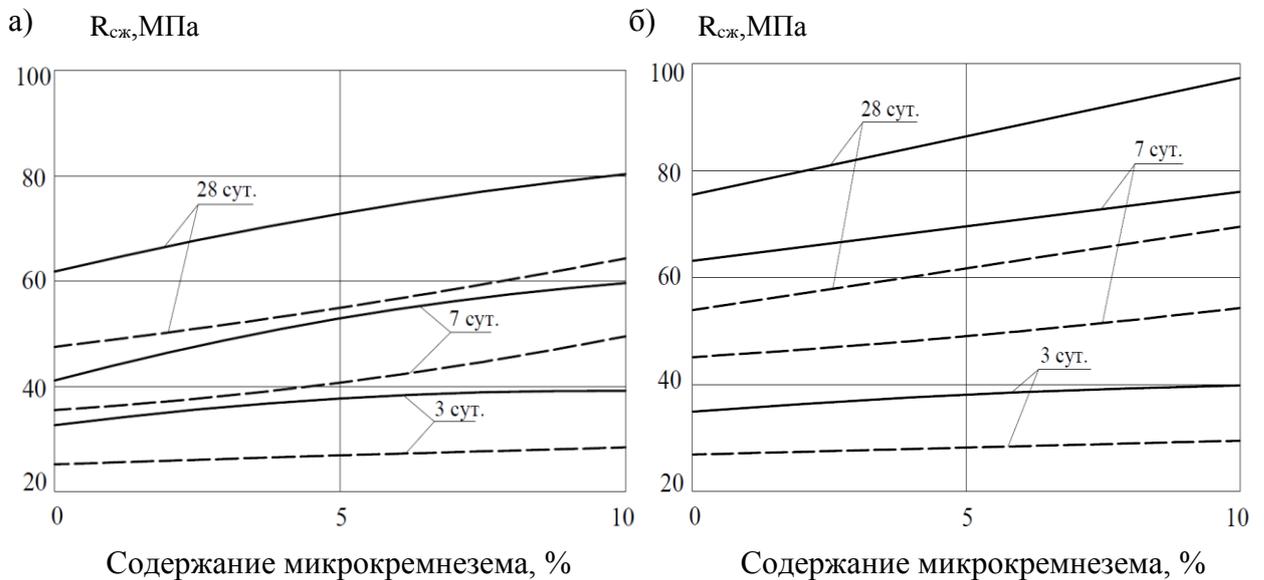


Рис. 4.6. Влияние содержания микрокремнезема в вяжущем на прочность бетона:

а) расход вяжущего в бетоне 450кг/м³; б) расход вяжущего в бетоне 550кг/м³

— - бетон на механоактивированном вяжущем;
 - - - - контроль

Экспериментально установлено влияние расхода вяжущего на прочность при сжатии в исследуемом диапазоне времени твердения бетона, рис 4.7. Также следует заметить, что прочность при сжатии бетона вяжущее которого подвергалось механоактивации в присутствии органоминеральной добавки (МК=10%, С-3=1%) увеличивается примерно в 1,9-2,2 раза по сравнению с контрольными образцами (МК=0, С-3=0%), в зависимости от расхода вяжущего при $S_{уд}=400\text{м}^2/\text{кг}$ рис 4.8.

Графическая интерпретация математических моделей, описывающих совместное влияние исследуемых рецептурно-технологических факторов на прочность бетона при сжатии свидетельствуют о том, что механоактивация вяжущего способствует резкому повышению прочности бетона во всем исследуемом факторном пространстве рис. 4.9, 4.10.

Анализ моделей показывает, что прочность бетонов приготовленных по отдельной технологии выше прочности бетонов приготовленных по традиционной технологии за весь исследуемый период (1 - 28 сут). Так, если прочность контрольных образцов бетона в возрасте 3 суток нормального твердения составляет всего от 15 до 37 МПа в зависимости от расхода вяжущего, удельной поверхности портландцемента и содержания микрокремнезема (рис.4.10а), то предварительная механоактивация суспензий вяжущего повышает этот показатель до 27-58 МПа (рис.4.9а). В возрасте 28 суток применение механоактивации увеличивает прочность бетона с 45-84 МПа (рис.4.10 б) до 56-112 МПа (рис.4.9 б).

Введение в состав вяжущего микрокремнезема значительно увеличивает прочность бетонов, изготовленных как с применением механоактивации вяжущего, так и традиционным способом. Особенно ярко влияние микрокремнезема на этот показатель проявляется в возрасте 7 суток нормального твердения.

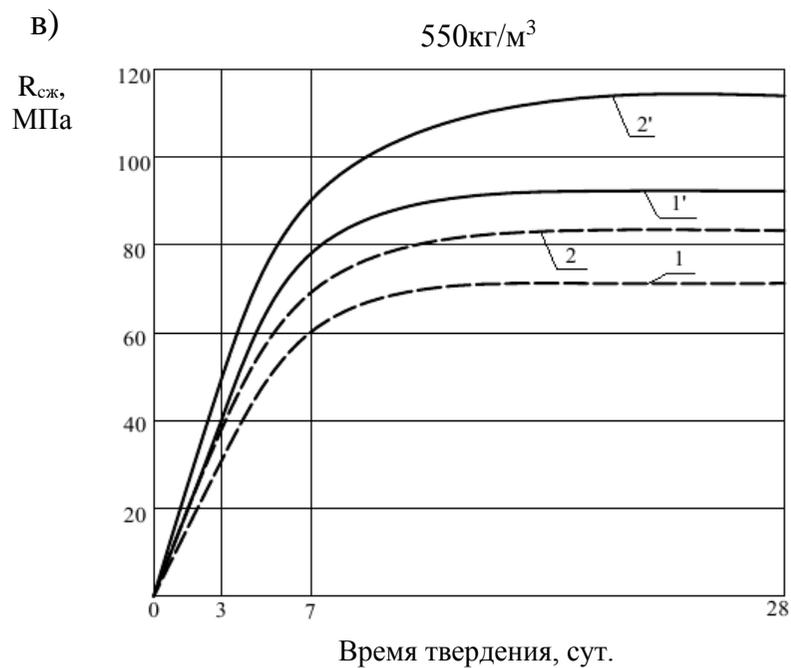
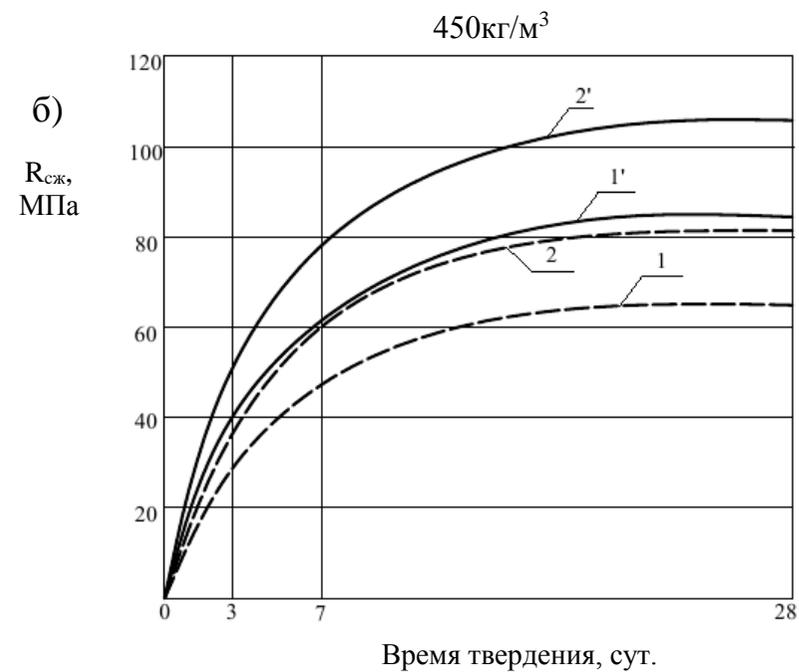
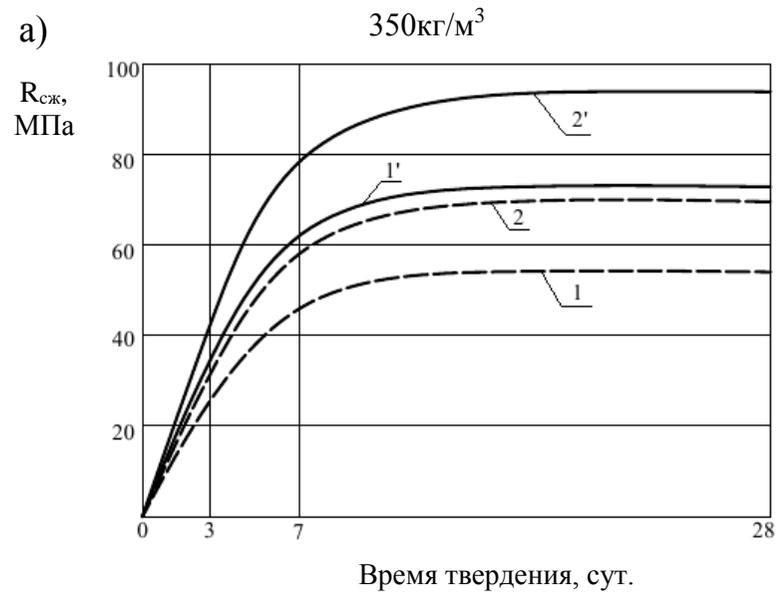


Рис. 4.7. Кинетика набора прочности бетона

Расход вяжущего: а) 350кг/м^3 ; б) 450кг/м^3 ; в) 550кг/м^3 ;

1, 1' – содержание микрокремнезема в вяжущем 0 %;

2, 2' – содержание микрокремнезема в вяжущем 10 %;

— - бетон на механоактивированном вяжущем;

- - - - - контроль

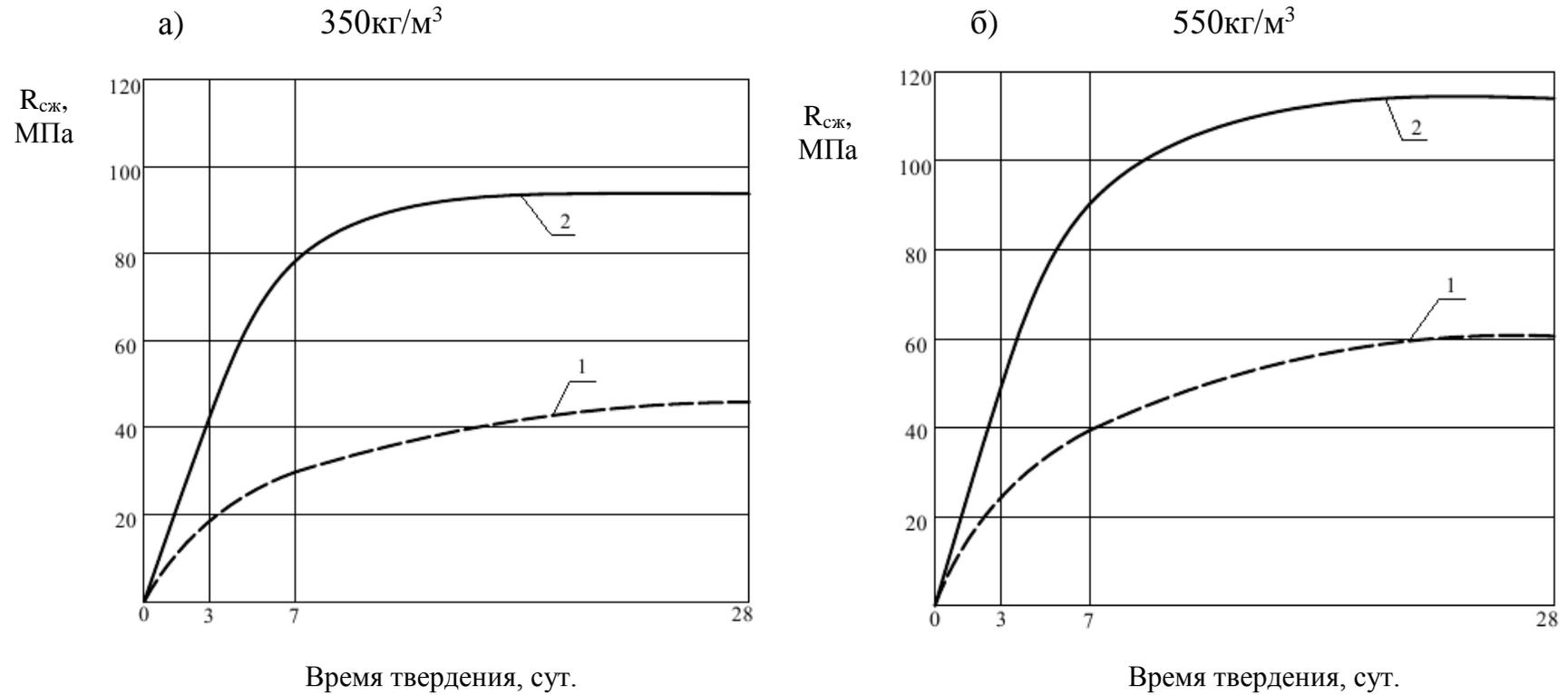


Рис 4.8. Совместное влияние механоактивации и органо-минеральной добавки на $R_{сж}$ бетона
 1 – содержание МК=0%, концентрация С-3=0%; 2 – содержание МК=10%, концентрация С-3=1%;
 Расход вяжущего: а) 350кг/м³; б) 550кг/м³

- - бетон на механоактивированном вяжущем;
 - - - - - контроль

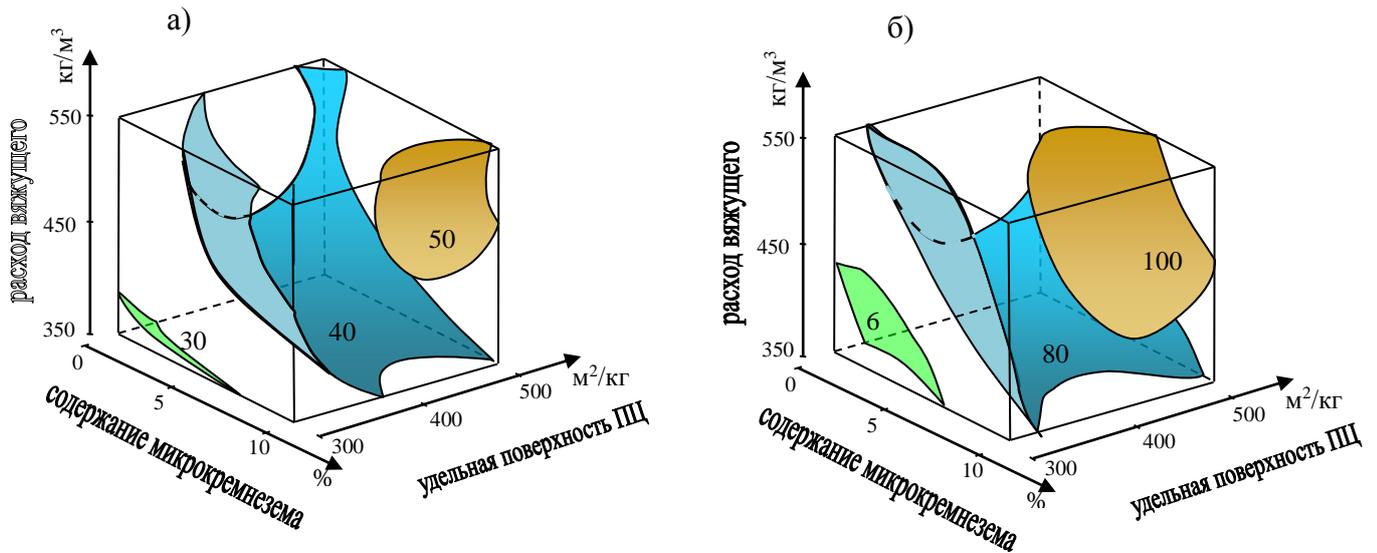


Рис.4.9. Прочность при сжатии бетонов на механоактивированном вяжущем

а) – в возрасте 3 суток; б) – в возрасте 28 суток

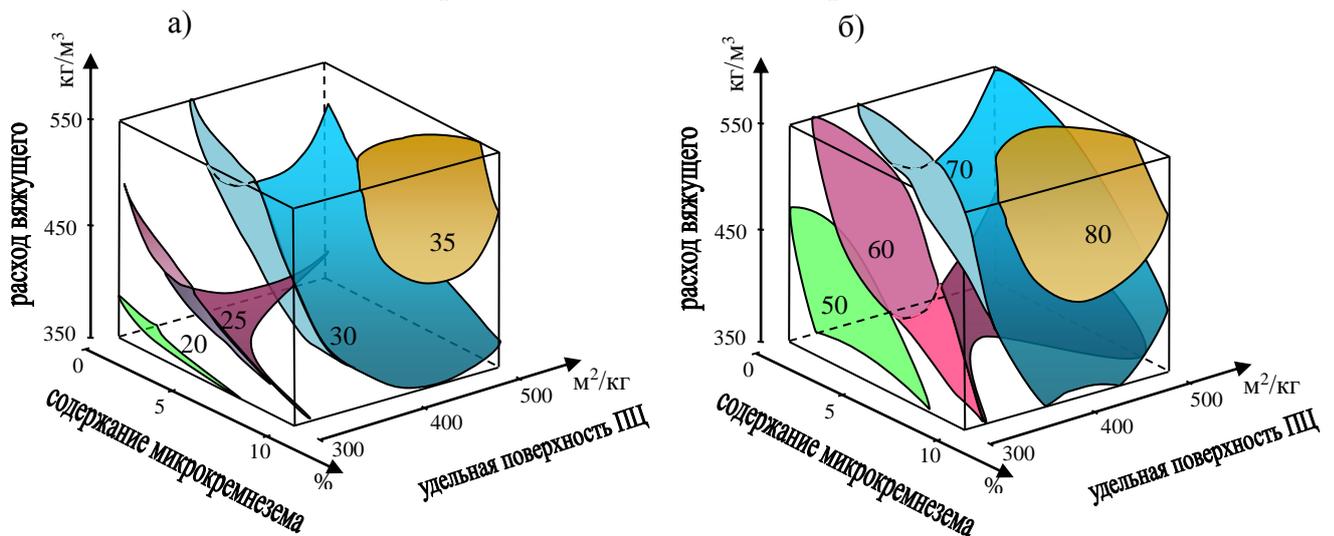


Рис.4.10. Прочность при сжатии контрольных образцов бетонов, МПа

а) – в возрасте 3 суток; б) – в возрасте 28 суток

Максимальное значение прочности бетона на механоактивированном вяжущем (123,8 МПа) достигается в 28-и суточном возрасте при выполнении следующих условий:

- расход вяжущего – 550 кг/м^3 ;
- содержание микрокремнезема в вяжущем – 10%;
- удельная поверхность портландцемента – $500 \text{ м}^2/\text{кг}$.

4.4 Критерий эффективности использования вяжущего с добавкой микрокремнезема

Эффективность композиционных строительных материалов, характеризуемых определенным набором заданных параметров качества, определяется их ресурсоемкостью. В это понятие можно включить количество материала в единице объема, энергетические и трудовые затраты на их производство, нормируемый период эксплуатации.

Снизить материалоемкость можно как за счет обеспечения требуемых механических характеристик материалов, так и за счет повышения механических характеристик бетона при фиксированном расходе вяжущего.

Существуют следующие пути снижения расхода портландцемента:

- применение структурообразующих и пластифицирующих добавок;
- совершенствование технологических приемов переработки материала в изделие;
- введение в состав портландцемента и бетона минеральных добавок с оптимальными показателями вида, дисперсности и количества;
- оптимизация рецептурно-технологических параметров и усовершенствование системы управления производством [183].

При технико-экономическом анализе способов и методов сокращения расхода вяжущего можно сделать вывод, что наиболее эффективное решение находят при совместном использовании различных путей.

В данной работе критерием оценки эффективности использования вяжущего был выбран коэффициент $K_{и.в.}$, определяемый как отношение прочности бетона при сжатии (МПа) к расходу вяжущего ($\text{кг}/\text{м}^3$) рис.4.11.

Смысл коэффициента в сравнительной оценке принятых технологических решений. Чем выше коэффициент $K_{и.в.}$, тем эффективнее технология приготовления суспензии, тем качественнее ее состав [181].

Приведенные на рис. 4.11. значения коэффициента $K_{и.в.}$ свидетельствуют о резком его увеличении для бетона, вяжущее которого подвергалось механоактивации в присутствии микрокремнезема и суперпластифицирующей добавки С-3, по сравнению с контролем. Значение $K_{и.в.}$ возрастает от 0,12 до 0,21 (в зависимости от концентрации микрокремнезема в вяжущем).

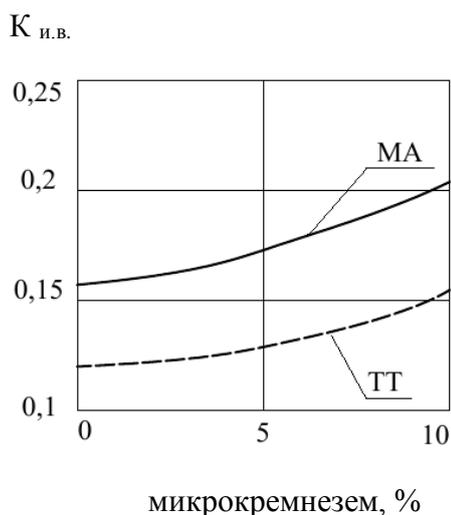


Рис. 4.11. Коэффициент

эффективности использования

вяжущего в бетоне:

МА - вяжущее механоактивированное;

ТТ - контроль

Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что снижение материалоемкости за счет уменьшения расхода вяжущего или повышения механических характеристик без увеличения его расхода можно достичь разными путями и способами. Для каждого конкретного случая необходимо выполнить технико-экономический анализ возможного снижения материалоемкости материалов с учетом защиты окружающей среды.

Это позволит повысить эффективность строительных материалов и конструкций, увеличить объем их производства без увеличения выпуска портландцемента [183].

4.5 Технико-экономическая эффективность

механоактивации вяжущего в присутствии органо-минеральной добавки

Развитие современного строительства предполагает разработку концепции бетонов нового поколения с высокими эксплуатационными свойствами при помощи воздействий природного и техногенного характера, а также новыми инженерными и эстетическими требованиями,

предъявляемыми к ряду зданий и сооружений. Такой подход вполне обоснован, поскольку бетон является основным конструкционным материалом строительства. Рост потенциала технических свойств могут обеспечить высокую технико-экономическую эффективность в самых различных условиях эксплуатации.

Существенным резервом повышения прочности бетонов является совершенствование способов приготовления бетонной смеси. В настоящее время внимание отечественных и зарубежных исследователей сосредоточено на совершенствовании традиционных методов смешения компонентов смеси, основными из которых являются способы активации цементных систем.

Предложенная в данной работе принципиальная схема механоактивации высококонцентрированных грубодисперсных систем обеспечивает механоактивацию частиц дисперсной фазы, проявления трибохимических эффектов в среде с которой происходит их химическое взаимодействие и позволяет обеспечить требуемую эффективность механоактивации.

Использование данной технологии на рядовом портландцементе модифицированного органо-минеральной добавкой позволяет изменить кинетику протекания физико-химических реакций, изменяет структуру твердеющих и затвердевших вяжущих, что ведёт к повышению их механических свойств и решает, таким образом, технико-экономические задачи.

Для определения технико-экономической эффективности данной технологии был проведен сравнительный расчет в программе SCAD монолитной железобетонной колонны (при классе бетона C20/25 ... C35/45).

Колонна

Исходные данные: Марка бетона М450 – сечение колонны $b \times h = 300 \times 300$ мм, Высота колонны $h = 3$ м, случайный эксцентриситет $e = 50$ мм (условно без моментов).

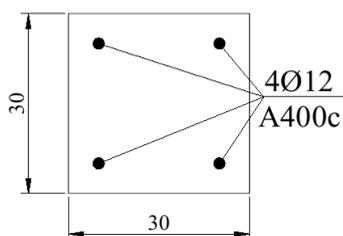


Рис. 4.12. Расчетное сечение и армирование монолитной колонны

Расчетное сечение и армирование колонны показано на рис.4.12.

Нагрузка на колонну $N=80\text{т}$.

При пересчете с класса бетона C20/25 на C35/45:

Сечения колонны уменьшается с 300х300мм до 252х252мм.

Экономия бетона составляет $\approx 41\%$.

Опытно-промышленная партия изделий из монолитного бетона на механоактивированном вяжущем выпущена ЗАО «ПК». Опыт внедрения показал высокую эффективность разработанной технологии. Разработанные научно-теоретические основы механизма гидратации и структурообразования механоактивированных цементных систем позволяют управлять процессами гидратации с целью их оптимизации для получения бетонов с высокими эксплуатационными свойствами.

4.6 Выбор оптимального состава высокопрочного бетона

Выбор нескольких вариантов оптимальных составов высокопрочных бетонов был проведен графическим методом по диаграммам, построенным по соответствующим ЭС-моделям.

На куб были наложены изолинии, отображающие уровни основах физико-механических свойств механоактивированного бетона в возрасте 28 суток. Далее области, не удовлетворяющие по критериям ограничения, были исключены (рис.4.13). В качестве критериев ограничения были приняты:

- прочность при сжатии не ниже 100 МПа;
- коэффициент размягчения бетона не ниже 0.85 ($K_p \geq 0.85$), что соответствует общепринятым в современном строительстве требованиям.

Далее в оставшейся, т.е. не исключенной ни по одному из названных выше критериев, части факторного пространства были избраны оптимальные составы с учетом желательных критериев – водопоглощения и удельной поверхности вяжущего.

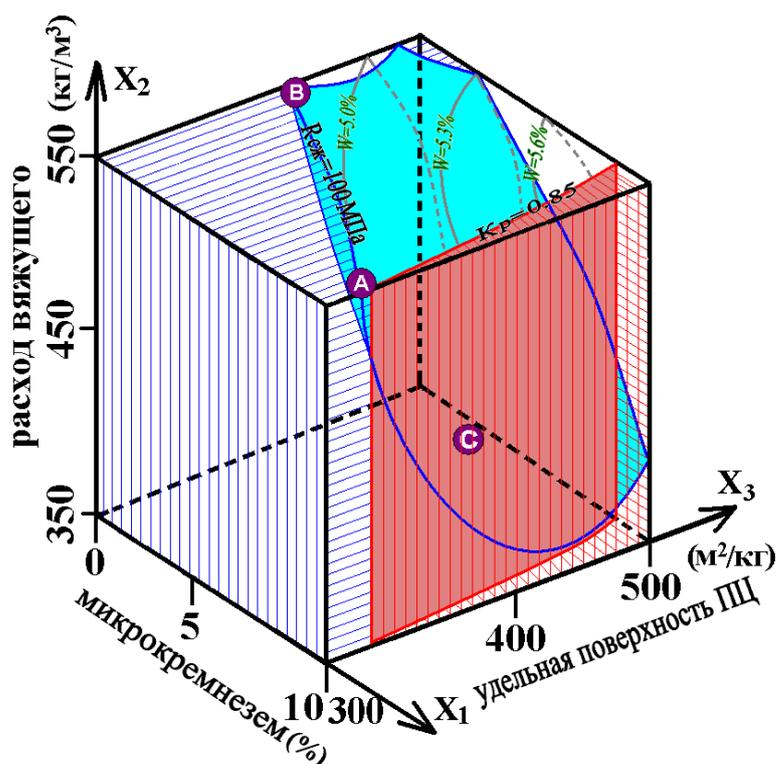


Рис.4.13. Выбор оптимальных составов высокопрочных бетонов по 3-х мерной диаграмме

На рис.4.13 точками в виде кружков показаны два избранных состава с прочностью около 100 МПа и при $K_p \geq 0.85$:

А – при расходе вяжущего 550 кг/м³, низкой удельной поверхности вяжущего (около 320 м²/кг) и при использовании 10 % микрокремнезема. Данный состав можно рекомендовать исходя из экономии энергии на размол вяжущего.

В – при расходе вяжущего 550 кг/м³, средней удельной поверхности вяжущего (около 400 м²/кг) и без микрокремнезема. Данный состав можно рекомендовать с точки зрения отсутствия необходимости в дополнительной технологической операции – введении микрокремнезема. Помимо того,

состав В показывает меньшее водопоглощение по сравнению с составом А, что говорит о его большей потенциальной долговечности. Несомненно, в трехмерном пространстве могут быть выбраны и другие технологические решения в зависимости от необходимых задач.

С – при сниженном расходе вяжущего 450 кг/м^3 , удельной поверхности вяжущего около $380 \text{ м}^2/\text{кг}$ и при использовании около 9 % микрокремнезема. Данный состав можно рекомендовать с точки зрения снижения расхода вяжущего.

Однако поскольку графический анализ трехмерного факторного пространства является хоть и наглядным, но не отличается большой точностью в областях далеких от граней куба, а расход вяжущего существенно влияет на все свойства материала, нами был выполнен второй вариант графического поиска оптимальных составов. Известно, что в зависимости от типа и назначения бетонной или железобетонной конструкции может быть необходима то большая то меньшая прочность материала, поэтому рассматривалось три варианта выбора оптимального состава высокопрочного композита по 2-х мерным диаграммам.

Варианты отличались расходом вяжущего: 350, 450 и 550 кг/м^3 , что соответствует уровням фактора x_2 , равным -1 , 0 и $+1$. При соответствующих зафиксированных уровнях фактора x_2 были построены диаграммы в виде квадратов, отображающие влияние количества микрокремнезема (x_1) и удельной поверхности вяжущего (x_3) на уровень прочности при сжатии механоактивированных бетонов в возрасте 28-ми суток, а также на уровни водопоглощения и коэффициента размягчения этих бетонов. Далее на три диаграммы были наложены изолинии, отображающие уровни данных основах физико-механических свойств материала. После наложения диаграмм области факторного пространства, не удовлетворяющие по критериям ограничения, были исключены. В качестве общего для всех трех вариантов критерия ограничения был принят коэффициент размягчения бетона не ниже 0.85 ($K_p \geq 0.85$). В качестве второго критерия ограничения была принята прочность

при сжатии: 80, 90 и 100 МПа в зависимости от количества вяжущего (соответственно 350, 450 и 550 кг/м³).

Далее в оставшейся, т.е. не исключенной ни по одному из названных выше критериев, части факторного пространства были избраны оптимальные составы композитов с учетом желательных критериев – водопоглощения, удельной поверхности вяжущего и прочности (рис.4.14).

При расходе вяжущего 350 кг/м³ (рис.4.14 а) были выбраны два оптимальных состава:

1 – соответствует материалу с прочностью 90 МПа при $K_p \geq 0.85$ и показывает водопоглощение около 5.1% (помечен звездочкой). Достигается при удельной поверхности вяжущего около 350 м²/кг при введении около 9.5% микрокремнезема.

2 – соответствует материалу с прочностью 80 МПа при $K_p \geq 0.85$ и показывает водопоглощение около 5% (помечен кружком). Достигается при удельной поверхности вяжущего около 310 м²/кг при введении 10% микрокремнезема. Данный состав имеет более низкую прочность, однако он является более дешевым за счет экономии энергии на размол вяжущего. При расходе вяжущего 450 кг/м³ (рис.4.14 б) также были выбраны два оптимальных состава:

3 – соответствует материалу с прочностью 90 МПа при $K_p \geq 0.85$ и показывает водопоглощение около 4.6% (помечен звездочкой). Достигается при низкой удельной поверхности вяжущего – около 330 м²/кг при введении 10% микрокремнезема. Может быть рекомендован с точки зрения низкого водопоглощения и использования вяжущего с низкой удельной поверхностью.

С – соответствует материалу с прочностью 100 МПа при $K_p \geq 0.85$ и показывает водопоглощение около 4.8%. Соответствует составу С на рис.4.13.

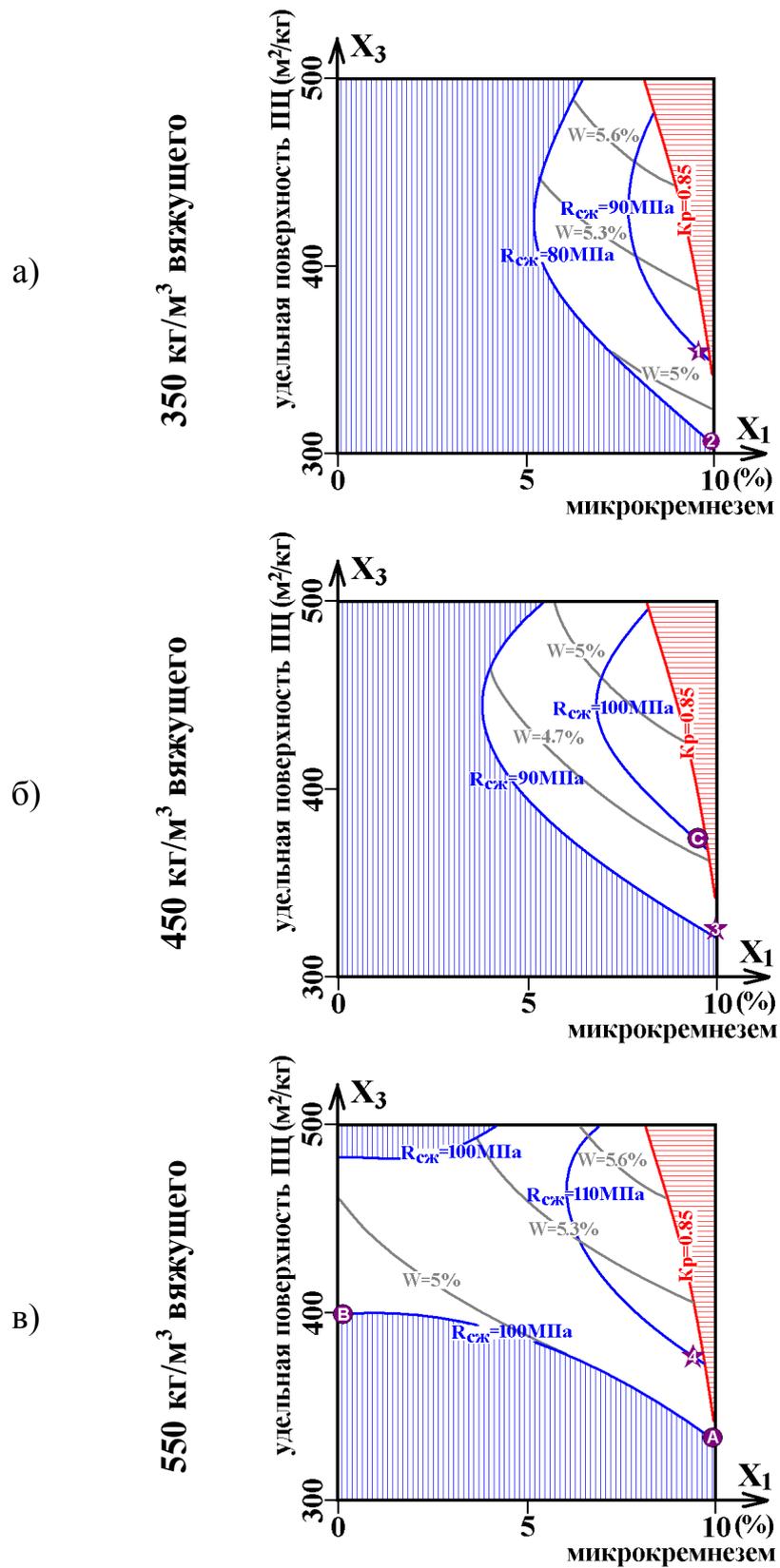


Рис.4.14. Выбор оптимальных составов высокопрочных бетонов по 2-х мерным диаграммам, соответствующим разному расходу вяжущего:

а) – 350 кг/м³, б) – 450 кг/м³, в) – 550 кг/м³

При расходе вяжущего 550 кг/м^3 (рис.4.14.в) были выбраны три оптимальных состава:

А – соответствует материалу с прочностью 100 МПа при $K_p \geq 0.85$ и показывает водопоглощение около 5.1%. Соответствует составу **А** на рис.4.13.

В – соответствует материалу с прочностью 100 МПа при $K_p \geq 0.85$ и показывает водопоглощение около 4.8%. Соответствует составу **В** на рис.4.13.

4 – соответствует материалу с повышенной до 110 МПа прочностью при $K_p \geq 0.85$ и показывает водопоглощение около 5.2% (помечен звездочкой). Достигается при удельной поверхности вяжущего около $390 \text{ м}^2/\text{кг}$ и при введении около 9% микрокремнезема. Может быть рекомендован с точки зрения наибольшей достигаемой прочности материала при сохранении необходимого уровня коэффициента размягчения.

Таким образом, отобраны семь рекомендуемых оптимальных составов высокопрочных бетонов, каждый из которых может быть использован в зависимости от требуемых для конкретной задачи уровней прочности и экономической целесообразности с учетом текущих цен на энергоносители, оборудование и сырье.

4.7 Оборудование для приготовления бетонных смесей по раздельной технологии

Смешение компонентов наполненной цементной суспензии осуществлялось в промышленном высокоскоростном смесителе модели СВ-2М турбулентного типа, в котором наряду с физико-химической активацией частиц вяжущего обеспечивается высокая однородность распределения тонкомолотых компонентов в объеме суспензии.

Принцип работы турбулентного смесителя по характеру воздействия на перемешиваемую смесь аналогичен действию рабочего колеса центробежного насоса.

При перемешивании в турбулентном смесителе частицам смеси сообщаются высокие скорости и сложные траектории движения. В результате столкновения частиц друг с другом, со стенками и лопастями смесителя степень смачивания повышается, обеспечивается равномерное распределение воды, физическое и химическое диспергирование, сдираются экранирующие гидросульфоалюминатные пленки с частиц вяжущего с обнажением новых активных центров. В результате достигается ускорение гидратации вяжущего и повышение прочности материала.

Смеситель турбулентного типа» (модель СВ-2М), разработанный конструкторским бюро АО «ОЗРСС», лабораторная модель которого использована в настоящих исследованиях, характеризуется техническими параметрами, приведенными в табл.4.4.

Таблица 4.4

Технические параметры скоростного смесителя

№	Технические характеристики	Показатели
1	Объем смесителя, л	100
2	Частота вращения ротора, об/мин	2800
3	Продолжительность цикла, с	120-180
4	Мощность привода, кВт	15
5	Габаритные размеры, мм:	
	длина	1200
	ширина	700
	высота	1050

Скоростной смеситель на действующем БСУ установлен над основной бетономешалкой. При приготовлении бетонной смеси в тихоходном смесителе, в скоростном смесителе готовится следующая порция

высококонтрированной суспензии вяжущего. Таким образом обеспечивается максимальная эффективность использования смесительного оборудования. Для промывки скоростного смесителя воду, предназначенную для последнего замеса пропускают через работающий активатор, а бетонную смесь готовят по традиционной технологии.

Размещение скоростного смесителя в действующем БСУ должно обеспечить выполнение общих требований техники безопасности, хороший доступ к затвору выгрузочного отверстия, точкам подачи материалов, а также для удобного ремонта и демонтажа частей рабочего органа смесителя при ремонтных работах.

При установке и эксплуатации скоростного смесителя следует соблюдать установленный порядок работы и меры безопасности:

- смеситель устанавливается на жесткие опоры через виброизолирующие пластины;
- при помощи фланцев к смесителю присоединяются точки тонкодисперсных компонентов вяжущего;
- трубопроводы от дозаторов воды и ПАВ присоединяют к имеющимся отверстиям в крышке смесителя;
- загрузка компонентов в смеситель производится при работающем электродвигателе;
- для предотвращения перегрузки электродвигателя, подача молотых компонентов вяжущего осуществляется постепенно в течение 20 ...30 с;
- для эффективной работы смеситель должен быть загружен не более, чем на 80% его номинального объема.

4.8 Технологическая схема получения механоактивированного вяжущего с добавкой микрокремнезема

Представление бетонов как композиционных материалов предопределяет интенсификацию процессов приготовления бетонных

смесей, активацию составляющих и отдельную технологию перемешивания [184].

Технология приготовления бетонных смесей совершенствуется в следующих направлениях:

- модернизация существующих типов смесительных установок и создание новых типов смесителей;
- поиск оптимальной последовательности загрузки и перемешивания компонентов бетонной смеси;
- разработка комплексных методов, совмещающих в себе интенсивные способы приготовления с предварительным разогревом бетонной смеси;
- введением активных минеральных добавок, направленно регулирующих свойства растворных и бетонных смесей и скорость их твердения;
- автоматизацию бетонных узлов.

Активация тонкодисперсных компонентов бетонной смеси (портландцемент, микрокремнезем) осуществлялась в высокоскоростном смесителе (трибоактиваторе), кинематическая схема которого представлена на рис.4.15.

В трибоактиваторе наряду с физико-химической активацией частиц вяжущего и микрокремнезема обеспечивается высокая однородность распределения твердых частиц в объеме суспензии.

Предложенная конструкция трибоактиватора предполагает реализацию в одном аппарате двух технологических процессов:

- 1 – механоактивацию частиц минеральных вяжущих;
- 2 – смешивание компонентов вяжущих.

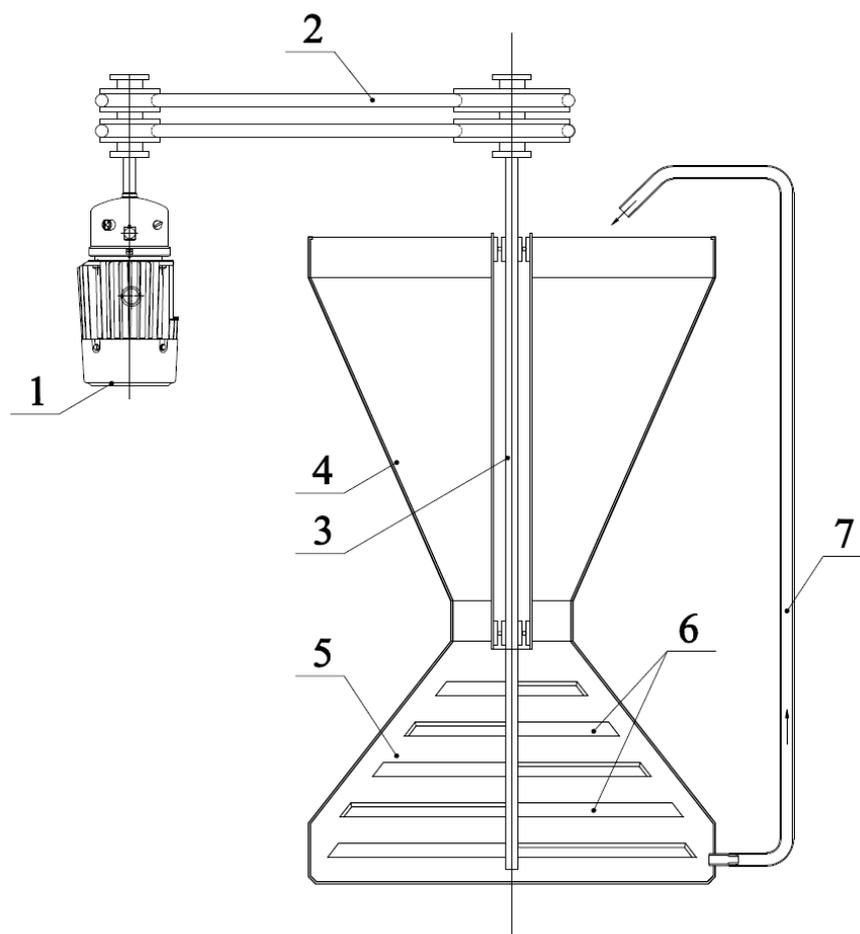


Рис. 4.15. Кинематическая схема трибоактиватора

- 1 – электродвигатель; 2 – клиноременная передача; 3 – приводной вал;
 4 – загрузочный бункер; 5 – активная зона трибоактиватора;
 6 – лопасть; 7 – гибкий шланг для циркуляции смеси и ее выдачи

Механоактивированные композиции на основе портландцемента и микрокремнезема могут быть использованы как конечный продукт. Технологическая схема при этом включает в себя склады портландцемента (1), микрокремнезема (2), расходного бункера (3), дозирочного оборудования (4), трибоактиватора (5), рис. 4.16.

Механоактивация вяжущего, включая побочные продукты других производств, более полно разрешает реализовать потенциальные возможности вяжущих в бетонах и растворах.

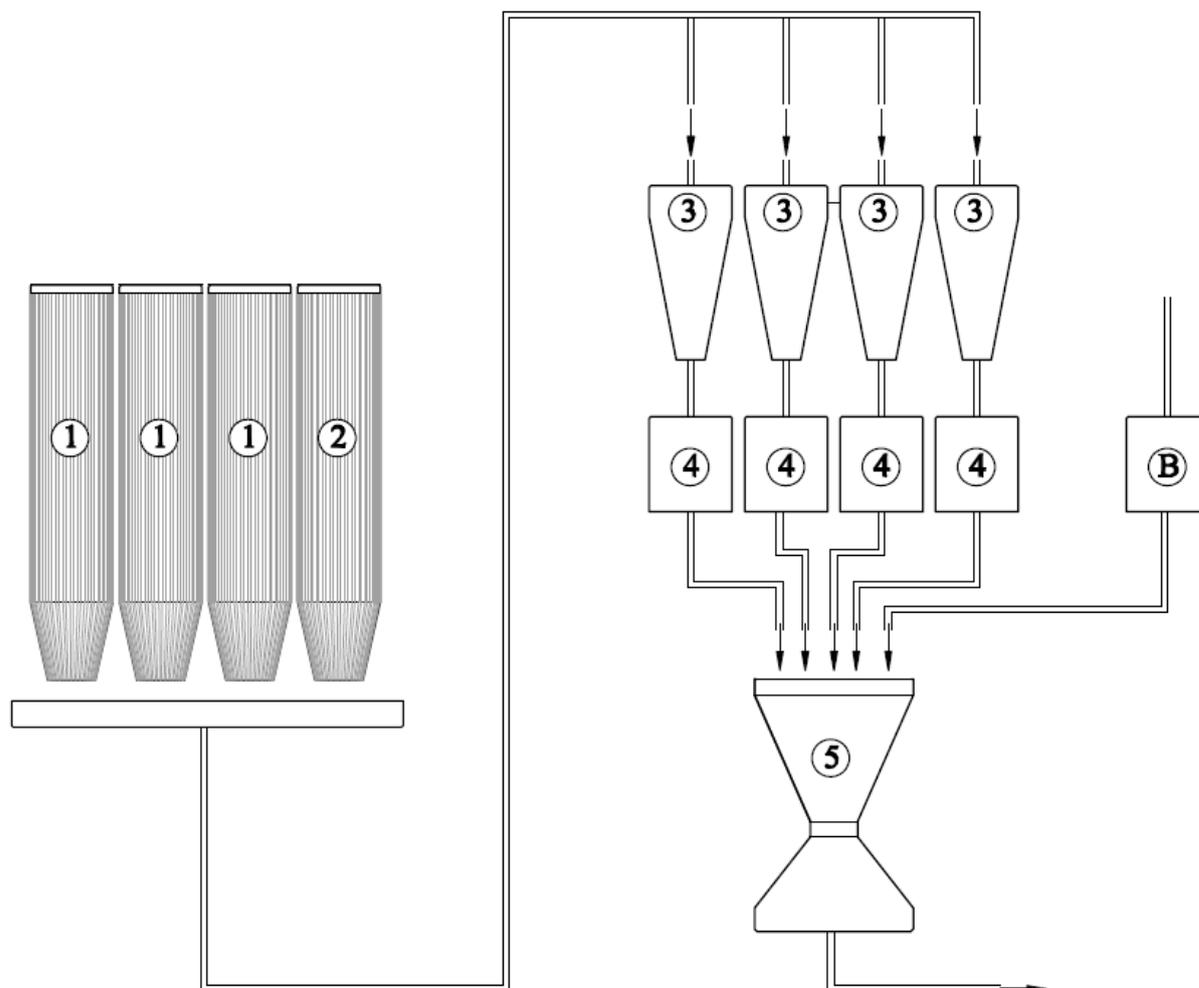


Рис.4.16. Технологическая схема производства механоактивированных композиций на основе минеральных вяжущих

Конструктивные особенности трибоактиватора разрешают легко вписать его использования в существующие технологические линии получения растворов и бетонов, как на плотных, так и на пористых заполнителях.

Предложенные режимы работы трибоактиватора практически не изменяют продолжительности приготовления растворных и бетонных смесей. Технологическая схема разрешает готовить смеси в зависимости от их назначения, с минеральными и химическими добавками. Проведенные исследования позволяют рекомендовать вводить микрокремнезем непосредственно на месте приготовления растворных и бетонных смесей.

Это дает возможность изменять количество микрокремнезема в зависимости от комплекса показателей качества конечного продукта. Принципиальная технологическая схема получения растворных и бетонных смесей на механоактивированном вяжущем с добавкой микрокремнезема приведенная на рис.4.17.

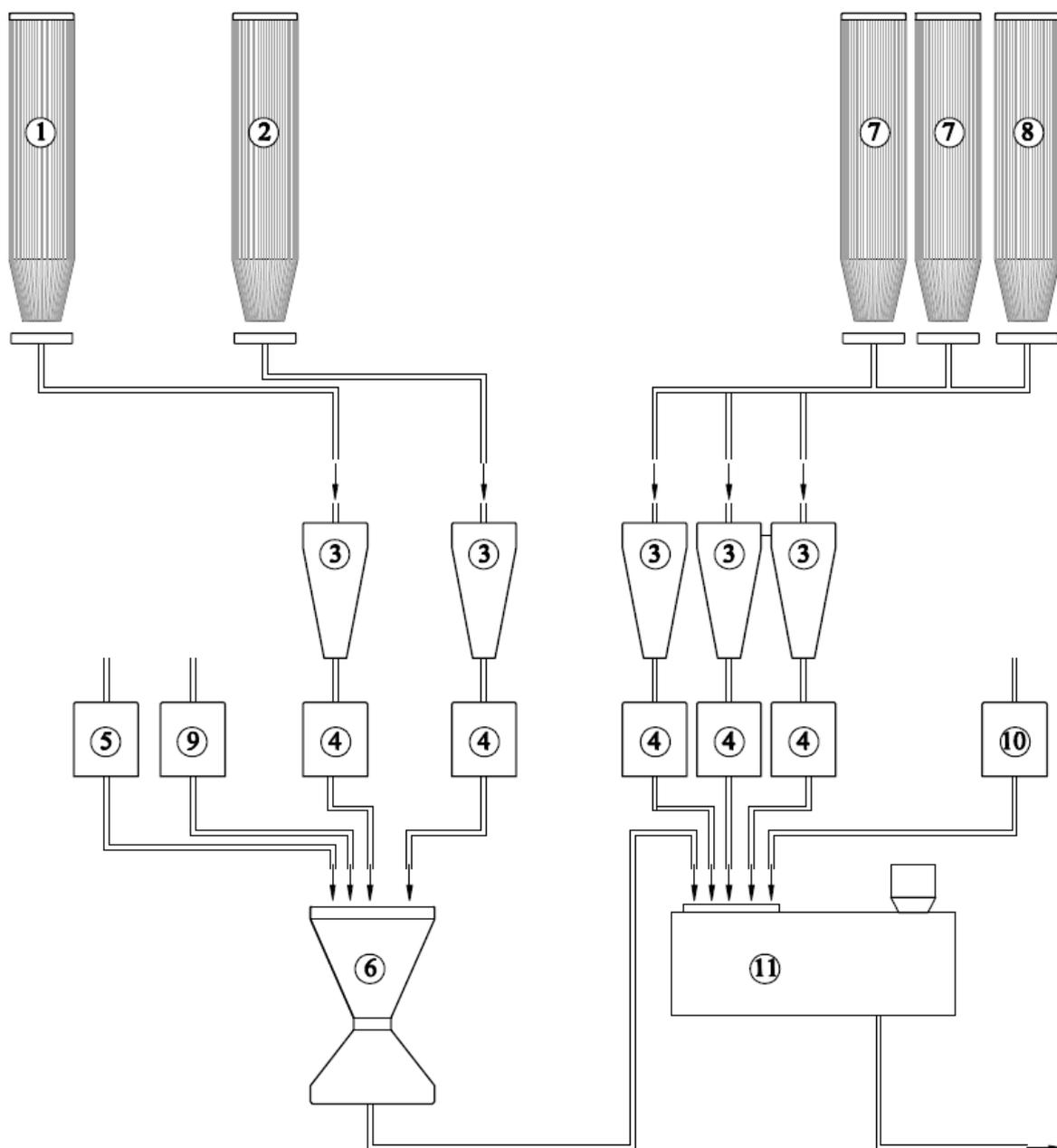


Рис.4.17. Технологическая схема производства бетонной смеси на механоактивированном вяжущем

Портландцемент (1) и микрокремнезем (2) со склада поступают в промежуточные бункеры (3). Откуда при помощи дозаторов (4) поступают в трибосмеситель (6). Часть воды и концентрированный раствор С-3 через дозаторы (5) и (9) поступают в трибоактиватор (6).

Крупный заполнитель (7) и песок (8), через промежуточные бункера (3) и весовые дозаторы (4) с частью воды затворения через дозатор (10) поступают в бетоносмеситель (растворосмеситель) (11), куда подается также активированная суспензия вяжущего. Дальнейшая переработка бетонной смеси на механоактивированном вяжущем не отличается от существующих технологий производств бетонных и железобетонных изделий.

ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 4

1. Предварительная механоактивация портландцемента и микрокремнезема позволяет получать тяжелые бетоны с прочностью при сжатии в возрасте 28 суток нормального твердения до 120 МПа.

2. Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что микрокремнезем является эффективной добавкой к механоактивированному портландцементу, позволяющий повысить прочность бетона в $1,5\div 1,7$ раза по сравнению с контролем.

3. Установлена структурообразующая роль микрокремнезема для бетона на механоактивированном вяжущем в присутствии суперпластификатора С-3. Прочность бетона при сжатии в 28-и суточном возрасте нормального твердения возрастает при этом с 60 до 123,8 МПа.

4. Коэффициент использования вяжущего бетона на механоактивированном вяжущем возрастает с 0,16 до 0,21 т.е. почти в 1,3 раз.

5. По результатам исследований оптимизированы составы высокопрочного бетона класса С70/85...С90/105.

6. Разработана технологическая схема получения бетонных смесей на механоактивированном вяжущем с добавкой микрокремнезема.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Предложен механизм активации портландцемента с добавкой микрокремнезема, который учитывает частое столкновение без разрушения частиц дисперсной фазы в турбулентных потоках дисперсионной среды с последующей реализацией трибоэффектов путем взаимодействия частиц вяжущего с водой.

2. Установлено, что механоактивация цементосодержащей суспензии в присутствии разжижителя С-3 приводит к разрушению ее структуры, которое сопровождается значительным снижением эффективной вязкости в 8-23 раза. Выявлен синергетический эффект снижения вязкости при введении в состав цементосодержащей суспензии микрокремнезема в количестве до 10% и суперпластификатора С-3 = 1%. Механоактивация вяжущего способствует интенсификации процессов структурообразования по сравнению с традиционно приготовленными цементными суспензиями, что выражается:

- в сокращении сроков схватывания (начало - на 17÷20 %, конец - на 16÷18 %);
- большей величиной максимального разогрева суспензии – с 54 до 62⁰С (контроль);
- более интенсивным набором пластической прочности.

3. Введение в портландцемент органо-минеральной добавки с одновременной механоактивацией вяжущего позволяет регулировать процессы структурообразования. Анализ дифрактограмм цементного камня показывает, что в процессе механоактивации значительно интенсифицируются процессы гидратации, а введение 10% микрокремнезема приводит к активной пуццолановой реакции между микрокремнеземом и портландцементом. Кривая дифференциально-термического анализа свидетельствует о том, что введение микрокремнезема в вяжущее приводит к уменьшению количества гидроксида кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$ за счет связывания микрокремнеземом.

4. Экспериментально установлено, что механоактивация рядового портландцемента в присутствии микрокремнезема и суперпластификатора

C-3 позволяет получать тяжелые бетоны классов C35/45...C90/105 с расходом вяжущего от 450 до 550кг/м³.

5. Оптимизированы составы высокопрочного бетона, обеспечивающие максимальные значения коэффициента использования вяжущего $K_{и.в.}$. Механоактивация цементосодержащего вяжущего в присутствии органо-минеральной добавки повышает коэффициент использования вяжущего с 0,12 до 0,21, т.е. более чем на 70%.

6. По результатам экспериментальных исследований на производственных площадях ЗАО «ПК» осуществлен опытно-промышленный выпуск бетонной смеси общим объемом 15 м³ по отдельной технологии с использованием высокоскоростного смесителя для изготовления монолитных колонн из бетона класса C35/45.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барабаш І.В. Механохімічна активація мінеральних в'язучих речовин: Навчальний посібник. – Одеса: Астропринт, 2002. - 100с.
2. Аленева А. О надежности бетона рассуждала молодежь // Капстроительство. 2003. С. 56-57
3. Зайцев И. Н. Высокопрочный бетон. "СтройПРОФИль" № 8-2007 С.1.
4. Дорф В.А Высокопрочный керамзитобетон (Обзор опыта производства, особенностей технологии и свойств)/ В.А Дорф, В.Г. Довжик // ЦНИИТЭСтром — М.: Глав-полиграфпром, 1968. — 52 с.
5. State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete // Reported by ACI Committee 363, ACI 363R-92 (Reapproved 1997). - P. 363R-2.
6. Рунова Р.Ф. Формирование структуры высокопрочных бетонов. Р.Ф. Рунова, И.И. Руденко, В.В. Троян, В.В. Товстонис, С.П. Щербина, Л.Д. Пашина // Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка №29, 2008 р., с.91-97.
7. Берг О.Я. Высокопрочный бетон./ О.Я. Берг, Е.Н. Щербаков, Г.Н. Писанко// Издательство литературы по строительству. Москва – 1971, 209с.
8. Миненко Е.Ю. Усадка и усадочная трещиностойкость высокопрочных бетонов с органоминеральными модификаторами: Дис. канд. техн. наук: 05.23.05: Пенза – 2004, 157 с.
9. Волженский А. В. Минеральные вяжущие вещества: (технология и свойства). Учебник для вузов / А. В. Волженский, Ю. С. Буров, В. С. Колокольников. - 3-е изд., пере-раб. и доп. - М.: Стройиздат, 1979. - 476 с, ил.
10. Лохер Ф.В. Исследования механизма гидратации цемента./ Ф.В. Лохер, В. Рихарц //- В кн.: Шестой междунар. конгр. по химии цемента (Москва, сент. 1974г.) - М.: Стройиздат, 1976, т. 2, кн. 1, С.122-133.

11. Ильина Л.В. Повышение прочностных характеристик цементных композитов на основе цемента длительного хранения // Фундаментальные исследования. – 2011. – № 12 (часть 1). – с. 112-116.
12. Бердов Г.И Влияние минеральных добавок на свойства цементных материалов / Г.И. Бердов, Л.В. Ильина, Н.А. Машкин // Современные наукоемкие технологии. – 2011. – № 1. – С. 49–52.
13. ТУ 5743-049-02495332-96. Модификатор бетона марки МБ-01. Технические условия.
14. Пащенко А.А. Теория цемента / А.А. Пащенко, Е.А. Мясникова, В.С. Гумен, Ю.Р. Евсютин, М.М. Салдугей, М.А. Саницкий, В.П. Сербин, В.В. Токарчук, И.Б. Удачкин, В.В. Чистяков. –Киев: Будівельник, 1991.–166с.
15. Батраков В.Г. Эффективность применения ультрадисперсных отходов ферросплавного производства./ В.Г. Батраков, С.С. Каприелов, А.В. Шейнфельд // Бетон и железобетон, 1989, № 8, С.24-25.
16. Д. Дж. Паркер, Concrete Society, Current Practice Sheet No 104, октябрь 1985. С.1
17. Симакина Г. Н. Высокопрочный дисперсно-армированный бетон: дис. канд. техн. наук: 05.23.05: Пенза - 2006, 161 с.
18. Баженов Ю.М. Технология бетона / Баженов Ю.М. – М.: Изд-во АВС, 2003. - 500 с.
19. Руководство по подбору составов тяжелого бетона / НИИЖБ. – М.: Стройиздат, 1979. -103 с.
20. Химические и минеральные добавки в бетон/Под ред. О.В. Ушерова-Маршака. – Харьков: Колорит, 2005. – 280 с.
21. Рунова Р.Ф. Снижение расхода цемента как путь обеспечения долговечности бетона / Р.Ф. Рунова, И.И. Руденко, В.И. Гоц, П.С. Шилюк // Будівельні конструкції: зб. наук. праць.– Київ, НДІБК. – Т.2. - 2005. - С. 42-50.
22. Рунова Р.Ф. Формирование структуры высокопрочных бетонов / Р.Ф. Рунова, И.И. Руденко, В.В. Троян // Будівельні матеріали, вироби та

санітарна техніка: зб. наук. праць. - Вип. 29. - Київ: товариство «Знання» України, 2008. - С.91-97.

23. Несветаев Г.В. Перспективы получения сверхбыстротвердеющих бетонов/ Г.В. Несветаев, Е.В. Виноградова // «Бетон и железобетон в третьем тысячелетии»: Третья Междунар.науч.-практ.конф. — Ростов н/Д: РГСУ, 2004.- С. 11 -14.

24. Рунова Р.Ф. Роль фракційності заповнювача у формуванні властивостей модифікованих високоміцних бетонів / Р.Ф. Рунова, І.І. Руденко, В.В. Троян //Збірник праць ІХ Міжнародної науково-практичної конференції. – Запоріжжя, 2007. – С. 51-58.

25. Халюшев О. К. Бетони на основі композиційних цементів, активованих у високовольтному електричному полі: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.01: Макіївка – 2010.- 19с.

26. Батраков В.Г. Оценка ультрадисперсных отходов металлургических производств как добавок в бетон./ В.Г.Батраков, С.С. Каприелов, Ф.М.Иванов, А.В.Шейнфельд. // Бетон и железобетон, 1990, № 12, С.15-17.

27. Кунцевич О. В. Бетоны высокой морозостойкости для сооружений Крайнего Севера.-Л.: Стройиздат, 1983,- 131 с.

28. Каприелов С.С. Высокопрочные бетоны повышенной морозосолеустойкости с органоминеральным модификатором. / С.С. Каприелов, А.В. Шейнфельд, Е.С. Силина, Н.Ф. Жигулев, С.Т. Борьгин // Транспортное строительство, № 11, 2000, с.24-27.

29. Каприелов С. С. Влияние структуры цементного камня с добавками микрокремнезема и суперпластификатора на свойства бетона/ С.С. Каприелов, А.В. Шейнфельд, Ю.Р. Кривобородов//Бетон и железобетон, 1992. № 7. - С.4—7.

30. Розенталь Н.К. Коррозионностойкие бетоны особо малой проницаемости / Н.К. Розенталь, Г.В. Чехний //Бетон и железобетон. - №1. - 1998. С. 27-29.

31. Руководство по определению диффузионной проницаемости бетона для углекислого газа, М.: НИИЖБ, 1974, 19 с.
32. Бутт Ю.М. Технология вяжущих веществ./ Ю.М.Бутт, С.Д.Окороков, М.М.Сычев, В.В.Тимашев. // М.: Высшая школа, 1965, 143 с.
33. Schmidt M. Ultra High Performance Concrete (UHPC)/ M. Schmidt, E. Fehling, C. Geisenhanslake (eds.): // — Proceedings of the 1st International Symposium on Ultra High Performance Concrete; Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Universitat Kassel, Heft 3, 2004.
34. Каприелов С.С. Бетоны нового поколения с высокими эксплуатационными свойствами / С.С. Каприелов, А.В. Шейнфельд // Материалы Международной конференции "Долговечность и защита конструкций от коррозии", Москва, 25-27 мая 1999, с.191-196.
35. Барабаш Т.И. Свойства твердеющих механоактивированных цементных композиций / Т.И. Барабаш, В.Н. Выровой, И.В. Барабаш // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди.-Рівне: РДТУ, 2001. - С.3-7.
36. Барабаш И.В. Механохимическая активация дисперсных систем/ И.В. Барабаш, К.А. Стрельцов, Л.Н. Ксеншкевич // Вісник ОДАБА. – Одеса: ОДАБА. - 2007. – вип. №27. - С.16-21.
37. Барабаш И.В. Механохимическая активация в технологии приготовления бетонных смесей. // Вісник ОДАБА, Одеса, вип.13, 2004.- С.16-23.
38. Серия «СТРОИТЕЛЬ». Бетоны. Материалы и технологии. Оборудование. М.: Стройинформ, Ростов-на-Дону: Феникс, 2006. – 424 с.
39. Зайченко Н.М. Высокопрочные тонкозернистые бетоны с комплексно модифицированной микроструктурой: Монография / Н.М. Зайченко. – Макеевка: ДонНАСА, - 2009. 207 с.
40. Лихачев Д. В. Автоматизация процесса проектирования составов бетонных смесей и их корректировки на основе прогнозирования качества

будущего бетона с использованием четких и нечетких моделей: дис. канд. техн. наук: 05.13.06: Орел - 2004, 148 с.

41. Баженов Ю.М. Новый век: новые эффективные бетоны и технологии/ Ю.М. Баженов, В.Р. Фаликман // Материалы 1-й Всерос. конф. по проблемам бетона и железобетона. - М.: Ассоциация «Железобетон», 2001. - С.91-101

42. Малинецкий Г. Г. Нанотехнологии. От алхимии к химии и дальше// Интеграл. 2007, № 5, с.4-5.

43. Aïtcin P.-C. The art and science of high-performance concrete / P.-C. Aïtcin // Nelu Spiratos Symposium on Siperplasticizers. - Bucharest, Romania, June2003. - P. 69-88.

44. Пустовгар А.П. Бетон высоких достижений:, Журнал "Мир строительства и недвижимости" №24, Москва: МГСУ – 2008. С. 1.

45. Аксенов В. Н. Проектирование гибких преднапряженных железобетонных колонн из высокопрочного бетона: дис. канд. техн. наук: 05.23.01: Ростов-на-Дону, - 2009, 185 с.

46. Андрианов А. А. Ползучесть высокопрочного легкого бетона из смесей высокоподвижной и литой консистенции с модификаторами на органоминеральной основе: дис. канд. техн. наук: 05.23.01: Москва, 2007, 184с.

47. Constitutive modeling o/ high strength/high performance concrete, FIB Bulletin 42, Sprint-Digital-Druck, Stuttgart, 2008, 125 p.

48. DIN 1045-2 Norm, 2001-07.Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton-Teil 2: Beton; Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformitt; Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1. Beuth Verlag, Berlin.

49. DIN EN 206-1 Norm, 2001-07.Beton-Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformitt. Deutsche Fassung EN 206-1:2000, Beuth Verlag, Berlin.

50. Сычѳв М.М. Химические аспекты образования межчастичных контактов при твердении вяжущих систем. //Твердение цемента. -Уфа: НИИПромстрой, 1974.- С. 107-118.

51. Гранковский И.Г. Структурообразование и тепловлажностная обработка полимерцементов./ И.Г. Гранковский, Н.Н. Круглицкий, Г.П. Бойко // - Физико-хим. механика и лиофильность дисперсных систем, 1973, вып. 5, С. 104-106.

52. Надел Л.Г. Физико-химические и реологические исследования дисперсных систем цемент-вода и цемент-палыгорскит-вода при динамических и температурных воздействиях: Автореф. дис. канд.хим. наук.- Киев,1977.-27с.

53. Гиббс Дж. В. Термодинамика. Статистическая механика. - М.: Наука, 1982. – 584 с.

54. Гуриков Ю.В. Взаимная ориентация молекул воды в ионных растворах и высаливание неэлектролитов. - Журн. структур. химии. 1960,№3, С. 286-288.

55. Ениклопян Н.С. Композиционные материалы – материалы будущего. Ж. Всем. хим. –ва им. Д.И. Менделеева, т. XXIII, № 3, 1978. – С. 243-245.

56. Ефремов И.Ф. Разупорядочивающее влияние поверхностно-активных веществ на структуру воды /И.Ф. Ефремов, Л.А. Воронина, А.Е. Ковылов, Г.В. Самигуллина. -В кн.: Физико-химические основы применения поверхностно-активных веществ: Тез. докл. респ. конф. (Донецк, сент. 1981г.). Донецк: Изд-во Донецк. ун-та, 1981, с. 12.

57. Ристич М.М. Основы науки о материалах. – К.: Наукова думка, 1984. - 152 с.

58. Duries M. Concrete additives (in German). – Betonstein Ztg., 1958, 24, №5, S.122-135.

59. Ramakrishnan V. Workability and strength of superplastifised concrete/ V. Ramakrishnan, W. Coyle, S. Pande // Indian Concrete J.-1980.-Vol. 54.-№1.-P. 23-26.
60. Куннос Г.Я. Вибрационная технология бетона. - Л.: Госстройиздат,1967.-168с.
61. Десов А.Е. Вибрированный бетон.-М.: Госстройиздат,1956.-229с.
62. Калмыкова Е.Е. Виброактивирование цементного теста./ Е.Е. Калмыкова, Н.В. Михайлов //- Гидротехн. стр-во,1958, №8, С.18-24.
63. Штаерман Ю.Я. Виброактивация цемента. -Тбилиси: Техника, 1977. - 44с.
64. Шестопёров С.В. Структура цементного камня после многократного повторного вибрирования бетонной смеси./ С.В. Шестопёров, А.Н. Измайлов //- Тр. Моск. автомоб.-дор. ин-та, 1972, вып. 38, С. 83-87.
65. Урьев Н.Б.. Динамика структурированных дисперсных систем. Российская академия наук. Коллоидный журнал. Том 60, № 5, Сентябрь - октябрь 1998. МАИК «Наука». Главный редактор Н.В. Чураев. Журнал физикохимии поверхностных явлений и дисперсных систем. С. 662-683.
66. Урьев Н.Б. Коллоидные цементные растворы. / Н.Б.Урьев, И.С. Дубинин //М.-Л.:Стройиздат,1980.-192с.
67. Урьев Н.Б. Физико-химические основы технологии дисперсных систем и материалов. М.: Химия, 1988. - 256с.
68. Виноградов Б.Н. Влияние заполнителей на свойства бетона. – М.: Стройиздат, 1979. - 223 с.
69. Ходаков Г.С. Физико-химическая механика измельчения твёрдых тел. С. 684-697.
70. Ходаков Г. С. Физика измельчения. М.: Наука, 1972. - 308с.
71. Яхнин Е.Д. О связи прочности дисперсных структур с силами взаимодействия между структурообразующими частицами и их упаковкой. С. 717-720.

72. Зубрилов С.П. Физико-химические аспекты ультразвуковой активации вяжущих материалов: Автореф. дис. д-ра техн. наук.- Л., 1977.- 40с.

73. Гранковський І.Г. Кінетика структуроутворення у водних цементних і цементно-пісчаних дисперсіях під впливом магнітного поля./ І.Г. Гранковський, М.М. Круглицький, Г.А. Пасічник // - Доп. АН УРСР. Сер. А. 1973. №8, С. 751-753.

74. Гранковский И.Г. Структурообразование и тепловлажностная обработка полимерцементов./ И.Г. Гранковский, Н.Н. Круглицкий, Г.П. Бойко // - Физико-хим. механика и лиофильность дисперсных систем, 1973, вып. 5, С. 104 - 106.

75. Штакельберг Д.И. Термодинамика структурообразования водно-силикатных дисперсных материалов. – Рига, Зинатне, 1984. - 200 с.

76. Дейнега Ю.Ф. Некоторые вопросы электрореологии дисперсных систем.-Инж.-физ. журн., 1970. 18. вып. 6, С. 994-999.

77. Федоркин С.И. Механоактивация вторичного сырья в производстве строительных материалов. - Симферополь: Таврия, 1997.-180с.

78. Матвиенко В.А. Электрические явления и активационные воздействия в технологии бетона./ В.А. Матвиенко, С.М.Толчин // 1998.- 154с.

79. Гранковский И.Г. Стадии структурообразования и магнитная активация цементно-водных дисперсий и составов на их основе./ И.Г. Гранковский, Н.Н. Круглицкий, Г.А Пасечник. //- В кн.: Вопросы теории и практики магнитной обработки воды и водно-дисперсных систем. Новочеркасск: Новочеркас. политехн. ин-т, 1975, С. 217-222.

80. Лохер Ф.В. Исследования механизма гидратации цемента./ Ф.В. Лохер, В. Рихарц //- В кн.: Шестой междунар. конгр. по химии цемента (Москва, сент. 1974г.) М.:Стройиздат, 1976, т. 2, кн. 1, С.122-133.

81. Скрышевский А.Ф. Структурный анализ жидкостей и аморфных тел.-М.: Высш. шк., 1980.-378с.

82. Королев К.М. Магнитная обработка воды в технологии бетона / К.М. Королев, В.М. Медведев // Бетон и железобетон. – 1971. - № 8.- С. 44-45.
83. Шахпаронов М.И. Молекулярное движение и строение воды и водных растворов/ М.И. Шахпаронов, В.С. Сперкач, А.Л. Штангеев и др.// – Химия и технология воды, 1980, 2, № 6, С. 485-491.
84. Дерягин Б.В. Итоги исследования свойств граничных слоёв жидкостей и их роль в устойчивости дисперсных систем. – В кн.: Успехи коллоидной химии. М. : Наука, 1973, С. 30-38.
85. Meyer K. Phys. Chem. Kristallographie.-Leipzig, 1968.-S.247-249.
86. Гранковский И.Г. О механизме процессов структурообразования минеральных вяжущих веществ. - В кн.: IV Респ. конф. по физико-химии, технологии получения и применения дисперс. систем, промыв. жидкостей и тампонажных растворов (Ивано-Франковск, сент. 1977 г.) Киев: Наук. думка, 1977, С. 58-60.
87. Рамачандранов В. Наука о бетоне./ В. Рамачандранов, Р. Фельдман, Дж. Бодуэн // Под ред. Ратинова В.Б. – М.: Стройиздат, 1986. - 278 с.
88. Ефремов И.Ф. Периодические коллоидные структуры, их особенности и классификация. -Журн. прикл. химии, 1979, 52, №12, С. 2683-2685.
89. Улазовский В.А. Твердение цементов, затворенных омагниченной водой / В.А. Улазовский, С.А. Ананьина // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1970. - № 8. – С. 97-99.
90. Фридрихсберг Д.А. Курс коллоидной химии.–Л.: Химия, 1984 - 368с.
91. Выровой В.Н. Механизм формирования внутренних поверхностей композиционных материалов. // Применение цементных и асфальтовых бетонов в Сибири: Сб-ник научн. трудов. – Омск: Сиб. АДИ, 1983. – С. 3-10.
92. Гранковский И.Г. Структурообразование в минеральных вяжущих системах. – К.: Наукова думка, 1984. – 300 с.

93. Черкинский Ю.С. Гидратационное твердение цемента в присутствии полимеров./ Ю.С. Черкинский, Г.Ф. Слипченко //-В кн.: Шестой междунар. конгр. по химии цемента.(Москва, сент. 1974г.) М.: Стройиздат, 1976, т. 3, С.305-307.
94. Круглицкий Н.Н. Исследование адгезионной прочности вибрированных полимерцементов. /Н.Н. Круглицкий, Г.П. Бойко// - Физико-химическая механика цементно-полимерных композиций. -Киев: Наук. думка, 1981.-239с.
95. Будников П.П. Реакции в смесях твердых веществ./ П.П. Будников, А.М. Гистлинг // – М.: Стройиздат, 1971. – 488 с.
96. Колобердин В.И. Влияние ударной обработки на степень механической активации минерального сырья / В.И. Колобердин, В.М. Ражев, Н.А. Путников // Разработка теории и конструктивного оформления машин. – Иваново: ИХТИ. – 1988. – С. 79-82.
97. Волженский А.В. Бетоны и изделия из шлаковых и зольных материалов.- М.:Стройиздат, 1969.-284с.
98. Кокубу М. Цементы с добавкой золы. / М. Кокубу, Д. Ямада // - В кн.: Шестой междунар. конгр. по химии цемента.(Москва, сент., 1974г.).М.: Стройиздат, 1976, т.3. С. 83-94.
99. Грим Р.Е. Минералогия глин. - М.: Изд-во иностр. лит., 1959.-452с.
100. Нильсен Л. Механические свойства полимеров и полимерных композиций . - М.: Химия, 1978.-310с.
101. Пасечник Г.А. Структурообразование дисперсий минеральных вяжущих веществ при механических и электромагнитных воздействиях: Автореф. дис. канд. хим. наук.-Киев, 1973.-20с.
102. Круглицкий Н.Н. Разработка оптимальных условий магнитной обработки воды для бетона./ Н.Н. Круглицкий, И.Г. Гранковский, В.В. Шевчук, Г.А. Пасечник.-Материалы и конструкции, 1978, №6, С. 37-38.

103. Дерягин Е.В. Новые свойства жидкостей./ Е.В. Дерягин, Н.В. Чураев // - М.: Наука, 1971.-250с.
104. Дюженко М.Г. Активация бетонной смеси методом электрогидравлической обработки / М.Г. Дюженко, М.И. Кобзарь, Т.С. Стурова // Тр. ВНИИВодГео. – Харьков. – Вып. 1. – 1968. – С. 33-35.
105. Соломатов В.И. Полимерцементные бетоны и пластобетоны. - М.: Стройиздат. 1967.-184с.
106. Коваль С.В. Автоматизированная установка для исследования коррозионной стойкости полимер- и цементных бетонов./ С.В. Коваль, И.В. Пасконов // – Инф. листок ОЦНТИ № 83-78, Одесса, 1983 - 4 с.
107. Бойко Г.П. Структурообразование и прочность бетона с модифицирующей добавкой./ Г.П. Бойко, И.Г. Гранковский, Л.Д. Зарудная //- Строит. материалы и конструкции, 1978,№1, С. 37-39.
108. Лермит Р. Проблемы технологии бетона. - М.: Госстройиздат, 1959.-252с.
109. Кублинь Ч.Я. Об активации цементного теста при интенсивных вибрационных воздействиях: Исследования по бетону и железобетону, 1958, вып. 3.-Рига.- С.26-37.
110. Шпынова Л.Г. Физико-химические основы формирования структуры цементного камня./ Л.Г. Шпынова, В.И. Чих, М.А. Саницкий, Х.С. Соболев, С.К. Мельник // - Львов: Вища школа, 1981.-158с.
111. Richartz W. On the structure and strings development of the hardened cement paste// Beton.-1969.-Vol. 19.-P. 203-206.
112. Барабаш И.В. Управление технологией приготовления бетонной смеси на высоконаполненной известесодержащей суспензии./ И.В. Барабаш, Е.С. Шинкевич, С.Н. Щербина, Н.Н. Пласконь // – Строительные материалы и конструкции. – 1994. - № 1. – С. 39-40.
113. Дорофеев В.С. Технологическая поврежденность строительных материалов и конструкций./ В.С. Дорофеев, В.Н. Выровой // – Одесса: Город мастеров, 1998, - 165с.

114. Сиверцев Г.Н. Пробужденный бетон. – М.: Госстройиздат, 1951. – 173с.
115. Соломатов В.И. Кластерообразование композиционных строительных материалов./ В.И. Соломатов, В.Н. Выровой // В. кн.: Технологическая механика бетона. – Рига: РПИ, 1985, С. 5 – 21.
116. Ахвердов И.Н. Основы физики бетона. М.: Стройиздат, 1981, 464с.
117. Колокольников В.С. Технология бетонных и железобетонных изделий. – М.: Высшая школа, 1970. – 392с.
118. Невиль А.М. Свойства бетона. – М.: Стройиздат, 1972. – 344с.
119. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика. – Избр. труды. – М.: наука, 1979, 384с.
120. Будников П.П. Реакции в смесях твердых веществ./ П.П. Будников, А.М. Гистлинг // 3 – е изд. – М.: Стройиздат, 1971, 488с.
121. Дельмон Б. Кинетика гетерогенных реакций. – М.: Мир, 1972, 554с.
122. Сватовская Л.Б. Активированное твердение цементов./ Л.Б. Сватовская, М.М. Сычев // – Л.: Стройиздат, 1983, 160 с.
123. Полак А.Ф. Твердение мономинеральных вяжущих веществ. – М.: Стройиздат, 1996, 208с.
124. Зимон А.Д. Аутогезия сыпучих материалов./ А.Д. Зимон, Е.Н. Адрианов // – М.: Metallургия, 1978, - 278с.
125. Бутт Ю.М.Химическая технология вяжущих материалов./ Ю.М. Бутт, М.М. Сычев, В.В. Тимашев// – М.: Высшая школа. 1980. – 472 с.
126. Бутт Ю.М. Портландцемент./ Ю.М. Бутт, В.В. Тимашев // – М.: Стройиздат, 1974, 328с.
127. Ли Ф.М. Химия цемента и бетона. - М.: Стройиздат, 1961, - 645с.
128. Комохов П.Г. Механико-энергетические аспекты процессов гидратации, твердения и долговечности цементного камня. – Цемент, №2 1987, С.20 – 22.

129. Штакельберг Д.И. Термодинамика структурообразования водосиликатных дисперсных материалов. – Рига, Зинатне, 1984, - 200с.
130. Шпинова Л.Г. Физико-химические основы формирования структуры цементного камня./ Л.Г. Шпинова, В.И. Чих, М.А. Саницкий и др. // – Львов: Вища школа, 1981, - 158с.
131. Демьянова В. С. Об использовании дисперсных наполнителей в цементных системах/ В.С. Демьянова, В.И. Калашников, А.А. Борисов // Жил. стр-во.1999, № 1.
132. Каприелов С.С. Бетоны нового поколения с высокими эксплуатационными свойствами / С.С. Каприелов, А.В. Шейнфельд // Материалы Международной конференции “Долговечность и защита конструкций от коррозии”, Москва, 25–27 мая 1999, С.191-196.
133. Герш Фишман Технология изготовления несущих элементов из легких конструкционных бетонов: дис. докт. техн. наук: 05.23.08: Молдова, 2006, 170с.
134. Шейнфельд А.В. Морозостойкость и морозосолеустойкость высокопрочных бетонов из высокоподвижных смесей. / А.В. Шейнфельд, А.В. Батудаева// Международная конференция «Долговечность строительных конструкций. Теория и практика защиты от коррозии». // Материалы международной конференции 7–9 октября, 2002, г. Волгоград, с.136-141.
135. Адылходжаев А.И. Основы интенсивной раздельной технологии бетона./ А.И. Адылходжаев, В.И. Соломатов // Ташкент: Фан, 1983. - 213с.
136. Соломатов В.И. Бетон как композиционный строительный материал. /В.И. Соломатов, В.Н. Выровой, Н.А. Аббасханов //– Строительство и архитектура. Изв. вузов, № 8, 1980. С. 61-70.
137. Соломатов В.И. Наполненные цементы и перспективы их применения на предприятиях стройиндустрии Молдавской ССР./ В.И. Соломатов, В.Н. Выровой, В.И. Литвак // - Кишинев: Молд.НИИТИ, 1986. - 67с.

138. Соломатов В.И. Механизм образования дискретных структур при структурообразовании цементных композиций как высококонцентрированных систем./ В.И. Соломатов, В.Н. Выровой, А.В. Сиренко // - В мат. конф. по физикохимии получения и применения промывочных жидкостей, дисперсных систем и тампонажных растворов. – Киев: ИКХХВ АН УССР, 1985. – С. 128.

139. Барабаш И.В. Влияние технологических параметров на формирование структуры, фазовый состав и свойства известесодержащих композитов. /И.В. Барабаш, Е.С. Шинкевич, О.П. Гнып //– Международный семинар «Экспериментально-статистическое моделирование в компьютерном материаловедении». – Киев. – УДЭНТП, 1993. – С. 42-44.

140. Барабаш И.В. Моделирование механизмов структурообразования механоактивированных грубодисперсных систем. – Мат-лы к 39-му международному симпозиуму по моделированию и оптимизации композитов. МОК-39. – Одесса, 2000. – С.75.

141. Барабаш И.В. Технологические особенности получения механоактивированных композитов. - Вісник ОДАБА. – Вип. 9. – 2003. – С. 19-26.

142. Барабаш И.В. Эффективная вязкость механоактивированных композиций на неорганических вяжущих. - Вісник ОДАБА. – Вип. 12. – 2003. – С. 12-32.

143. Барабаш И.В. Цементные бетоны на механоактивированном вяжущем. / И.В. Барабаш, И.Н. Бабий, В.Д. Матковский //– Вісник ОДАБА. – Вип. 10. – 2003. – С. 15-19.

144. Барабаш И.В. Механизмы организации структуры механоактивированных грубодисперсных систем. – В зб.: Композиційні матеріали для будівництва. /И.В. Барабаш, В.Н. Выровой //– Вісник ДДАБА. – 2000. – 2 (22). – Макіївка. – С.12-15.

145. Барабаш И.В., Интенсивная раздельная технология бетонов на наполненном известковом вяжущем. /И.В. Барабаш, В.И. Соломатов //– Строительные материалы. – 1992. - № 1. – С. 4-5

146. Барабаш И.В. Влияние наполнителей на структурообразование и свойства силикатных бетонов, приготовленных по ИРТ./ И.В. Барабаш, Е.С. Шинкевич// – Сб. тр. ОГАСиА. – «Строительные материалы, конструкции и инженерные системы». – Одесса. – 1996. С. 221-234.

147. Барабаш И.В. Анализ влияния рецептурно-технологических факторов на свойства известсодержащей суспензии и мелкозернистого бетона на его основе. / И.В. Барабаш, Е.С. Шинкевич, С.Н. Щербина //– В сб.: Физико-химические и технологические особенности получения малоцементных строительных материалов. К.: УМДМТП. – 1992. – С. 21-22.

148. Соломатов В.И. Физические особенности формирования структуры композиционных строительных материалов. / В.И. Соломатов, В.Н. Выровой // – Изв. вузов. Строит. и арх., № 8, 1984. – С. 59-64.

149. Соломатов В.И. Роль наполнителей в структурообразовании и разрушении композиционных строительных материалов. / В.И. Соломатов, В.Н. Выровой //В сб.: Прогрессивные ресурсосберегающие процессы в технологии строительных материалов и изделий и их контроль. – Брянск: БГИ, 1984. – С. 31-37.

150. Азелицкая Р.Д. Повышение прочности изделий за счет применения омагниченной воды /Р.Д.Азелицкая, Н.А.Приходченко// Акустическая и магнитная обработка веществ.–Новочеркасск, 1966. – С.31-36

151. Дмитриев А.М. Теоретические и экономические основы получения многокомпонентных цементов. / А.М. Дмитриев, В.В. Тимашев //– Цемент, № 10, 1981. – С. 1-3.

152. Пантелеев А.С. Цементы с минеральными добавками – микронаполнителями / А.С. Пантелеев, В.М. Колбасов // Новое в химии и технологии цемента. – М.: Стройиздат, 1962. – С. 155-164.

153. Строк Ю. Теория состава бетонной смеси. – Л.: Стройиздат, 1972. - 218 с.
154. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. - М.: Стройиздат, 1990. - 400 с.
155. Батраков В.Г. Повышение долговечности бетона с добавками кремнийорганических полимеров. – М: Стройиздат, 1968. – 135 с.
156. Джейкок М. Химия поверхностей раздела фаз./ М. Джейкок, Дж. Парфит // – М.: Мир, 1984. - 269 с.
157. Ратинов В.Б. Добавки в бетон./ В.Б. Ратинов, Т.И. Розенберг // – М.: Стройиздат, 1973. – 207 с.
158. Ратинов В.Б. Добавки в бетон./ В.Б. Ратинов, Т.И. Розенберг // – М.: Стройиздат, 1989. – 188 с.
159. Никифиров А.П. Добавки для бетона. Состояние и перспективы // Будівельні конструкції. Сучасні проблеми бетону та його технологій. – К.: НДІБК., 2002. – С. 186-190.
160. Барабаш И.В. Раздельная технология приготовления бетонных смесей/ И.В. Барабаш, В.Н. Выровой, Т.И. Барабаш, Л.Н. Ксеншкевич // Вісник ОДАБА. – Одеса: ОДАБА. - 2008. - С.18-20
161. Совалов М.Г. Методы активации цементов и влияние активации на свойства бетонов. / М.Г. Совалов, Ю.Г. Хаютин //- М.: Госстройиздат, 1963. - 41с.
162. Барабаш І.В. Аналіз механізмів організації структури механоактивованих полідисперсних та полімінеральних систем./ І.В. Барабаш, І.Н. Бабій, Т.І. Барабаш // – Вісник ОДАБА.- Вип.. 15. – 2004. – С. 24-29.
163. Барабаш Т.И. Влияние механохимической активации и содержания микронаполнителя на прочностные характеристики цементных матриц. / Т.И. Барабаш, И.Н. Бабий // – Вісник ОДАБА. – Вип. 12. – 2003. – С. 40-45.

164. Гладких Ю.П. Активация кварцевого заполнителя путем его совместной обработки азотной кислотой и бриллиантовым зеленым. / Ю.П. Гладких, В.В. Ядыкина, В.И. Завражина //– Проблемы материаловедения и совершенствование технологии производства строительных изделий. – Сб. научных трудов. – БТИСМ им. И.А. Тришманова. – Белгород. – С. 98-105.

165. Кипнис Б.М. О перспективных направлениях применения дезинтеграторов в различных технологиях / Б.М. Кипнис, Л.С. Ванаселья, В.Р. Клаусон // Строительные материалы. – 1993. № 1 – С. 14-16.

166. Шейкин А.Е. Структура, прочность и трещиностойкость цементного камня. М.: «Стройиздат», 1974.- 296с.

167. Вадюнина А. Ф. Методы исследования физических свойств почв. / А.Ф. Вадюнина, З.А. Корчагина // - М.: Агропромиздат, 1986. - 416 с.

168. Болдырев В.В. Экспериментальные методы в механохимии твёрдых неорганических веществ. - Новосибирск: Наука, 1983.-264с.

169. Иванов Ф.И. Основные направления применения химических добавок к бетону. / Ф.И. Иванов, В.Г. Батраков, А.В. Лагойда //– Бетон и железобетон, №9, 1981. – С.3-5.

170. Грушко И.М. К вопросу об оптимизации процесса магнитной обработки воды, используемой для затворения цементных бетонов/ И.М.Грушко, Л.А. Бетова, Б.А. Лишанский //Известия вузов. Строительство и архитектура.-1982.-№3-С.84-88.

171. Барабаш И.В. Органо-минеральный модификатор и его влияние на эффективную вязкость цементосодержащих суспензий / И.В. Барабаш, Л.Н. Ксеншкевич, Т.И. Барабаш, А.В. Дорофеев // Вісник ОДАБА. – Одеса: ОДАБА. - 2008. - вип. №30. - С.15-19.

172. Ксеншкевич Л.Н. Влияние микрокремнезема на эффективную вязкость цементных суспензий / Л.Н. Ксеншкевич, Т.И. Барабаш, О.П. Тесля //ОДАБА Вісник вип. №31 Одеса-2010. С.177-180.

173. Барабаш И.В. Синергетический эффект снижения вязкости механоактивированных цементных суспензий с добавкой микрокремнезема/

И.В. Барабаш, Л.Н. Ксеншкевич, К.А. Стрельцов, С.А. Крюковская, Е.И. Болатова // Моделирование и оптимизация в материаловедении: Мат-лы к 47-му международному семинару по моделированию и оптимизации композитов. - Одесса.- Астропринт. - 2008 С. 137-138.

174. Барабаш И.В. Бетоны на механоактивированных минеральных вяжущих. – Дисс. доктора тех. наук, Одесса, 2005. - 307 с.

175. Ребиндер П.А. Проблемы образования дисперсных систем и структур в этих системах. Физико-химическая механика дисперсных структур и твёрдых тел. //Современные проблемы физической химии. - М.: Изд. МГУ, 1968.- С. 334-414.

176. Мчедлов-Петросян О.П. Термодинамика и термохимия цемента/ О.П.Мчедлов-Петросян, В.А. Бабушкин //В кн.: Шестой междунар. конгр. по химии цемента (Москва, сент. 1974г.).М.:Стройиздат,1976,т.2, С.6-16.

177. Барабаш И.В. Влияние микрокремнезема на кинетику структурообразования механоактивированных цементных суспензий/ И.В. Барабаш, Л.Н. Ксеншкевич, А.А. Тертычный, А.О. Косюга, В.В. Пряхина // Вісник ОДАБА. – Одеса: ОДАБА. - 2010. - вип. №38. – С.31-34.

178. Ксеншкевич Л.Н. Физико-химические и физико-механические методы исследования цементного камня с добавкой микрокремнезема/ Л.Н. Ксеншкевич, И.В. Барабаш // Вісник ОДАБА. – Одеса: ОДАБА. - 2010. - вип. №40. - С.161-167.

179. Ксеншкевич Л.Н. Физико-химические и физико-механические методы исследования цементного камня с добавкой микрокремнезема/ Л.Н. Ксеншкевич, А.И. Уварова // Вісник ОДАБА. – Одеса: ОДАБА. - 2011. - вип. №41. - С.152-158.

180. Ксеншкевич Л.Н. Влияние микрокремнезема на прочность бетона/ Л.Н. Ксеншкевич, И.В. Барабаш, А.В. Дорофеев // Вісник ОДАБА. – Одеса: ОДАБА. - 2011. - вип. №44. - С.157-161.

181. Ксеншкевич Л.Н. Органо-минеральная добавка и ее влияние на прочность бетона / Л.Н. Ксеншкевич, А.В. Дорофеев, А.И. Ворохаев // Вісник ОДАБА. – Одеса: ОДАБА. - 2012. - вип. №46. - С.197-201.

182. Ксеншкевич Л.Н. Свойства высокопрочных бетонов на механоактивированном вяжущем / Л.Н. Ксеншкевич, И.В. Барабаш, А.В. Дорофеев // Вісник ОДАБА. – ОДЕСА Зовнішрекламсервіс 2012. - вип. №48. - С.264-269.

183. Соломатов В.И. Композиционные строительные материалы и конструкции пониженной материалоемкости/ В.И. Соломатов В.Н. Выровой, В.С. Дорофеев, А.В. Сиренко// – К.: Будивэльнык, 1991. – 144с.:ил.

184. Лермит Р. Проблемы технологии бетона. - М.: Госстройиздат, 1959.-252с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

«Утверждаю»

Директор ЗАО «ПК»

Гудзенко С.Ф.

«12» апреля 2012 г.

АКТ

опытно-промышленных испытаний технологии производства бетонной смеси объемом 15м^3 с использованием скоростного смесителя активатора по отдельной технологии

Приемочной комиссией в составе:

технолог ЗАО «ПК» Веремчук А.П. и асс. кафедры городского строительства и хозяйства Одесской государственной академии строительства и архитектуры Ксеншкевич Л.Н. произведена опытно-промышленная проверка технологии производства бетонной смеси объемом 15м^3 по отдельной технологии с использованием скоростного смесителя активатора СВ-2М. Опытные-промышленные испытания произведены на производственных площадях ЗАО «ПК». В качестве минеральной добавки к портландцементу использовался микрокремнезем Никопольского завода ферросплавов. Для пластификации бетонной смеси использовался разжижитель С-3. Состав бетонной смеси был принят следующий (в пересчете на 1м^3):

Портландцемент - 405кг;
 Микрокремнезем - 45кг;
 Кварцевый песок=700кг;
 Гранитный щебень=1100кг;
 Вода=125кг;
 С-3=4,5кг

Активация цементной суспензии осуществлялась в течение 60 сек., после чего подавалась в смеситель гравитационного действия, куда загружались отдозированные гранитный щебень и кварцевый песок. После 3-х минутного смешения компонентов бетонная смесь подавалась на пост формирования.

Испытанные в 28-и суточном возрасте образцы-кубы показали прочность при сжатии 45 МПа.

Технолог ЗАО «ПК»

А.П. Веремчук

Ассистент кафедры ГСХ

Л.Н. Ксеншкевич

«Утверждаю»

Главный инженер фирмы «Стикон»

Черепенко А.Л.

«21» мая 2012 г.



АКТ

внедрения лабораторных исследований по производству бетонной смеси с использованием смесителя-активатора на производственных площадях фирмы «Стикон»

В присутствии технолога Шишкова И.В. и начальника бетонно-смесительного цеха Белозор В.Л. фирмы «Стикон» и ассистента кафедры городского строительства и хозяйства Одесской государственной академии строительства и архитектуры Ксеншкевич Л.Н. произведен выпуск бетонной смеси для железобетонных колонн в количестве 35 м^3 с использованием смесителя-активатора с количеством оборотов ротора 900об/мин.

В портландцемент М400 вводился микрокремнезем в количестве 10% от массы вяжущего. Подвижность бетонной смеси составляла 8-10см осадки конуса. В качестве разжижителя бетонной смеси использовался суперпластификатор С-3. Расход вяжущего составил 415 кг/м^3 бетона.

Образцы-кубы в возрасте 28 суток показали прочность при сжатии 46,5МПа.

Технолог фирмы «Стикон»

И.В. Шишкова

Начальник бетонно-смесительного цеха

В.Л. Белозор

Ассистент кафедры ГСХ

Л.Н. Ксеншкевич