

МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СССР  
Центр научно-технической информации по энергетике  
и электрификации

## ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ

Серия. СТРОИТЕЛЬНАЯ ИНДУСТРИЯ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Обзорная информация

Выпуск 4-5

### ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ЦЕНТРИФУГИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СТОЕК

Издается с 1979 г.

Москва 1991

Выходит 5 раз в год

---

#### В В Е Д Е Н И Е

Проблеме долговечности конструкций и сооружений из бетона и железобетона в последние годы уделяется все большее внимание. Многолетний опыт исследований в этом направлении обобщен в коллективном труде "Долговечность железобетона в агрессивных средах" под редакцией проф. Ф.М.Иванова. Огромные масштабы применения бетона и железобетона и ограничения их сроков службы в различных средах обусловили возрастание объемов работ по ремонту и восстановлению конструкций из железобетона.

Цель обзора - дать представление строителям, эксплуатационникам и работникам стройиндустрии о методах придания необходимой долговечности центрифугированным железобетонным стойкам опор линий электропередачи, контактной сети и сваям-оболочкам, эксплуатирующимся в агрессивных средах (в основном, при циклическом замораживании и оттаивании в водосоленасыщенном состоянии). Затронуты вопросы влияния армирования на долговечность этих широко используемых конструкций.

Специальный раздел посвящен заводским методам определения прочности, трещиностойкости, долговечности центрифугированного бетона,

а также неразрушающим методам контроля его свойств при коррозионных воздействиях. В обзоре содержатся некоторые дискуссионные положения, однако авторы надеются, что применение современных методов исследований и внедрение новых технологических и конструктивных решений в практике электросетевого строительства уже в ближайшее время позволит обеспечить требуемую долговечность конструкциям из центрифугированного бетона в самых суровых условиях эксплуатации.

### СОСТОЯНИЕ ЦЕНТРИФУГИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОПОР ЛЭП, РАБОТАЮЩИХ В СУРОВЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Ускоренное развитие экономики страны неразрывно связано с масштабным хозяйственным освоением Сибири и Севера и предполагает широкое использование железобетонных конструкций в суровых природно-климатических условиях.

Опыт применения центрифугированных конструкций показал их высокую эффективность, технологические и эксплуатационные преимущества по сравнению с типовыми конструкциями сплошного сечения [3, 6, 78, 95]

Однако данные литературных источников и материалы натурных обследований, проведенных в разное время институтами "Энергосеть-проект", "Оргэнергострой", ЦНИИС и др., свидетельствуют о часто встречающихся случаях снижения стойкости центрифугированных стоек опор линий электропередачи, контактной сети, свай-оболочек, в которых после их установки и некоторого срока эксплуатации в суровых климатических условиях появлялись не предусмотренные расчетом трещины [15, 52, 54, 69, 74, 87].

Поэтому актуален вопрос повышения стойкости этих конструкций при циклическом замораживании и оттаивании (ЦЗО) в водосоленасыщенном состоянии для обеспечения их нормальной эксплуатации в течение проектного срока службы.

В СССР изучение центробежного формирования бетона начинается с исследований В. В. Михайлова [70] и проектных разработок А. А. Гвоздева [34], где было убедительно показано, что эта технология может с успехом применяться для изготовления широкой номенклатуры железобетонных конструкций.

Большой вклад в теорию и практику центрифугирования внесли советские ученые В. В. Михайлов, И. Н. Ахвердов, А. П. Васильев, С. А. Дмитриев, Е. Э. Михельсон, Д. Я. Штаерман [3, 29, 30, 70, 104] и др.

Благодаря работам И.Н. Ахвердова на качественно новой основе были решены теоретические и практические задачи, позволившие изготавливать железобетонные трубы на высокопроизводительных ременных станках гидроскопического типа [3]. Комплексные исследования, проведенные Т.М. Пецоьлдом [78], стали основой для широкого внедрения центрифугированных железобетонных конструкций в качестве несущих элементов зданий и сооружений. Крупные исследования были выполнены А.П. Кудзисом, В.М. Баташевым, А.И. Курносовым, В.В. Тарасовым, Р.Р. Вадлугой и др. [7, 53, 57, 77, 105].

Одновременно с широким внедрением проводились исследования долговечности центрифугированных железобетонных конструкций. Есть различные определения термина "Долговечность" применительно к строительным материалам, конструкциям и сооружениям [31]. Долговечность для строительных материалов - относительное понятие, так как она будет различной в разных условиях эксплуатации. Это создает определенные трудности при классификации агрессивных сред, так как оценка степени агрессивности внешней среды по отношению к конструкциям из различных материалов будет неоднозначной.

Долговечность может быть определена как способность материала или конструкции из этого материала сохранять эксплуатационную пригодность в течение определенного заданного в проекте срока службы [31].

При вероятностном подходе к проектированию конструкции определяющим показателем качества является ее надежность, которая связана с вероятностью успешной эксплуатации в течение заданного срока, в то время как долговечность связана с вероятным сроком существования в запроектированных условиях [31]. Что касается единиц измерения, то долговечность материала может определяться как мера сопротивления материала износу и физико-химическим изменениям в определенных условиях использования и хранения [31]. Это позволяет обосновать методы испытаний на долговечность, приняв в качестве критерия стойкость к воздействиям, характерным для условий эксплуатации материала или конструкции из него [31]. Стойкость может определяться как фактическая, так и относительная по сравнению с материалом известной стойкости. Однако в первом случае испытания могут оказаться слишком длительными, а их ускорение за счет изменения вида или условий воздействия агрессивной среды может внести изменения в механизм коррозионных процессов.

Е. Хонигманн [109] при испытании по ускоренной методике отрезков центрифугированных опор линии электропередачи с искусственно

образованными поперечными трещинами выявил, что в трещинах раскрытием менее 0,3 мм не наблюдалось опасного развития коррозии арматуры, и безопасным с этой точки зрения является кратковременное раскрытие трещин до 0,5 мм. М.Ф.Козюк [69], основываясь на результатах натуральных климатических испытаний железобетонных центрифугированных стоек опор ЛЭП на Широковской ГЭС (Пермская область), делает вывод, что слой бетона в несколько миллиметров хорошо защищает арматуру от коррозии.

Большие исследования коррозионной стойкости центрифугированного бетона применительно к напорным трубам выполнены И.Н.Ахвердовым [3]. Для повышения физико-механических свойств бетона и водо-нефтепроницаемости труб рекомендовано послойное центрифугирование, что приводит к выравниванию структуры и текстуры бетона по толщине стенки изделия. Экспериментальные данные свидетельствуют, что при четырехслойном формовании центробежным способом бетон становится практически непроницаемым.

Крупномасштабные натурные испытания центрифугированных железобетонных опор контактной сети и свай-оболочек были проведены под руководством С.В.Шестоперова [103] и Ф.М.Иванова [41, 83] на климатической станции ЦНИИС в приливно-отливной зоне Баренцева моря. В работе [103] отмечается после 100 циклов замораживания и оттаивания появление сетки продольных волосных трещин на наружной поверхности всех опор, а также шелушение растворной части бетона с внутренней поверхности.

Для повышения морозостойкости бетона железобетонных свай-оболочек, изготовленных методом центрифугирования, были проведены исследования влияния воздухововлекающих (СНВ) и комплексных добавок (ССБ + СНВ) [83, 99]. Состояние бетона в оболочках оценивалось по внешнему виду и по времени прохождения ультразвука. В оболочках без добавок первые признаки разрушения появились через 175 циклов. Наибольшую морозостойкость показали оболочки, изготовленные из бетона с воздухововлекающей добавкой СНВ, которые выдержали 2300 циклов. Результаты опытов свидетельствуют, что даже незначительное содержание воздуха в исходной бетонной смеси (3%), полученное при введении в бетон комплексной добавки, увеличило его морозостойкость более чем в 5 раз. В работах [99, 48] получены противоречивые данные о сравнительной морозостойкости бетонов, отформованных центрифугированием и вибрированием.

Большой фактический материал собран при обследованиях эксплуатирующих центрифугированных железобетонных опор линий электропередачи,

контактной сети, проведенных институтами "Энергосетьпроект", "Орг-энергострой", ЦНИИС [52, 69, 83, 87] и др., а также свай-оболочек, выполненных ЦНИИС, Батгидроморстроем, МИСИ, Одесским институтом инженеров морского флота [2, 12, 15, 74, 100, 126] и др.

В частности, большой интерес представляют данные натурных обследований центрифугированных железобетонных стоек линии электропередачи, эксплуатирующихся в условиях сухого жаркого климата и сильноагрессивной окружающей среды в Западной Туркмении, проведенных Север-Западным отделением института "Энергосетьпроект" [52]. Климат района характеризуется резкой континентальностью и засушливостью. Абсолютные амплитуды колебания температуры воздуха достигают  $65^{\circ}\text{C}$ . суточные изменения - до  $30^{\circ}\text{C}$ . Абсолютный максимум температуры на поверхности почвы везде превышает  $70^{\circ}\text{C}$ . Грунты сильно засолены, вместе с тем здесь значительны запасы подземных вод, лежащих на небольших глубинах. Грунтовые воды минерализованы до рассолов. Общее количество опор с дефектами, требующие ремонта или замены, составляет 41%. Распределение трещин по высоте стоек неравномерное. Наибольшая плотность трещин наблюдается на отметках от 0,5 до 2,5-3 м от поверхности земли (подстилающей поверхности), ширина их раскрытия достигает 4 мм [52]. Выше отметки 3 м идут одиночные продольные трещины протяженностью до 5-12 м и раскрытием до 2 мм.

Однако в натуральных климатических испытаниях и обследованиях центрифугированных железобетонных конструкций ввиду сложных условий и отсутствия надежных приборов не определялись как правило прочностные и деформативные характеристики бетона в ходе испытания или эксплуатации конструкции. Выявлялись трещины, фиксировалось их расположение и ориентация на конструкции, замерялась ширина их раскрытия. Анализ возникающего при Ц30 напряженно-деформированного состояния центрифугированной конструкции, которое может вызвать образование и развитие трещин, не проводился.

В Днепропетровском и Вильнюсском инженерно-строительных институтах под руководством В.М. Баташева [48] и А.П. Кудзиса [75, 76, 86] были проведены испытания опытных образцов центрифугированного бетона на морозостойкость в лабораторных условиях. Испытания центрифугированных призм - высотой 400 мм и толщиной 70 мм, выпиленных из бетонных колец диаметром 308 мм, показали [48], что полное разрушение первых образцов произошло после 66 циклов, а последних - после 120 циклов. Был сделан вывод, что призмы не выдержали 100 циклов замораживания и оттаивания в соответствии с требованиями действовавшего в то время ГОСТ 10060-62.

Попеременному замораживанию и оттаиванию подвергались образцы кольцевого сечения диаметром 260 мм и высотой 260 мм, отформованные на трехлопиковой центрифуге, толщина стенки составляла 30...50 [76].

В исследованиях [86], проведенных также в ВИСИ, испытывались промаз, вылиненные из центрифугированных элементов кольцевого сечения диаметром 560 мм. Было выявлено, что химические добавки АЦФ-3М и Дофен не являются эффективным средством повышения морозостойкости центрифугированного бетона, а использование суперпластификатора С-3 способствует получению центрифугированного бетона, обладающего более высокой стойкостью при Ц30. Однако в немногочисленных лабораторных исследованиях выбор исходных материалов, режимов формования, условий последующей выдержки бетона, формы и размеров опытных образцов, методики низкотемпературных испытаний привел к результатам, которые трудно сопоставимы, а иногда и противоречат друг другу. Определение морозостойкости анизотропного центрифугированного бетона (по одному интегральному прочностному показателю) и отсутствие исследований кинетики морозной деструкции бетона с использованием неразрушающих методов, по всей вероятности, снижает достоверность полученных результатов. Так как не во всех исследованиях подвергаются испытаниям на морозостойкость опытные вибрированные образцы из исходной бетонной смеси это затрудняет выявление значимых факторов, связанных со спецификой технологии центрифугирования. Результаты испытаний, проведенных на моделях, сложно аппроксимировать на реальные конструкции.

Цель обзора: экспериментально-теоретическое исследование прочности, деформативности, трещиностойкости центрифугированных бетонных и железобетонных элементов кольцевого сечения, подвергаемых Ц30 в водонасыщенном состоянии, и разработка на основе полученных данных рекомендаций по повышению долговечности этих элементов.

### МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЮ И ПОВЫШЕНИЮ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Анализ многочисленных экспериментально-теоретических исследований подтверждает сложность и неоднозначность влияния низких температур на водонасыщенный железобетон. Физическая неоднородность бетона, а также бетона и стали, обусловили возникновение температурно-напряженного состояния, которое при определенных условиях способно интенсифицировать процесс снижения сопротивляемости материалов силовым воздействиям [24, 81].

Методологический подход к изучению и повышению морозостойкости железобетонных конструкций, разработанный Ф.М.Ивановым [41, 43], предполагает рассмотрение процессов, происходящих в железобетонной конструкции при ЦЗО, с учетом различий в процессах и действующих факторах на разных уровнях сложности структуры железобетона. Ввиду того, что основной структурный элемент бетона - цементный камень - является капиллярно-пористым телом с химически активной поверхностью, намечены четыре уровня сложности структуры железобетона: атомно-молекулярный, первичные кристалло-аморфные частицы, бетон и железобетонные конструкции. На первом уровне проявляются и изучаются соответствующими методами химические свойства материала, на втором - проявляются свойства, определяемые свойствами поверхности твердой фазы, на третьем - главные характеристики: это особенности поровой структуры и свойства от нее зависящие, например, проницаемость цементного камня и бетона. При переходе к четвертому уровню появляются новые влияющие параметры - степень массивности и форма конструкции, армирование и другие, которые также влияют на ее стойкость. При рассмотрении свойств железобетонной конструкции необходимо учитывать напряженное состояние бетона и арматуры, их взаимодействие, наличие температурных полей и полей напряжений и т. п.

Величина разрушающей силы при замораживании материала в водонасыщенном состоянии определяется объемом и структурой пор в материале (III уровень сложности), а сопротивляемость материала зависит от его прочности и деформативности (II и III уровни сложности). Сопоставляя эти параметры, можно оценить степень морозостойкости бетона [41, 43].

Исследования морозостойкости железобетонных конструкций (IV уровень сложности) показали, что на этом уровне способность сопротивляться действию переменных температур зависит от распределения напряжений и температурных полей, однородности бетона в конструкции, условий, возникающих в результате анизотропности бетона, а также разницы в свойствах бетона и стали, т. е. факторов, специфичных для IV уровня сложности структуры [41, 43].

Проблема обеспечения стойкости железобетонных конструкций при ЦЗО решается как технологическими мероприятиями (состав бетона, химические добавки, режим формования и др.), формирующими пористую структуру бетона, которая характеризуется высокой морозостойкостью при одновременно высокой прочности, так и мерами конструктивного характера (рациональная геометрия сечения, армирование и др.). При совместном действии эксплуатационных нагрузок, ЦЗО и периодического

увлажнения следует добиваться такого перераспределения усилий между бетоном и арматурой в железобетонной конструкции, которое способствовало бы сохранению ее несущей способности в течение проектного срока службы в суровых условиях [41, 43].

На морозостойкость центрифугированных конструкций кроме того оказывают влияние особенности, связанные со спецификой формирования. Для анализа возможных процессов, возникающих при контакте среды и материала сооружений необходимо знание характеристик окружающей среды, агрессивных по отношению к железобетону и свойств бетонов и арматуры различного вида и состава - их поведения в различных средах [31]. Основной тенденцией в современном развитии техники повышения долговечности железобетона в агрессивных внешних условиях приоритет отдается так называемым методам первичной защиты - повышению стойкости бетона и его защитных свойств по отношению к арматуре. Лишь для железобетона, предназначенного для эксплуатации в сильноагрессивных средах, разрабатываются методы изоляции поверхности сооружений от контакта с внешней средой методом защиты поверхности пленочными покрытиями, т.е. вторичной защиты.

#### ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЦЕНТРИФУГИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СТОЕК НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СУПЕРПЛАСТИФИКАТОРОВ И КОМПЛЕКСНЫХ МОДИФИКАТОРОВ

##### Общие сведения

Задача изменения структуры цементного камня и бетона с целью увеличения их прочности и стойкости при введении в бетонную смесь модификаторов, в том числе и суперпластификаторов, стала одной из ведущих в последних работах И.Н. Ахвердова, В.Г. Ватракова, Ф.М. Иванова, В.М. Москвина, Е.С. Силовой и др. [6, 32, 40, 84, 90].

Под модификаторами понимают вещества, улучшающие технологические свойства бетонных смесей и строительные-технические свойства бетонов, а под модифицированием - такое воздействие, при котором существенно изменяются структура и свойства материала путем введения в его состав определенных веществ при практически неизменном количестве основных составляющих.

При введении модификаторов в цементные системы, преследуются следующие основные цели:

- снижение вязкости цементно-водных суспензий для улучшения технологических свойств бетонной смеси;



- изменение структуры сформированного цементного камня и бетона с целью увеличения их прочности и стойкости к многократным физическим воздействиям;

- регулирование скорости процессов гидратации цементов и твердения бетонов.

Особый интерес в решении проблемы повышения стойкости центрифугированного бетона в условиях циклического замораживания и оттаивания представляет возможность применения высокоэффективных суперпластификаторов (СП).

Перспективы использования суперпластификатора изложены в работе Иванова Ф.М., Москвина В.И., Батракова В.Г. и др. [32]. Вопрос стойкости бетонов с СП нашел отражение в ряде работ. П.Ниссер [112], Р.Тевс [115], Р.Браун [106] отмечают значительное увеличение (особенно при снижении В/Ц газо-, водонепроницаемости бетонов, их морозостойкости и стойкости против солей - антиобледенителей.

По данным исследований, проведенных в НИИЖБ [40, 90], введение СП С-3 несколько повышает морозостойкость бетона против морозостойкости бетона без добавки. Увеличение морозостойкости бетона объясняется понижением В/Ц, уплотнением структуры - уменьшением капиллярной пористости пропорционально снижению количества воды затвердения. Кроме того, на повышение морозостойкости влияет (но в меньшей степени) увеличение объема замкнутых пор, связанное с воздухововлечением.

Снижение В/Ц при введении С-3 в состав бетонной смеси позволяет сократить водоотделение и седиментационные процессы, уплотнить капиллярно-пористую структуру цементного камня и повысить водонепроницаемость и стойкость бетона.

Применительно к центрифугированному бетону, в ЦНИИС [99] проведены исследования, показавшие эффективность применения воздухововлекающей добавки для повышения морозостойкости бетона И.Н. Ахверцов [6] указывал на целесообразность модифицирования бетонной смеси суперпластификаторами для формирования центрифугированных конструкций высокой прочности и долговечности. В процессе опытов на вылитых из колец призмах секториального сечения, проведенных в Вильнюсском инженерно-строительном институте [86], была выявлена более высокая морозостойкость центрифугированного бетона с добавкой С-3. В Советском Союзе имеется опыт эффективного использования суперпластификаторов С-3 и Дофен при производстве центрифугированных напорных труб, опор контактной сети и линий электропередачи на Московском, Рязанском и Стрыйском заводах ЖБК для повышения прочности

и трещиностойкости конструкций [84]. Данные зарубежных исследователей свидетельствуют о целесообразности применения бетонов с суперпластификаторами при двухстадийной тепловлажностной обработке: сначала при обычных режимах, затем в автоклаве [84]. Такой принцип был заложен при изготовлении центрифугированных свай (бетон М1600) длиной 12 м и диаметром основания 50 см [84]. Осадка конуса бетонной смеси составляла 5 см. Толщина стенок свай была снижена до 5 см против 12 см для свай из бетона М 400 без добавок. Проведенные испытания показали, что несущая способность свай с суперпластификатором уменьшенной материалоемкости на 10 % выше, чем обычных свай.

Для повышения стойкости при Ц30 бетона центробежного формирования целесообразно использовать СП в качестве пластификатора, снижающего водопотребность смеси и изменяющего поровую структуру центрифугированного бетона. Комплексные исследования такого бетона, отформованного центрифугированием, не проводились.

В настоящее время достаточно часто применяются комплексы, состоящие из суперпластификатора и воздухововлекающего компонента, для снижения расслаиваемости и повышения морозостойкости бетона [45, 108, III, I16]. При выборе веществ, используемых в качестве составляющих комплекса рекомендуется руководствоваться некоторыми специальными требованиями, оценивать активность и совместность индивидуальных веществ, составляющих комплексную добавку, их технологическую чувствительность и чувствительность дозировки [45].

Применение совместно пластификатора и микропенообразователя ведет к некоторому снижению прочности бетона вследствие увеличения его общей пористости, однако эффект повышения морозостойкости центрифугированного бетона при использовании комплексного модификатора будет компенсировать подобное негативное явление.

#### МОДЕЛЬ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ, СОСТАВЫ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

При выборе модели для испытаний центрифугированного бетона на циклическое замораживание и оттаивание, проведенных авторами в Белорусском политехническом институте и в НИИЖБ, исходили из необходимости выполнения двух основных требований. Во-первых, опытные образцы должны отражать особенности бетона, отформованного центробежным способом. При уплотнении бетонной смеси происходит неравномерное распределение фракционного состава заполнителя

по толщине стенки изделий, и в процессе отжата шлама образуются радиально направленные фильтрационные каналы [3, 79]. Геометрия сечения (в большинстве случаев в практике строительства применяются центрифугированные железобетонные конструкции кольцевого сечения) скажется на величине температурных и влажностных градиентов при низкотемпературных испытаниях водонасыщенного бетона центробежного формирования и его напряженно-деформированном состоянии при ЦЗО. Во-вторых, для корректного определения призмной прочности центрифугированного бетона, по изменению которой будет оценена его морозостойкость, необходимо выполнить требования  $h/\delta \geq 4$  [89], где  $\delta$  - толщина стенки образца,  $h$  - его высота.

Исходя из этого, а также учитывая реальные размеры центрифугированных конструкций (диаметр 300...800 мм), толщина стенки 60...100 мм), были приняты следующие размеры опытных образцов: наружный диаметр  $D = 500$  мм, толщина стенки  $\delta = 60...85$  мм, высота  $h = 500$  мм.

Для приготовления бетонных смесей использовался портландцемент, кварцевый песок и гранитный щебень.

В качестве вяжущего использовался портландцемент марки 500 Волковскового завода, имеющий следующие характеристики (табл. I...3).

Таблица I

Химический состав цемента, %

$SiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	$CaO$	$MgO$	$SO_3$
22,5	5,34	4,68	60,85	1,38	2,00

Таблица 2

Минералогический состав цемента, %

$C_3S$	$C_2S$	$C_3A$	$C_4AF$	Добавки	
				трепел	гипс
55,6	20,7	5	15	8	1,9



Таблица 6

## Характеристики гранитного щебня

Карьер	Объемн. плотность зерен, кг/л	Объемн. масса, кг/л		Размер фракции, мм	Дробимость	Пустотность, %	Влажность, %	Содержание примесей, %	Марка
		в стандарт. сост.	в естеств. сост.						
Микашевичи	2,62	1,36	1,34	5-20	8	47,9	I	I	М1400

Таблица 7

## Гранулометрический состав щебня, %

	Остатки на сите					Содержание пылевидных илистых гли, част., %	Содержание пластинчатых и игловатых зерен, %
	20 мм	15 мм	10 мм	5 мм	2,5 мм		
Частные остатки	9,0	46,8	27,0	15,0	2,2	I	22

Для бетона были использованы добавки: суперпластификатор С-3 (ТУ-6-14.625-80 Минхимпрома), который представляет собой синтетический продукт на основе сульфированной нафталинформальдегидной смолы и вводился в воду затворения в виде водного раствора концентрации 34,3 %.

Пластификатор адипиновый, микропенообразователь ПАЦ-1 (ТУ-6-03-26-77 Минхимпрома) добавлялся в воду затворения в виде водного раствора 38,1 %-ной концентрации.

Корректировка состава бетонов с комплексными добавками производилась на основании установленного оптимального количества добавок. С этой целью изготавливались пробные замесы, определялись подвижность бетонной смеси, прочностные показатели бетона, его морозостойкость.

Составы бетонных смесей (на сухих заполнителях) приведены в табл. 8.

Составы бетонных смесей

Серия образцов	Вид добавки	Количество добавки, % от массы цемента	Расход материалов, (кг/м <sup>3</sup> )					Осадка конуса, см
			Ц	П	Щ	В	В/Ц	
КЦ-1	-	-	520	620	II00	I95	0,375	2-4
КЦ-3	С-3	0,7	544	649	II52	I55	0,285	2-4
КЦ-4	С-3 + ПАЦ-1	0,7 + 0,3	548	654	II60	I50	0,274	2-4

Различие в 5 % в расходе цемента обусловлено сохранением расхода всех материалов при сокращении расхода воды.

Формование опытных центрифугированных образцов производилось на центрифуге Минского ЗЖБИ № 1 с использованием металлической формы внутренним диаметром 500 мм.

Для формования опытных образцов высотой 500 мм применялись специальные металлические перегородки.

После окончания центрифугирования форма подавалась на пост термообработки. Пропаривание осуществлялось пуском пара во внутреннюю полость по режиму:

выдерживание свежестформованного изделия при температуре 30 °С - 3 ч;

подъем температуры до 40...50 °С - 2 ч;

изотермический прогрев при температуре 50 °С - 2 ч;

подъем температуры до 80...85 °С - 2 ч;

изотермический прогрев при температуре 80...85 °С - 5 ч;

остывание.

Для контроля прочности бетона из исходной бетонной смеси формовались вибрированные кубы размером ребра 10 см. Вибрированные кубы с размером ребра 7 см и 10 см в количестве соответственно 27 шт. и 15 шт. из бетонных смесей всех серий были изготовлены для определения морозостойкости бетона. Они уплотнялись на вибростоле в соответствии с ГОСТ 10180-75. Термовлажностная обработка вибрированных образцов производилась совместно с центрифугированными.

В соответствии с целью и задачами исследований определен следующий объем экспериментальных исследований (табл. 9, 10).

Таблица 9

План испытаний центрифугированных образцов  
кольцевого сечения

Серия образцов	Отличительный признак образцов	Количество образцов, шт.		
		подвергну- тых ЦЗО	контрольных	всего
КЦ-I-I	бетон без добавок	6	3	9
КЦ I-2	"-	6	3	9
КЦ I-4	"-	6	3	9
КЦ 3	с добавкой СП С-3 (0,7 % массы цемента)	6	3	9
КЦ 4	с добавкой С-3 + ПАЦ-I (0,7 % + 0,3 % массы цемента)	6	3	9

Таблица 10

План испытаний вибрированных бетонных кубов

№ серии и вид образцов	Количество образцов, шт.		
	подверг. ЦЗО	контрольных	всего
К I-I кубы $\frac{7 \times 7 \times 7 \text{ см}}{10 \times 10 \times 10 \text{ см}}$	<u>21</u>	<u>6</u>	<u>27</u>
	12	6	18
К I-2            "-"	<u>21</u>	<u>6</u>	<u>27</u>
	12	6	18
К I-4            "-"	<u>21</u>	<u>6</u>	<u>27</u>
	12	6	18
К-3 кубы $\frac{7 \times 7 \times 7 \text{ см}}{10 \times 10 \times 10 \text{ см}}$	<u>21</u>	<u>6</u>	<u>27</u>
	12	6	18
К-4            "-"	<u>21</u>	<u>6</u>	<u>27</u>
	12	6	18
К-2            "-"	<u>21</u>	<u>6</u>	<u>27</u>
	12	6	18
К-5            "-"	<u>21</u>	<u>6</u>	<u>27</u>
	12	6	18
Итого:			<u>189</u>
			126 15

## МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ ЦЕНТРИФУГИРОВАННОГО БЕТОНА НА СТОЙКОСТЬ ПРИ ЦЗО

При выборе методики испытаний центрифугированных образцов на морозостойкость исходили из двух основных предпосылок.

Во-первых, необходимо было смоделировать преобладающий фактор разрушения, действующий на конструкцию, применительно к реальным условиям ее эксплуатации в природных условиях.

Во-вторых, испытания, учитывающие все существенные условия работы конструкции в суровых климатических условиях, должно быть ускоренными для получения результатов в кратчайшие сроки и выработки на их основе рекомендаций, пригодных для практического использования. Для решения первой задачи моделировались условия эксплуатации надземной части центрифугированных стоек линий электропередачи, технологических эстакад, свай-оболочек в зоне контакта этих конструкций с грунтом деятельного слоя вечной мерзлоты в Якутском регионе, для которого характерны экстремальные климатические и специфические грунтово-геологические условия.

По данным О.И. Матвеевой [68] здесь количество переходов температуры через  $0^{\circ}\text{C}$  в воздухе и на поверхности грунта соответственно составляет 56,7 и 81 переходов в год, а через  $-50^{\circ}\text{C}$  - 3,8 и 11,8 переходов.

В перерасчете по методике И.З. Актуганова [50, 51] это соответствует 107 эквивалентным циклам по стандартной методике испытаний [19]. Помимо того, что суточные колебания температуры воздуха передаются в грунт на глубину 40...60 см, в этом поверхностном слое наблюдается ощутимая миграция солей в грунтах и грунтовых водах и доминирующим видом засоленности является хлоридно-сульфатно-натриевый.

Испытания на циклическое замораживание и оттаивание производились в термокамере СТБВК-8000. Центрифугированные образцы перед низкотемпературными испытаниями в течение 96 ч насыщались 5 % раствором хлористого натрия. Замораживание производилось в течение 6 ч до достижения в середине стенки образца температуры  $-50^{\circ}\text{C}$ , после чего образцы выдерживали в камере при отрицательной температуре в течение 15 ч. Оттаивание образцов происходило в течение 1,5 ч в 5 % растворе  $\text{NaCl}$  до температуры  $+15^{\circ}\text{C}$  и 1,5 ч на воздухе при комнатной температуре. Для определения температуры в бетоне на различных этапах климатических испытаний по толщине стенки были установлены 5 хромель-копелевых термопар. Запись показаний осуществлялась автоматическим потенциометром КСП-4.



Ускоренное разрушение бетона при совместном действии мороза и раствора хлористого натрия первоначально невысокой 5 % концентрации достигалось усилением химического действия хлористого натрия на контакты цементного камня и в микрокапиллярах структуры и в результате физических явлений, возникающих при оттаивании солевого раствора с учетом того, что замораживание проводилось с охлаждением до температуры - 50 °С, то есть ниже эвтектической точки [41, 42]. Длительная выдержка образцов при отрицательной температуре в камере была предусмотрена с целью не допустить самозалечивания центрифугированного бетона при долгом оттаивании на воздухе или в растворе соли, и, тем самым, дополнительно ускорить испытания. [44]

Такой режим испытаний позволял производить один цикл в течение суток.

Для определения степени ускорения испытаний и влияния масштабного фактора проводились испытания на морозостойкость вибрированных кубов 100x100x100 мм по первому методу ГОСТ 10060-87, и вибрированных кубов размером 70x70x70 мм по ускоренной методике.

Для оценки деструкции центрифугированного бетона в ходе ЦЗО применялся неразрушающий ультразвуковой импульсный метод. Испытания производились ультразвуковым прибором "Бетон-12" опытного завода ВНИИЖБ методом сквозного прозвучивания центрифугированных образцов после их оттаивания и установления постоянной температуры +15 °С в середине стенки образца. Для получения надежных результатов прозвучивание производилось в 9...12 точках.

Уменьшение скорости ультразвука указывает на разрушение первоначальной структуры бетона, происходящее в результате возникновения и развития микротрещин под влиянием циклического замораживания и оттаивания.

Для определения морозостойкости по накоплению остаточных деформаций в стенку элемента замоналичивались репера. Показания фиксировались переносной мессурой на базе 300 мм с ценой деления 0,01 мм после каждого цикла.

В среднем через пять циклов образцы каждой серии испытывались на осевое сжатие до разрушения по методике, описанной в работах [59...61].

#### ИЗМЕНЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ И ДЕФОРМАТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЫЧНОГО И МОДИФИЦИРОВАННОГО ЦЕНТРИФУГИРОВАННОГО БЕТОНА ПРИ ЦЗО

Специфика проектирования железобетонных конструкций, эксплуатируемых в условиях водонасыщения и циклического замораживания и

оттаивания, состоит в двух взаимосвязанных подходах: технологическом и расчетно-конструктивном [81]. Целью первого является формирование структуры и текстуры бетона, стойких к воздействию многократного замораживания и оттаивания в увлажненном состоянии. Второй сводится к учету в расчетах дополнительных ограничений на показатели сопротивляемости бетона ( $R_g$ ,  $R_{g\delta}$ ,  $E_g$ ), на параметры, определяющие условия работы арматуры в бетоне и др.

Длительная стойкость центрифугированного бетона в конструкциях зависит от изменения его прочностных и деформативных характеристик при многократном замораживании и оттаивании в увлажненном состоянии.

Исследования проведены на составах бетона, отличающихся структурой за счет введения химических добавок - суперпластификатора - разжижителя С-3 и комплексной добавки С-3 и воздухововлекающей добавки ПАЦ-1. Составы бетонов приведены в табл. 8. Основное различие между составами бетона характеризуется водоцементными отношениями и прочностью, а именно: состав КЦ1 без добавок В/Ц=0,375,  $R_g$ =47,8 МПа, КЦ3 с добавкой С-3 (0,7% от массы цемента) В/Ц=0,285;  $R_g$ =56,2 МПа и КЦ4 с добавкой С-3+ПАЦ-1 (0,7 + 0,3 % от массы цемента) В/Ц=0,274;  $R_g$ =41,0 МПа. Понижение прочности состава КЦ4 при самом низком В/Ц обусловлено увеличением воздухововлечения, которое было необходимо для придания повышенной морозостойкости.

В табл. II приведены значения призмной прочности  $R_{g(n)}$  и модуля упругости  $E_{g(n)}$  центрифугированного бетона, подвергнутого циклическому замораживанию и оттаиванию. Все характеристики прочности и деформативности определены на образцах в оттаянном состоянии. Предел исчерпания морозостойкости определялся по снижению призмной прочности центрифугированного бетонного элемента кольцевого сечения на 15 %.

Из экспериментальных данных об изменении  $R_g$  и  $E_g$  следует, что морозостойкость центрифугированного бетона без добавок (серия КЦ1) была значительно ниже морозостойкости бетона, отформованного центрифугированием из равноподвижных смесей с добавкой С-3 и комплексной добавкой С-3 + ПАЦ-1 (серии КЦ3 и КЦ4).

У образцов серии КЦ1 снижение призмной прочности  $R_g$  через 5 циклов замораживания и оттаивания составило 27,9 %, а модуля упругости  $E_g$  - 28,9 - 38,9 %, в то время как аналогичные характеристики центрифугированного бетона серии КЦ3 после 30 циклов уменьшились соответственно на 18,0 % и 41 %.

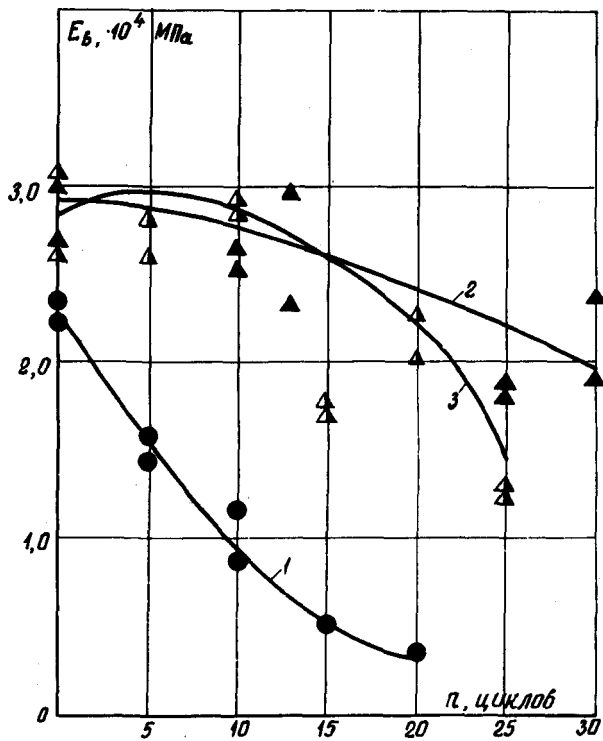
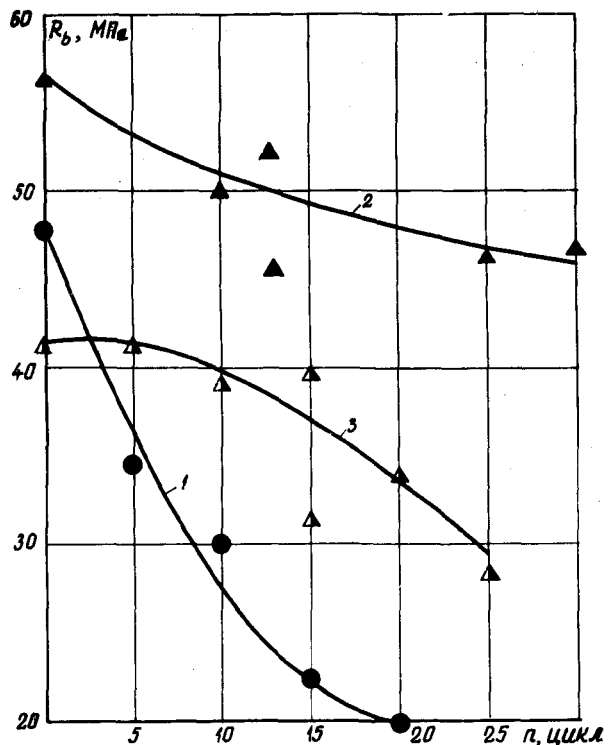


Рис. 1а и б. Изменение призмной прочности  $R_b$  (а) и модуля упругости (б) центрифугированных образцов при Ц30 I-серия КЦ1; 2-КЦ3; 3-КЦ4

Центрифугированный бетон с комплексной добавкой, подвергнутый 20 циклам замораживания и оттаивания, показал снижение призмочной прочности  $R_B$  на 24 %, модуля упругости  $E_B$  - на 45 %.

Таким образом, предел истощения морозостойкости центрифугированного бетона серий КЦ1, КЦ3, КЦ4 наступал соответственно до 5, 30 и 20 циклов замораживания и оттаивания по ускоренной методике.

Графики зависимостей  $R_B$ - $n$  и  $E_B$ - $n$  представлены на рис. 1а и б.

Таблица II

Призмочная (кольцевая) прочность  $R_B$  и модуль упругости центрифугированных бетонных образцов, подвергнутых циклическому замораживанию и оттаиванию

Серия опытных образцов	Кол-во циклов замораживания и оттаивания $n$ , циклов	Весовая влажность $W$ , %	Призмочная прочность, $R_B$ МПа	Модуль упругости $E_B \times 10^{-4}$ , МПа	Относительная прочность через $n$ циклов $\frac{R_B(n)}{R_B(0)}$	Относительный модуль упругости через $n$ циклов $\frac{E_B(n)}{E_B(0)}$
КЦ1	0	4,15	47,78	2,21	I	I
	5	4,28	34,47	1,57	0,72	0,71
	10	4,38	29,95	1,16	0,63	0,52
	15	4,57	22,33	0,51	0,47	0,23
	20	4,79	19,84	0,35	0,42	0,16
КЦ3	0	1,87	56,23	3,02	I	I
	10	2,44	49,78	2,63	0,89	0,98
	13	2,76	46,41	2,95	0,81	0,87
	25	3,21	46,46	2,36	0,83	0,78
	30	3,36	45,96	1,79	0,82	0,59
КЦ4	0	2,97	41,05	3,08	I	I
	5	3,2	41,09	2,80	1,00	0,91
	10	3,2	39,09	2,90	0,95	0,94
	15	3,21	33,67	2,27	0,82	0,74
	20	3,64	31,16	1,70	0,76	0,55
	25	3,73	28,22	1,23	0,69	0,40

Примечания: I.  $R_{B(0)}$ ,  $E_{B(0)}$  - средние призмочная прочность и модуль упругости контрольных образцов.

2.  $R_B(n)$ ,  $E_B(n)$  - то же образцов, подвергнутых циклам замораживания и оттаивания.

Зависимости  $R_B$  и  $E_B$  в пределах исчерпания морозостойкости бетона аппроксимируются следующими выражениями:

Серия КЦ1

$$R_B(n) = R_B(0) \cdot (1 - 0,2 \cdot \varphi_n + 0,03 \cdot \varphi_n^2) \quad (1)$$

$$E_B(n) = E_B(0) \cdot (1 - 0,2 \cdot \varphi_n + 0,125 \cdot \varphi_n^2)$$

Серия КЦ3

$$R_B(n) = R_B(0) \cdot (1 - 0,2 \cdot \varphi_n + 0,007 \cdot \varphi_n^2) \quad (2)$$

$$E_B(n) = E_B(0) \cdot (1 - 0,2 \cdot \varphi_n - 0,1753 \cdot \varphi_n^2)$$

Серия КЦ4

$$R_B(n) = R_B(0) \cdot (1 - 0,2 \cdot \varphi_n + 0,077 \cdot \varphi_n^2) \quad (3)$$

$$E_B(n) = E_B(0) \cdot (1 - 0,2 \cdot \varphi_n - 0,0155 \cdot \varphi_n^2),$$

где

$$\varphi_n = \frac{n}{n_1}$$

$n$  - количество циклов замораживания и оттаивания, которому соответствуют характеристики  $R_B(n)$  и  $E_B(n)$ ;

$n_1$  - количество Ц30, соответствующее моменту исчерпания морозостойкости.

Обработка экспериментальных данных была произведена методом наименьших квадратов по критерию наименьшей максимальной относительной погрешности на ЭВМ с использованием программы "Romul".

Для приведения результатов испытаний центрифугированных образцов кольцевого сечения по ускоренной методике к стандартной марке по морозостойкости в соответствии с планом исследований были испытаны 10 серий вибрированных образцов в количестве 315 шт. идентичных по исходному составу бетонной смеси образцам, отформованных центрифугированием.

Пять серий опытных образцов размерами 100x100x100 мм были испытаны по основному методу ГОСТ 10060-76 и пять серий бетонных образцов того же состава размерами 70x70x70 мм - по ускоренной методике, полностью соответствующей методике испытания центрифугированных образцов кольцевого сечения. Выбор размеров образцов 70x70x70 мм был обусловлен тем, что в среднем толщина стенки кольца составляла 70 мм. Данные по морозной деструкции 6 серий образцов (3 серии размерами 100x100x100 мм и 3 серии - 70x70x70 мм) одинакового состава с центрифугированными образцами серий КЦ1, КЦ3, КЦ4, представляющий интерес для последующего анализа, приведены в табл. 12 и 13.

Таблица 12

Прочность на сжатие  $R$  образцов 100x100x100 мм,  
испытанных по первому методу ГОСТ 10060-87

Серия образцов	Число циклов замораживания и оттаивания $n$ , циклов	Прочность на сжатие $R$ , МПа	Средне-квадратическое отклонение $\sigma$ , МПа	Коэффициент вариации $C_v$ , %	Относительная прочность $R(n)/R(0)$
К-1	0	50,1	1,2	2,4	1,0
	100	36,1	1,6	4,4	0,72
	200	31,6	3,3	10,4	0,63
К-3	0	58,1	1,7	3,0	1,0
	100	65,1	1,3	2,0	1,12
	200	60,3	3,8	6,3	1,04
	400	45,9	4,4	11,9	0,79
К-4	0	56,8	2,3	4,0	1,0
	100	66,5	6,6	9,9	1,17
	200	69,9	1,9	2,7	1,23
	400	68,6	8,3	12,0	1,21
	600	75,5	4,3	5,7	1,33

Таблица 13

Прочность на сжатие  $R$  образцов 70x70x70 мм,  
испытанных по ускоренной методике

Серия образцов	Число циклов замораживания и оттаивания $n$ , циклов	Прочность на сжатие, $R$ МПа	Средне-квадратическое отклонение $\sigma$ , МПа	Коэффициент вариации $C_v$ , %	Относительная прочность $R(n)/R(0)$
1	2	3	4	5	6
К1	0	54,6	1,9	3,5	1,0
	4	42,6	1,0	2,4	0,78

I	2	3	4	5	6
КЗ	5	38,4	0,6	1,6	0,70
	10	32,3	1,7	5,1	0,59
	20	29,7	1,3	4,4	0,54
	0	68,1	2	3	1,0
	5	62,8	0,6	1,0	0,92
	10	56,2	1,8	3,3	0,83
	13	55,4	0	0	0,81
К4	25	45,8	0,16	0,4	0,67
	30	44,5	1,1	3,1	0,65
	0	66,7	0,8	1,2	1,0
	5	59,4	0,1	0,2	0,89
	10	58,7	0,2	0,4	0,88
	15	54,7	0,9	1,6	0,82
	20	50,7	0,8	1,6	0,76
23	50,0	2,7	5,4	0,75	

Сопоставление результатов испытаний по обеим методикам приводит к выводу, что применяемая методика исследования морозостойкости центрифугированного бетона, состоящая в замораживании насыщенных в 5 % растворе NaCl образцов до  $t = -50^{\circ}\text{C}$  с последующим оттаиванием их в растворе до  $t = +20^{\circ}\text{C}$ , обеспечивает ускорение испытаний не менее чем в 20 раз.

Исходя из этого морозостойкость центрифугированного бетона для добавок может быть оценена маркой F100, тогда как морозостойкость центрифугированного бетона с добавкой суперпластификатора С-3 и комплексной добавкой С-3 + ПАЩ-I соответствует маркам F600 и F400.

Марка по морозостойкости образцов серий К1, К3, К4 отформованных вибрированием из тех бетонных смесей, что и центрифугированные образцы серий КЦ1, КЦ3, КЦ4, была соответственно F100, F300 и F600. Это свидетельствует о существенных особенностях структуры бетона центробежного формирования с добавками.

Центрифугированные бетоны с добавкой суперпластификатора С-3 и комплексным содификатором С-3 + ПАЩ-I, имеющие начальное водоцементное отношение на 25 % ниже по сравнению с бетоном без добавок,

показали стойкость при насыщении 5 % раствором NaCl и циклическом замораживании до  $t = -50$  °C и оттаивании до  $t = +20$  °C в 4...5 раза более высокую, чем центрифугированный бетон без добавок. Если к тому же учесть, что образцы серии КЦЗ имея начальную призмную прочность  $R_g$  на 17,7 % выше прочности бетона без добавок, а после 30 циклов замораживания и оттаивания характеризовались  $R_g$  не менее начальной прочности образцов серий КЦ1 и КЦ4, то использование суперпластификатора С-3 при изготовлении центрифугированных железобетонных конструкций открывает возможность получения бетона высокой прочности и стойкости.

Кроме того, центрифугированный бетон имеет более высокую прочность по сравнению с вибрированным того же исходного состава, что характеризуется коэффициентом центрифугирования. Поэтому, при условии одинаковой морозостойкости вибрированного и центрифугированного бетонов, последний обладает большим ресурсом по долговечности за счет более высоких начальных физико-механических характеристик.

Рассмотрение зависимостей изменения прочностных деформативных характеристик центрифугированного бетона в процессе циклического замораживания и оттаивания свидетельствует о более существенном снижении модуля упругости  $E_B$  по сравнению с призмной прочностью.

Особенности изменения прочности и деформативности бетона после циклов замораживания и оттаивания определяются характеристиками поровой структуры центрифугированного бетона с добавками и без добавок.

### ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ МОДИФИЦИРОВАННОГО ЦЕНТРИФУГИРОВАННОГО БЕТОНА И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СУПЕРПЛАСТИФИКАТОРОВ

Для выявления механизма повышения морозостойкости бетона с добавками были изучены характеристики структуры порового пространства центрифугированного бетона в сравнении с вибрированным.

Структуру бетона оценивали на основе данных по кинетике водопоглощения, анализов микроструктуры на оптическом микроскопе для определения интегральной и дифференциальной пористости и на сканирующем электронном микроскопе для выявления особенностей микроструктуры.

Исследования проведены на образцах центрифугированного (в отдельных случаях и вибрированного бетона того же состава) бетона без добавок (серия КЦ1), с добавкой суперпластификатора С-3 в количестве



0,7 % от массы цемента (серия КЦ3), с комплексным модификатором С-3 + ПАЩ-I (0,7 % + 0,3 %) (серия КЦ4).

Ввиду анизотропии структуры и текстуры центрифугированного бетона по толщине стенки анализы на оптическом и сканирующем электронном микроскопах проводили по слоям бетона.

Результаты исследований представлены в табл. I4...I6.

Таблица I4

Параметры пористости бетонов, определенные по кинетике их водопоглощения

Вид образцов	Серия образцов	Водопоглощение по массе, %	Водопоглощение по объему, %	$\bar{\lambda}$	$\alpha$
Центрифугированный	КЦ1	5,66	12,73	2,0	0,9
	КЦ3	3,66	8,09	0,53	0,8
	КЦ4	4,65	9,8	1,14	0,9
Вибрированный	К1	5,21	12,26	1,32	0,9
	К3	4,18	9,67	0,66	0,9
	К4	4,37	10,44	0,5	0,9

Примечание.  $\bar{\lambda}$  и  $\alpha$  - показатели среднего размера и однородности размеров открытых капиллярных пор.

Показатель среднего размера пор  $\bar{\lambda}$  центрифугированного бетона серии КЦ3 с добавкой С-3 в 4 раза меньше по сравнению с бетоном серии КЦ1 без добавок. Это свидетельствует о снижении капиллярной пористости, характеристикой которой является  $\bar{\lambda}$ , и указывает на возможное повышение морозостойкости, которая в значительной степени определяется размерами и количеством капиллярных пор.

Результаты испытаний подтверждают повышенную морозостойкость с добавкой суперпластификатора. Марка по морозостойкости центрифугированного бетона серии КЦ3 составила F600, тогда как серии КЦ1 только F100. Основой этого эффекта является снижение В/Ц примерно на 25 % в бетонной смеси с добавкой С-3 при равной подвижности с бетонной смесью без добавки.

Для образцов серии К4 и КЦ4, отформованных вибрированием и центрифугированием,  $\bar{\lambda}$  составил соответственно 0,5 и 1,14. При этом морозостойкость вибрированных образцов из бетонной смеси, модифици-

рованной С-3 + ПАЩ-I соответствовала марке более F600, а центрифугированных - F400.

Вибрированные образцы серии К1 и К3 характеризовались марками по морозостойкости соответственно F100 и F300. Несколько меньшая морозостойкость центрифугированного бетона с комплексной добавкой определяется, очевидно, избыточным воздухововлечением.

Таблица 15

Характеристики структуры бетонов, полученные в исследованиях на оптическом микроскопе

Серия образ-ца	Пористость, %							
	П <sub>п</sub>	П <sub>д</sub> по размерам пор, мкм						
		до 20	20-50	50-100	100-200	200-500	250-500	500-1000
КЦ1	11,7	52	27	11	6,3	1,4	1,5	0,8
КЦ3	7,9	41	26	20	8	4	0,8	0,2
КЦ4	8,1	20	38	30	10	1,5	0,5	-

Примечание. П<sub>п</sub>, П<sub>д</sub> - соответственно полная и дифференциальная пористость центрифугированного бетона.

Характеристики пористости, измеренные оптическим методом (табл. 15), подтверждают сделанный ранее вывод об уменьшении капиллярной пористости в центрифугированном бетоне, модифицированном как суперпластификаторами, так и комплексной добавкой. Кроме того, эти исследования выявили различие в структуре контактной зоны на границе в заполнителе для образцов серии КЦ-I и серий КЦ3 и КЦ4. У образцов серии КЦ1 прилегание неплотное (зазоры до 200...500 мкм, цепочнообразные поры). Во всех случаях нарушение сцепления наблюдается по контакту, обращенному только к наружной поверхности центрифугированного элемента кольцевого сечения.

Контактная зона образцов КЦ3 и КЦ4 отличается плотным прилеганием растворной части к крупному и мелкому заполнителю.

Пути миграции влаги, представляющие собой в растворной части внутреннего слоя радиально направленные каналы, в наружном и среднем слоях огибают крупный и мелкий заполнитель. Неплотное сцепление по контакту с заполнителем и его ориентация к наружной поверхности, выявленные в исследованиях структуры, связаны с уплотнением под действием центробежной силы цементного теста и цементного раствора

в промежутках между зернами мелкого и крупного заполнителей, что приводит к отделению воды именно у их поверхностей, обращенных в наружную сторону.

В бетонных смесях с добавками снизилось начальное водосодержание за счет пластифицирующего эффекта, при этом (В/Ц)<sub>нач.</sub> приблизилось к Кн.г. Количество свободной жидкости в смесях с добавками значительно меньше и при центрифугировании фильтрационные каналы либо не образовались вообще, либо стали более тонкими. В этом причина плотной контактной зоны в образцах серий КЦЗ и КЦ4. Равномерное распределение заполнителя по толщине стенки (рис. 2а и б) указывает на изменение процессов уплотнения в бетоне с использованием суперпластификатора С-3 при формовании центрифугированием. В этом случае меньшую роль играет отжатие и движение свободной воды в уплотняемой смеси и большую - перемещение связанной массы цементного раствора.

Причина этого явления заключается в реологических свойствах бетонной смеси, когда при использовании водоредуцирующего эффекта суперпластификатора В/Ц бетонной смеси снижается на 25 %, что соответствует снижению количества воды на 1 м<sup>3</sup> смеси ~50 л. Водоцемент-

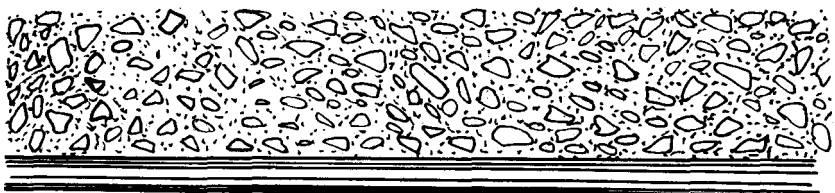
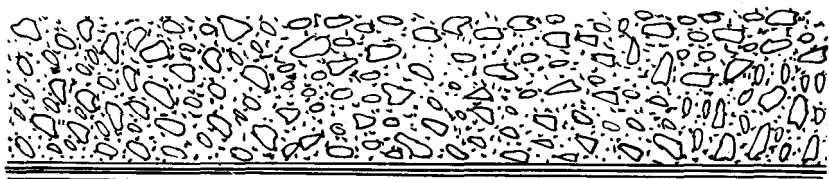


Рис. 2а и б. Распределение крупного заполнителя по толщине стенки в центрифугированных образцах серии КЦ (а) и КЦ4 (б)

ное отношение близко к значению  $K_{н.з.}$ . При этом повышается вязкость цементного теста, что исключает сепарацию в процессе центрифугирования и способствует получению более однородного бетона. Вероятно, этот эффект для центрифугированного бетона наблюдается в определенном рецептурно-технологическом диапазоне и требует дополнительных исследований.

Таблица 16

Характеристики структуры слоев бетона, полученных  
в исследованиях в оптическом микроскопе

Серия образцов	Наименование и размер зоны по толщине стенки, см	Пористость, %						
		$P_d$ по размерам пор, мкм						
		до 20	20-50	50-100	100-200	200-250	250-500	500-1000
КЦ1	Н (4,7)	52	23	II	7	2,3	3,3	I,4
	С (1,0)	44	33	14	7,6	1,4	-	-
	В (1,0)	66	27	7	-	-	-	-
КЦ3	Н (5,5)	47	22	19	7,4	3,4	I	0,2
	В (1,3)	21	37	27	II	4	-	-
КЦ4	Н (3,5)	20	39	38	II	1,5	0,5	-
	С (0,5)	19	31	42	0	1,5	0,5	-
	В (1,0)	39	36	22	3	-	-	-

Примечание. Н, С, В - соответственно наружный, средний и внутренний слой центрифугированного бетона по толщине стенки;

$P_d$  - дифференциальная пористость слоев центрифугированного бетона.

Более равномерное распределение крупного заполнителя по толщине стенки обуславливает выравнивание физико-механических свойств бетона наружного и внутреннего слоев (см. табл. 19). Центрифугированный бетон с добавкой С-3 показал прочность на 18 % и морозостойкость в пять раз выше по сравнению с бетоном без добавок, а исследования структуры подтверждают его непроницаемость.

Интересные результаты, характеризующие свойства наружного и внутреннего слоев, получены на основании снятия полностью равновесных диаграмм деформирования (табл. 19), которые четко показывают сближение параметров, характеризующих энергию разрушения для наружного и внутреннего слоев бетона.

Таким образом, введение эффективного суперпластификатора С-3 в количестве 0,4...1,0 % в бетонную смесь, укладываемую центрифугированием, повышает прочность и морозостойкость бетона и позволяет преодолеть типичный дефект центрифугированных конструкций в свойствах наружного и внутреннего слоев бетона. Проведенные комплексные исследования позволяют рекомендовать использование водоредуцирующего эффекта суперпластификаторов С-3, Дофен, IO-03, меламинформальдегидной анионоактивной смолы марки МФ-АР, разжижителя СМФ и других применяемых в СССР суперпластификаторов для придания центрифугированным железобетонным стойкам высокой долговечности. Широкому внедрению суперпластификаторов для этой цели на заводах стройиндустрии Минэнерго СССР должны предшествовать работы по определению рецептурно-технологического диапазона, когда их использование будет наиболее эффективным. При участии авторов институтом "Энергосетьпроект" разработаны Технические условия Минэнерго "Конструкции железобетонные электросетевые повышенной долговечности. Технология применения суперпластификаторов".

Воздухововлекающая добавка, введенная совместно с суперпластификатором не повысила дополнительно морозостойкость бетона. Необходимо дальнейшая проверка эффективности воздухововлечения в бетонные смеси, уплотняемые центрифугированием.

## МЕТОДЫ ЗАВОДСКОГО КОНТРОЛЯ ПРОЧНОСТИ, ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЦЕНТРИФУГИРОВАННОГО БЕТОНА

Методика равновесных механических испытаний с получением полных диаграмм состояния материала

Увеличение объемов выпуска железобетонных центрифугированных конструкций требует решения практических задач контроля прочности центрифугированного бетона, его трещиностойкости и долговечности.

Основные показатели оцениваются главным образом по прочности и морозостойкости контрольных вибрированных бетонных кубов с использованием переводных коэффициентов. Прочность бетона на заводах Минэнерго определяется испытанием кубов, изготавливаемых вибрированием из той же бетонной смеси, что и стойки, которая затем корректируется умножением на коэффициент К. Для заводов Минэнерго он равен  $K = 1,25$ .

Структура и свойства бетона в первую очередь зависят от метода уплотнения бетонной смеси, от которого зависят степень плотности и

однородности бетона по сечению и длине изделия, характер миграции воды и воздуха, характеристики пористости. Геометрические параметры изделия должны предопределять соответствующую форму и размеры контрольных образцов.

Механизм уплотнения компонентов бетонной смеси и формирование структуры бетона вибрированием принципиально отличается от центробежного метода. Поэтому свойства бетона вибрированных кубов по прочности, трещиностойкости и долговечности не могут соответствовать свойствам центрифугированного бетона. По этой причине метод контроля с использованием вибрированных кубов неприемлем для центрифугированного бетона.

Для определения прочности центрифугированного бетона следовало бы изготавливать контрольные образцы кольцевого сечения одновременно с изготовлением самого изделия и затем испытывать этот образец. Однако из-за недостаточной мощности прессов, имеющихся на заводах, довести до разрушения эти образцы не представляется возможным.

Поэтому были разработаны предложения об оценке на прочность бетона по кубам или призмам, выпиленным из изделия, либо изготавливаемым в специальных устройствах, которые крепятся в форме с изделием, что позволяет получать в процессе центрифугирования контрольные образцы со структурными и физико-механическими свойствами, близкими к свойствам бетона изделия. Эти контрольные бетонные кубы и призмы испытываются на сжатие по стандартной методике.

Недостатком этого метода является то, что эти испытания недооценивают прочность бетона в изделии, так как на прочность кубов и призм может оказывать влияние возникновение эксцентриситета приложения сжимающей силы из-за несовпадения физического центра тяжести образца и его геометрической оси, зависящих от различных физико-механических свойств бетона по толщине образца.

Поэтому необходима такая методика испытаний бетонных центрифугированных образцов, которая позволила бы комплексно, многопараметрично и инвариантно оценить основные показатели бетона на всех этапах деформирования и разрушения.

Этим требованиям удовлетворяет методика равновесных механических испытаний с получением полных диаграмм состояния материала. Главным здесь является то, что рассчитываемые параметры состояния материала инварианты к конфигурации и размерам опытного образца [26, 28, 35, 82, 85, 101, 102, 107, 110, 113, 114].

В качестве опытных образцов для данных испытаний приняты призмы секториального сечения, выпиленные из элементов кольцевого

сечения, которые наиболее адекватно отражают свойства неоднородного центрифугированного бетона.

Методология разработана рядом ведущих научных организаций (НИИЖБ, ВЗПИ, Оргэнергострой, ВолГИСИ и др.) и включает специально унифицированное несложное в изготовлении и эксплуатации оборудование [26...28, 101, 102, 113].

Испытания могут проводиться при изгибе, центральном сжатии, растяжении и кручении. Главной конструктивной особенностью устройства является упругий элемент - стальное кольцо, которое вместе с испытуемой балкой образует статически неопределимую систему, обладающую свойством распределять усилия между различными ее элементами прямо пропорционально их жесткости. При этом в процессе разрушения происходит такое перераспределение усилий, при котором образец с трещиной оказывается в новом равновесном состоянии. Это исключает спонтанное развитие трещины и обеспечивает возможность получения нисходящей ветви диаграммы деформирования.

В проведенных авторами исследованиях в Белорусском политехническом институте и в НИИЖБ Госстроя СССР испытаниям на изгиб по трехточечной схеме подвергались опытные образцы - призмы секториального сечения с иницирующим надрезом, выпиленные из фрагментов центрифугированных стоек кольцевого сечения серий КЦ1 и КЦ3, длиной 400 мм.

При формировании бетона центробежным способом происходит неравномерное распределение фракционного состава заполнителя по толщине стенки изделия (рис. 2), а в процессе отжатия шлама при уплотнении бетонной смеси образуются радиально направленные фильтрационные каналы. Поэтому при определении послойных свойств центрифугированного бетона и их изменения при циклическом замораживании и оттаивании, были приняты две схемы испытаний: с наружным<sup>х)</sup> слоем в растянутой зоне и с внутренним слоем в растянутой зоне (рис. 3). Иницирующим надрезом в растянутой зоне образца выключали из работы тот или иной слой и исследовали нужный.

В связи со спецификой сыпных образцов были изготовлены металлические накладки на выпуклую и вогнутую поверхности призмы, которые

х) Наружным слоем призмы, выпиленной из центрифугированного фрагмента кольцевого сечения, считается наружный слой кольца, т.е. слой, находящийся на наибольшем расстоянии по радиусу от геометрического центра кольцевого сечения. Соответственно, внутренний - на наименьшем расстоянии.

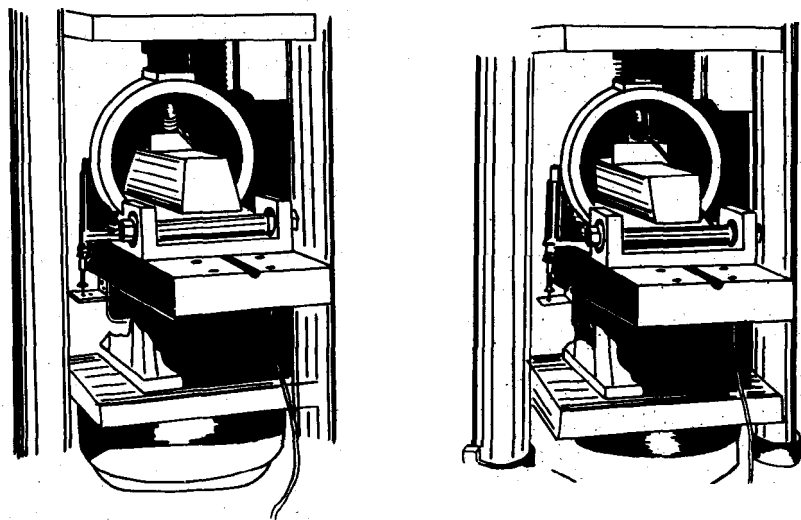


Рис.3а и б. Определение послойных свойств центрифугированного бетона:

а) иницирующий надрез в наружном слое; б) во внутреннем слое

наклеивались на краях призм на специальном компаунде для качественного контакта с шарнирными опорами устройства и недопущения обмятия бетона (рис. 3). Для равномерной передачи нагрузки штоком на выпуклую или вогнутую поверхность образца были использованы специальные передаточные балочки (рис. 3).

Величина иницирующего надреза была  $0,4 h$ .

Опытные образцы-призмы были выпилены из элементов кольцевого сечения, отформованных из бетонных смесей следующего состава (табл. I7).



Таблица 17

## Составы бетонных смесей

Серия образцов	Добавка	Кол-во добавки % от массы ц	Расход материалов кг/м <sup>3</sup> О.К.					см
			Ц	П	Щ	В	В/Ц	
КЦ1	-	-	520	620	1100	195	0,375	2-4
КЦ3	С-3	0,7	544	649	1152	155	0,285	2-4

Программой эксперимента для определения послойных свойств центрифугированного бетона и их изменения при циклическом замораживании и оттаивании было предусмотрено испытание 54 опытных образцов (табл. 18).

Таблица 18

План испытаний центрифугированных призм секториального сечения при трехточечном изгибе с получением полностью равновесных диаграмм деформирования

Серия образцов	Особенности серии	Испытуемый слой	Тип образцов, к-во	
			контрольных, шт.	подвергн. Ц30, шт.
КЦ1	Состав без добавок В/Ц = 0,375	Наружный	9	9
		Внутренний	9	9
КЦ3	Состав с СП С-3 (0,7 %) В/Ц = 0,285	Наружный	9	-
		Внутренний	9	-

Осредненные полностью равновесные диаграммы деформирования представлены на рис. 4а, б, в, а рассчитанные по ним силовые и энергетические параметры приведены в табл. 19.

Анализ послойных физико-механических характеристик центрифугированного бетона контрольных образцов серии КЦ1 показал, что для бетона центробежного формирования характерна неоднородность свойств по толщине стенки. Выявлено снижение прочностных и деформативных характеристик центрифугированного бетона при Ц30.

Интересны результаты испытаний по определению послойных физико-механических характеристик центрифугированного бетона, модифицированного суперпластификатором С-3 (серия КЦ3). Зафиксировано выравнивание в свойствах наружного и внутреннего слоев.

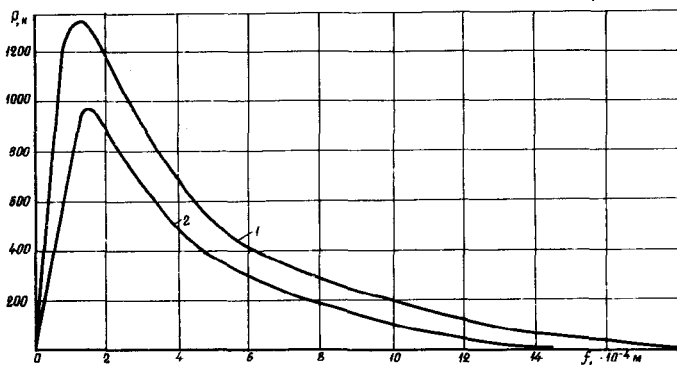
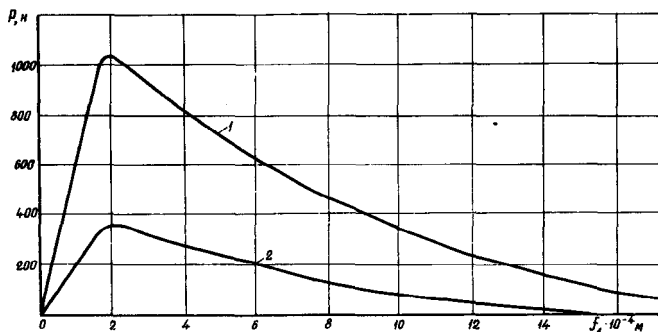
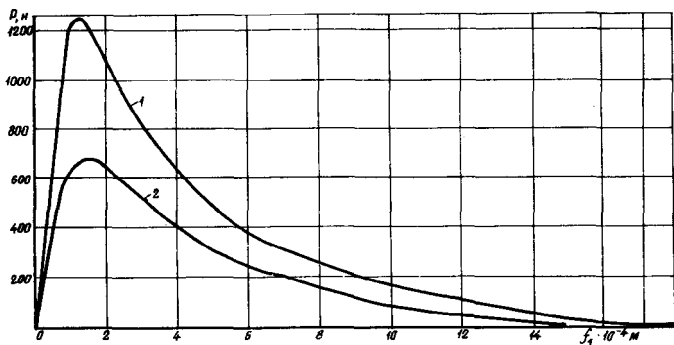


Рис. 4а, б, в. Полностью равновесные диаграммы деформирования бетона серии КЦ1 (а); серии КЦ1, подвергнутого Ц30 (б); серии КЦ3 (в):

1 - при инициирующем надрезе во внутреннем слое призмы;  
 2 - при инициирующем надрезе в наружном слое призмы

Таблица 19

Силловые и энергетические характеристики центрифугированного бетона

Серия образ-ца	Слой образ-ца	$W_e$ , н. м.	$W_L$ , н. м.	$W_c$ , н. м.	$\psi_{т}$ , %	$\psi_e$ , %	$\psi_c$ , %	$E_s \cdot 10^{-4}$ , нн/м <sup>2</sup>	$R_s + f_3$ , нн/м <sup>2</sup>	$\sigma_c$ , н/м	$\tilde{\sigma}_f$ , н/м	$K_{\rho}^{3/2}$ , нн/м <sup>3/2</sup>	$\alpha_c$
КЦ1 (контр)	Нар.	0,0595	0,0973	0,575	6,57	10,35	83,08	4,30	5,27	30,03	165,80	1,14	0,64
	Вн.	0,0371	0,0698	0,342	9,56	10,84	79,6	2,74	3,21	25,15	111,53	0,83	0,88
КЦ1 (Ц30)	Нар.	0,094	0,1089	0,764	1,98	12,3	85,8	2,24	4,32	33,60	231,17	0,867	0,161
	Вн.	0,0379	0,047	0,229	6,58	13,9	79,5	1,08	1,66	16,95	77,28	0,428	0,474
КЦ3	Нар.	0,057	0,0985	0,641	6,47	8,89	84,64	4,43	5,47	30,40	185,12	1,16	0,73
	Вн.	0,059	0,0753	0,405	3,79	14,79	81,42	3,72	4,60	27,12	140,38	1,00	0,256

Первоначальный ответ на вопрос о причине этого явления вытекает из сопоставления срезов по толщине стенки центрифугированных бетонов серий КЦ1 и КЦ3. Рис. 2, где отчетливо наблюдается более высокая однородность распределения крупного заполнителя в модифицированном бетоне по сравнению с бетоном без добавок. Природа этого эффекта выявлена в анализах структуры. С участием авторов разработан ГОСТ "Бетон. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения)", регламентирующий изложенные методы испытаний и систему анализа.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОРОЗОСТОЙКОСТИ ЦЕНТРИФУГИРОВАННОГО БЕТОНА НЕРАЗРУШАЮЩИМИ МЕТОДАМИ

Оценка морозостойкости бетона только по изменению его физико-механических характеристик, определяемых в испытаниях на сжатие, недостаточно информативна и надежна ввиду пониженной однородности бетона по морозостойкости по сравнению с однородностью по прочности. Это связано с тем, что в структуре бетона есть значительное число таких дефектов и микродефектов, которые не влияют на прочность, но проявляются в процессе насыщения бетона водой и его замораживания [41, 43].

В исследованиях морозной деструкции центрифугированного бетона в Белорусском политехническом институте и в НИИЖБ Госстроя СССР авторами применены неразрушающие методы: по накоплению остаточных деформаций и ультразвуковой импульсный метод.

В табл. 20 и на рис. 5а приведены данные по накоплению остаточных деформаций центрифугированных бетонов серий КЦ1, КЦ3, КЦ4 в процессе Ц30, замеренных на базе 300 мм в меридианальном направлении по высоте фрагментов кольцевого сечения.

Метод оценки степени морозной деструкции по накоплению остаточных деформаций, разработанный в ЦНИИС [13] был включен в ГОСТ 10060-76 как один из ускоренных методов для определения минимальной морозостойкости вибрированного бетона и в настоящее время используется в научных исследованиях.

В соответствии с [13], приняв для тяжелого бетона усредненное значение предельных остаточных деформаций  $\varepsilon = 1 \times 10^{-3}$  (0,1%), предел исчерпания морозостойкости центрифугированных бетонных образцов кольцевого сечения наступит соответственно: серия КЦ1 - через 6 циклов замораживания и оттаивания по ускоренной методике ( $\varepsilon = 97,2 \times 10^{-5}$ ), КЦ-3 более чем через 25 циклов ( $\varepsilon = 70,2 \times 10^{-5}$ );

КЦ4 - через 19...20 циклов ( $\epsilon = 90,8...119,8 \times 10^{-5}$ ). Снижение призмной прочности на 15 % образцов серий КЦ1, КЦ3, КЦ4, подвергнутых циклическому замораживанию и оттаиванию происходило соответственно через 5,30 и 20 циклов. Такое совпадение свидетельствует о том, что метод определения морозостойкости бетонов по накоплению остаточных деформаций применим для ускоренной оценки морозостойкости бетона центробежного формования, как и для обычного тяжелого бетона, может быть рекомендована величина предельных остаточных деформаций  $\epsilon = 1 \times 10^{-3}$ .

Оценка кинетики морозной деструкции ультразвуковым импульсным методом производилась путем продольного прозвучивания ультразвуковым прибором "Бетон-12" центрифугированных образцов кольцевого сечения в оттаянном состоянии при постоянной положительной температуре.

Таблица 20

Деформации деструктивного расширения бетона центрифугированных образцов кольцевого сечения при циклическом замораживании и оттаивании

№ цикла	Остаточные деформации, $\epsilon \times 10^{-5}$		
	Серия образцов		
	КЦ1	КЦ3	КЦ4
I	4,4	4,2	-I
10	244,4	7,8	21,1
15	442,8	16,2	68,5
20	711,8	-	119,8
25	-	70,2	167,0

В табл. 21 и на рис. 5а,б показано изменение скорости прохождения ультразвуковых волн через бетон различных серий, подвергнутый циклическому замораживанию и оттаиванию.

Преимущество ультразвукового импульсного метода состоит в возможности проследивать характер морозного разрушения постоянно и на одних и тех же образцах, тем самым учитывая их "предысторию" до Ц30.

Так, скорость ультразвука в сухих образцах серии КЦ3 была на 7,1 % выше, чем в образцах серии КЦ1, что соответствовало относительно большей прочности на 17,8 % и указывало на разницу в капиллярно-пористой структуре бетонов. Полученные результаты свидетельствуют

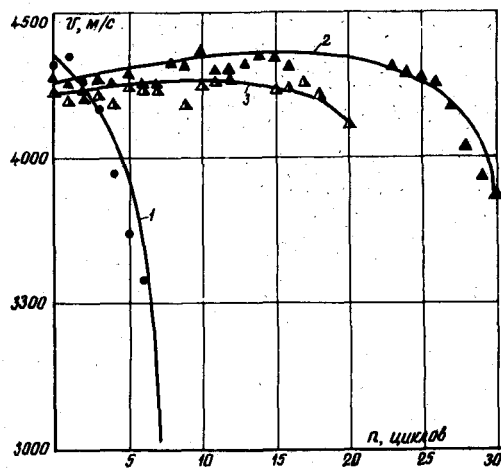
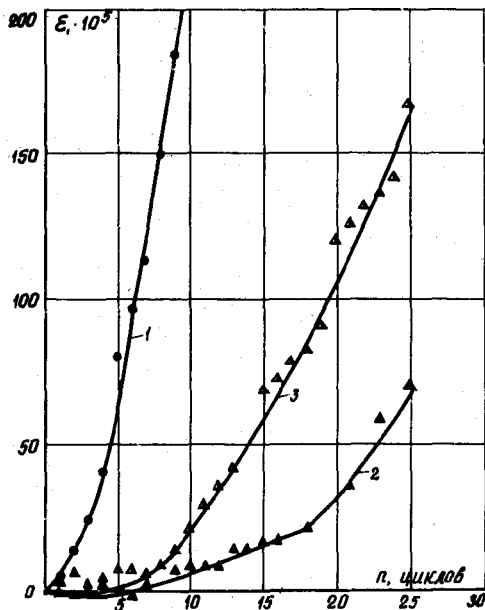


Рис. 5а, б. Характер накопления продольных остаточных деформаций (а) и изменения скорости продольных ультразвуковых волн (б) в бетоне центрифугированных образцов кольцевого сечения при Ц30 I - серия КЦ1, 2 - КЦ3, 3 - КЦ4

о том, что оценка степени развития морозных деструктивных процессов в центрифугированном бетоне, несмотря на дополнительное водонасыщение в результате микротрещинообразования в бетоне при Ц30, вполне допустима, так как между скоростью ультразвуковых волн, проходящих через бетон и его прочностными и деформативными показателями, существует корреляционная связь.

Таблица 21

Скорость прохождения продольных ультразвуковых волн в бетоне центрифугированных образцов кольцевого сечения в зависимости от числа циклов замораживания и оттаивания

№ цикла	Серия образцов		
	КЦ1	КЦ3	КЦ4
	Скорость ультразвука $V$ ,		м/с $V(n) / V(o)$
0 сух. нас.	4026	4312	4152
	4324	4274	4224
1	4350	4252	4187
	1,01	1,0	1,0
5	3741	4288	4240
	0,87	1,0	1,0
10	2297	4365	4243
	0,53	1,02	1,00
15	1417	4338	4231
	0,33	1,02	1,0
20	-	-	4109 0,97
25	-	4273 1,0	-
30	-	3664 0,9	-

Так, в пределах исчерпания морозостойкости после 5 циклов замораживания и оттаивания в образцах серии КЦ1 - скорость ультразвука снижалась на 13,5 %, при этом соответствующее снижение прочности  $R_g$  составило 27,9 %, а в образцах серии КЦ3 уменьшение аналогичных характеристик после 30 циклов составило соответственно 10 % и 17 %.

Из таблицы 2I и рис. 5 видно, что характер изменения в центрифугированном бетоне в зависимости от количества циклов и влажности бетона, близок к изменению его призмочной прочности  $R_b$ , но ультразвуковая характеристика более чувствительна к происходящим в бетоне деструктивным процессам.

На основании полученных экспериментальных данных подобраны аппроксимирующие выражения, связывающие относительное изменение прочности  $\frac{R_b(n)}{R_b(0)}$  и модуля упругости  $\frac{E_b(n)}{E_b(0)}$  с относительным изменением скорости ультразвука  $\frac{V_n}{V_0}$  и величиной остаточных деформаций  $\frac{\epsilon_n}{\epsilon_u}$  при Ц30 для центрифугированного бетона различной морозостойкости в пределах ее исчерпания, где  $V_0$ ,  $V_n$  - соответственно скорость ультразвука в бетоне до испытания на Ц30 и после  $n$  циклов;  $\epsilon_n$ ,  $\epsilon_u$  - соответственно величины остаточных деформаций через  $n$  циклов и на момент исчерпания морозостойкости.

F 100 (КЦI)

$$\begin{aligned} \frac{R_b(n)}{R_b(0)} &= I - I,5 \left( \frac{V_n}{V_0} \right) + I,45 \left( \frac{V_n}{V_0} \right)^2 \\ \frac{E_b(n)}{E_b(0)} &= I - 2,3 \left( \frac{V_n}{V_0} \right) + 2,23 \left( \frac{V_n}{V_0} \right)^2 \\ \frac{R_b(n)}{R_b(0)} &= I - 0,5 \left( \frac{\epsilon_n}{\epsilon_u} \right) + 0,3 \left( \frac{\epsilon_n}{\epsilon_u} \right)^2 \\ \frac{E_b(n)}{E_b(0)} &= I - 0,76 \left( \frac{\epsilon_n}{\epsilon_u} \right) + 0,4 \left( \frac{\epsilon_n}{\epsilon_u} \right)^2 \end{aligned} \quad (4)$$

F 400 (КЦII)

$$\begin{aligned} \frac{R_b(n)}{R_b(0)} &= I - 2 \left( \frac{V_n}{V_0} \right) + 2 \left( \frac{V_n}{V_0} \right)^2 \\ \frac{E_b(n)}{E_b(0)} &= I - 2,59 \left( \frac{V_n}{V_0} \right) + 2,54 \left( \frac{V_n}{V_0} \right)^2 \\ \frac{R_b(n)}{R_b(0)} &= I - 0,04 \left( \frac{\epsilon_n}{\epsilon_u} \right) + 0,15 \left( \frac{\epsilon_n}{\epsilon_u} \right)^2 \\ \frac{E_b(n)}{E_b(0)} &= I - 0,26 \left( \frac{\epsilon_n}{\epsilon_u} \right) + 0,01 \left( \frac{\epsilon_n}{\epsilon_u} \right)^2 \end{aligned} \quad (5)$$

F 600 (КЦIII)

$$\begin{aligned} \frac{R_b(n)}{R_b(0)} &= I - 0,87 \left( \frac{V_n}{V_0} \right) + 0,76 \left( \frac{V_n}{V_0} \right)^2 \\ \frac{E_b(n)}{E_b(0)} &= I - 2,52 \left( \frac{V_n}{V_0} \right) + 2,38 \left( \frac{V_n}{V_0} \right)^2 \\ \frac{R_b(n)}{R_b(0)} &= I - 0,62 \left( \frac{\epsilon_n}{\epsilon_u} \right) + 0,49 \left( \frac{\epsilon_n}{\epsilon_u} \right)^2 \\ \frac{E_b(n)}{E_b(0)} &= I - 0,66 \left( \frac{\epsilon_n}{\epsilon_u} \right) + 0,3 \left( \frac{\epsilon_n}{\epsilon_u} \right)^2 \end{aligned} \quad (6)$$



Результаты экспериментальных исследований, проведенных авторами в Белорусском политехническом институте и в НИИЖБ Госстроя СССР, использованы при разработке Изменения № I к ГОСТ 26134-84 "Бетоны. Ультразвуковой метод определения морозостойкости", что позволило распространить метод, регламентируемый указанным государственным стандартом, на бетоны, испытываемые на морозостойкость в солевых растворах.

### ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЬНОГО И ПОПЕРЕЧНОГО СПИРАЛЬНОГО АРМИРОВАНИЯ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ЦЕНТРИФУГИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СТОЕК

Переход к четвертому наиболее сложному уровню сложности структуры [41, 43] - железобетонной конструкции - предполагает рассмотрение и учет новых сложных процессов, которые могут вызвать разрушающее действие.

Предметом изучения здесь должны являться степень массивности и форма конструкции, влияние напряженного состояния бетона на его стойкость, взаимодействие бетона и арматуры, неоднородность температурных деформаций в бетоне и другие параметры [41, 43].

В проведенных авторами в Белорусском политехническом институте и в НИИЖБ Госстроя исследованиях для опытных железобетонных центрифугированных образцов были изготовлены два вида арматурных каркасов (табл. 22).

Арматурный каркас образцов серии КИ2 состоял из 12 продольных стержней  $\phi 12$  А-Ш, равномерно размещенных по периметру кольцевого сечения и двух колец жесткости в торцах образцов  $\phi$  Вр-I. Арматурный каркас образцов серии КИ5 состоял из 12 продольных стержней  $\phi 12$  А-Ш и поперечной арматуры в виде спирали из проволоки  $\phi 5$  Вр-I с шагом 70 мм. Изготавливали арматурные каркасы на специальном стенде. Крепление спирали к каждому продольному стержню выполнялось вязальной проволокой.

Таблица 22

Армирование железобетонных центрифугированных образцов

Серия образцов	Армирование		Коэффициенты армирования	
	продольное	поперечное	%	%
КИ2	12 $\phi 12$ А-Ш	-	1,314	-
КИ5	12 $\phi 12$ А-Ш	спираль $\phi 5$ Вр-I шаг 70 мм	1,546	0,451

Примечание. Состав бетонной смеси опытных образцов серии КИ2 и КИ5 соответствовал составу бетона серии КИ1 (см. табл. 8)

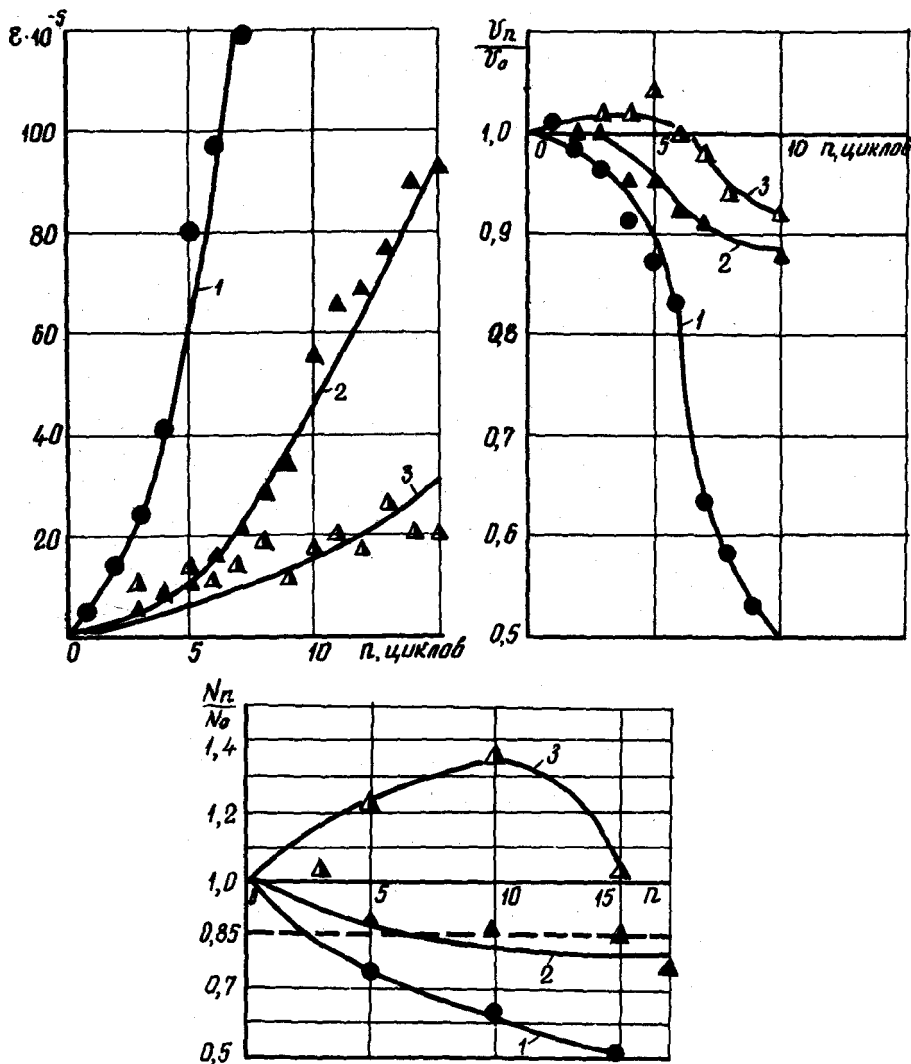


Рис. 6а, б, в. Накопление остаточных деформаций (а) изменение скорости ультразвука (б) и несущей способности (в) при ЦЗО:  
 1 - серия КИ1; 2 - серия КИ2; 3 - серия КИ3

План испытаний опытных образцов

Серия образцов	Отличительный признак образцов	Количество образцов, шт.		
		Подвергнутых ЦЗО	Контрольных	Всего
КЦ2	армирование $M_s = 1,314 \%$	12	3	15
КЦ3	армирование $M_s = 1,516 \%$ $M_{s,cur} = 0,451 \%$	12	3	15

Центрифугированные железобетонные образцы кольцевого сечения диаметром 500 мм и высотой  $h = 500$  мм, армированные продольными стержнями 12  $\phi$ 12 А-Ш, были подвергнуты испытанию на морозостойкость в термобаровлагокамере СТБВК-8000 по методике, аналогичной испытанию бетонных образцов центробежного формования. В процессе испытаний после каждого цикла ультразвуковым импульсным методом оценивалось нарушение структуры бетона в фрагменте центрифугированной конструкции. Данные замеров остаточных деформаций в продольном направлении свидетельствовали как о морозной деструкции бетона, так и о перераспределении усилий между арматурой и бетоном (Рис. 6 а и б).

Результаты испытаний на осевое сжатие опытных образцов серии КЦ2, подвергнутых ЦЗО, свидетельствуют о положительном влиянии симметричного продольного армирования на морозостойкость центрифугированных железобетонных конструкций (табл. 23, рис. 6 а, б, в). При  $M_s = 1,314 \%$  для различных образцов серии КЦ2 момент исчерпания морозостойкости наступил через 10...15 циклов замораживания и оттаивания по ускоренной методике, тогда как для аналогичных бетонных образцов он соответствовал 5 циклам. Показательно, что влажность армированных образцов после 96 ч насыщения в 5 % растворе  $M_{all} W = 3,94 \%$  была примерно равна влажности насыщения в тех же условиях бетонных образцов серии КЦ1 ( $W = 4,15 \%$ ), что подтверждает хорошее уплотнение бетона при центробежном формовании несмотря на наличие продольных арматурных стержней.

Призменная прочность бетона железобетонных образцов при ЦЗО

Серия опытных образцов	Кол-во циклов	Весовая влажность $W, \%$	Разрушающее усилие, $N_u$ кН	Призменная прочность бетона $R_b, \text{МПа}$	$\frac{N_{u(n)}}{N_{u(o)}}$	$\frac{R_b(n)}{R_b(o)}$
КЦ2 $\delta = 70 \text{ мм}$	0	3,94	4600	44,07	I	I
	5	4,05	4080	39,27	0,887	0,891
	10	4,09	3984	37,41	0,866	0,849
	15	-	3910	35,80	0,85	0,812
	17	-	3477,6	32,53	0,756	0,738

Призменная прочность на сжатие бетона в армированных центрифугированных элементах кольцевого сечения, испытанных на осевое сжатие, определялась по формуле:

$$R_b = \frac{N_b}{A_b} = \frac{N_u - N_s}{A_b} = \frac{N_u - \epsilon_s \cdot E_s \cdot A_s}{A_b}, \quad (7)$$

где  $N_b, N_s, N_u$  - продольные усилия, воспринимаемые соответственно бетоном, арматурой и железобетонным элементом в стадии разрушения;

$\epsilon_s$  - относительная продольная деформация арматуры при разрушении образца; все остальные обозначения соответствуют [91].

В табл. 24 и на рис. 6 представлены данные по накоплению остаточных деформаций и изменению скорости продольных ультразвуковых волн в ходе циклического замораживания и оттаивания в центрифугированных образцах серии КЦ1 (бетонные), КЦ2 (железобетонные, армированные симметричной продольной арматурой), КЦ5 (железобетонные, армированные продольной и поперечной спиральной арматурой).

Анализ данных табл. 24 показывает, что симметричная продольная арматура сдерживает накопление продольных деформаций деструктивного расширения центрифугированного бетона при ЦЗО. Это приводит к возникновению в арматуре дополнительного напряжения растяжения, а в бетоне - напряжения сжатия.

Из полученных же данных можно сделать заключение, что некоторое обжатие центрифугированного бетона, вызванное сдерживающим

влиянием арматуры на развитие продольных остаточных деформаций бетона при ЦЗО, способствует повышению морозостойкости элемента. В пределах исчерпания морозостойкости после 10 циклов величина остаточных деформаций бетона образцов серии КЦ2 составила  $55,2 \times 10^{-5}$ .

При условии совместной работы бетона и арматуры  $\varepsilon_s = \varepsilon_b$ , величина дополнительного растягивающего усилия, возникающего в арматуре, определяется из соотношения

$$N_s^t = \varepsilon_s \cdot E_s \cdot A_s = \varepsilon_b \cdot E_s \cdot A_s \quad (8)$$

и составляет

$$N_s^t = 55 \times 10^{-5} \times 2 \times 10^5 \times 13,57 \times 10^{-4} = 149,3 \text{ кН},$$

где  $N_s^t$  - дополнительное растягивающее усилие в арматуре;

$\varepsilon_s, \varepsilon_b$  - остаточные деформации в арматуре и бетоне при ЦЗО; остальные обозначения соответствуют [91], а величина растягивающих напряжений в арматуре  $\sigma_s^t = 110 \text{ МПа}$ .

Величина напряжения обжатия симметрично армированного центрифугированного бетона при ЦЗО будет определена из выражения

$$\sigma_b = \frac{N_b}{A_b} = \frac{N_s^t}{A_b} = \varepsilon_b \cdot E_s \cdot \frac{A_s}{A_b} = \varepsilon_b \cdot E_s \cdot \mu_s \quad (9)$$

$$\sigma_b = 55 \times 10^{-5} \times 2 \times 10^5 \times 1,3 \times 10^{-2} = 1,43 \text{ МПа},$$

что составляет  $\sim 0,04 R_b$ .

Эти данные хорошо коррелируются с представлениями, развиваемыми для вибрированного бетона в уже упоминавшихся работах [9, 14, 56, 72]. В опытах А. А. Гончарова и Ф. М. Иванова [14] было выявлено увеличение морозостойкости бетона при нагружении в пределах до  $0,4 R_b$  и значительное ее снижение при нагружении более  $0,7 R_b$ .

Таблица 24

Накопление остаточных деформаций и изменение скорости продольных ультразвуковых волн при ЦЗО

Количество ЦЗО циклов	Остаточные деформации $\varepsilon \times 10^5$			Скорость ультразвука $v, \text{ м/с } v_n/v_0$		
	Серия образцов					
	КЦ1	КЦ2	КЦ5	КЦ1	КЦ2	КЦ5
I	2	3	4	5	6	7
0 (нас)	-	-	-	4321/1	4256/1	4280/1
I	4,4	0,64	4,5	4350/1,01	4254/1	4280/1

1	2	3	4	5	6	7
2	13,8	1,71	-	4264/0,99	4254/1	4282/1
3	23,7	4,89	10,2	4165/0,96	4132/0,97	4366/1,02
4	41,1	7,36	8,2	3944/0,91	4026/0,95	4360/1,02
5	79,8	12,76	10,0	3741/0,97	4030/0,95	4451/1,04
6	97,2	15,53	10,7	3581/0,83	3931/0,92	4288/1,0
7	122,9	21,07	13,7	2722/0,63	3650/0,91	4194/0,96
8	150,2	27,45	18,1	2515/0,58	-	4023/0,94
9	184,6	32,65	11,9	2300/0,53	-	-
10	240,4	55,15	16,7	2297/0,53	3746/0,88	3941/0,92
11	262,96	64,69	19,7	2108/0,49	-	-
12	298,5	68,09	16,7	1832/0,42	-	-
13	325,5	76,27	25,6	1439/0,33	-	-
14	358,4	89,2	20,2	1549/0,36	-	-
15	442,8	92,9	24,9	1417/0,33	-	-

Примечание.  $v_n$  - скорость ультразвука в бетоне после  $n$  циклов;  
 $v_0$  - то же перед испытанием на Ц30 после насыщения  
образца в течение 96 часов в 5 %-ном растворе NaCl

Отмеченное явление нашло объяснение в представлениях о природе разрушения бетона, разработанных О.Я. Бергом [8]. Нарушение структуры бетона в процессе нагружения оказывает влияние на сопротивление многократному замораживанию и оттаиванию конструкций, находящихся в напряженном состоянии. Микротрещины, появляющиеся под нагрузкой задолго до разрушения бетона, заполняются водой, что при замораживании приводит к увеличению растягивающих усилий, возникающих в бетоне в результате действия поперечных сил при осевом сжатии. Отмечалось также, что микротрещины способствуют вытеснению воздуха из структуры бетона и замещению его водой [41, 43].

Обжатие же до уровня  $R_{acc}$  приводит к уплотнению структуры бетона и способствует повышению его стойкости.

Продольная арматура, препятствуя развитию деформаций деструктивного расширения центрифугированного бетона при Ц30 в водонасыщенном состоянии, приводила к возникновению в бетоне напряжений обжатия величиной 0,04...0,072  $R_b$  в пределах исчерпания морозостойкости, а симметричное расположение арматуры по кольцевому сечению предполагало, что это обжатие будет равномерным. Небольшое по величине равномерное обжатие фрагмента кольцевого сечения способствовало уплотнению структуры центрифугированного бетона, о чем свидетельст-

вует незначительное увеличение его водонасыщения в процессе ЦЗО (табл. 23). Так, если после 96 ч насыщения в 5 %-ном растворе *Nach* (0 циклов) влажность бетона *W* равнялась 3,94 %, то после 10 циклов замораживания и оттаивания она составила 4,09 %.

Уплотнение структуры и невысокое водонасыщение в процессе ЦЗО по сравнению с бетонными образцами серии КЦ1 предопределили замедление морозной деструкции армированных центрифугированных образцов, что подтверждается данными продольного прозвучивания бетона прибором "Бетон-12" (табл. 24).

Результаты испытаний на осевое сжатие центрифугированных образцов серии КЦ5 через определенное число циклов замораживания и оттаивания, приведенные в табл. 25 и на рис. 6в свидетельствуют о существенном повышении к десятому циклу прочности и о некотором увеличении модуля упругости опытных образцов.

Ключ к пониманию этого, на первый взгляд парадоксального факта, может быть найден при сравнительном анализе накопления при ЦЗО остаточных деформаций в образцах серий КЦ1 (бетонные образцы), КЦ2 (армированные только продольной арматурой  $\mu_s = 1,3 \%$ ), КЦ5 (армированные продольной стержневой и поперечной спиральной арматурой;  $\mu_s = 1,52 \dots 1,58 \%$ ,  $\mu_{s, cir} = 0,45 \%$ ). Эти данные приведены в табл. 24 и представлены на рис. 6а.

После десяти циклов замораживания и оттаивания остаточные деформации бетона серии КЦ1 составили  $240,4 \times 10^{-5}$ , КЦ2 -  $55,5 \times 10^{-5}$ , а серии КЦ5 - только  $16,7 \times 10^{-5}$ . К этому моменту бетон неармированных образцов (КЦ1) исчерпал свою морозостойкость и снижение его применной прочности составило 37,4 %. В бетоне образцов, армированных только продольной арматурой (КЦ2), как уже отмечалось, за счет обжатия деструктивные процессы были замедлены и прочность образцов после 10 циклов уменьшилась только на 13,4 %. Подвергнув тем же испытаниям и в том же объеме образцы серии КЦ5, имели повышение прочности на 22 % по сравнению с контрольными образцами (табл. 25).

Таблица 25

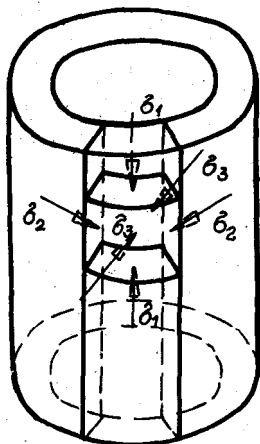
Изменение прочности железобетонных образцов серии КЦ5 при ЦЗО

Серия образцов	Количество циклов, <i>n</i>	Весовая влажность, %	Разрушающее усилие, $N_u$ кН	$\frac{N_u(n)}{N_u(0)}$
КЦ5 $\delta = 65$ мм	0	4,04	3992	1
	3	4,25	4032	1,01
	5	-	4870	1,22
	10	4,19	5429	1,36
	15	-	4041	1,01

Значительное снижение остаточных деформаций и существенный прирост прочности свидетельствуют о перераспределении усилий в ходе ЦЗО между бетоном и продольной и поперечной спиральной арматурой, а также о возникновении в бетоне центробежного формирования сложно-напряженного состояния.

Надо полагать, что это состояние будет состоянием трехосного сжатия. Продольная и поперечная спиральная арматура, сдерживая развитие деформаций деструктивного расширения в продольном направлении центрифугированного образца кольцевого сечения, способствует возникновению напряжений сжатия в бетоне в продольном направлении  $\sigma_1$  (рис. 7).

Деформации деструктивного расширения бетона при морозном воздействии развиваются в объеме, поэтому образец кольцевого сечения стремится расширяться и в поперечном направлении, причем как в радиальном, так и в тангенциальном. Продольная и поперечная спиральная арматура препятствует развитию деформаций в радиальном направлении, что обусловлено эффектом бокового обжатия бетона (эффект обоймы), т.е. имеется радиальная составляющая напряжений сжатия бетона  $\sigma_3$  (рис. 7).



Возможности расширения центрифугированного бетона в тангенциальном направлении ограничены спиральной арматурой, в которой по мере накопления остаточных деформаций бетона возникли дополнительные растягивающие напряжения, а в бетоне дополнительные напряжения сжатия  $\sigma_2$  (рис. 7).

Эффект влияния продольной и поперечной спиральной арматуры в образцах, подвергнутых ЦЗО, аналогичен эффекту предварительного напряжения арматуры с той лишь разницей, что инициатором обжатия здесь является морозное разрушение центрифугированного бетона, а конкретно - возникновение в нем деформаций деструктивного расширения. Причем, большее количество циклов пока не нарушено сцепление арматуры и бетона, приводит к большему обжатию и соответственно к более существенному увеличению прочности и трещиностойкости образцов. Напряженное состояние трехосного сжатия обуславливает более высокую

Рис. 7. Напряженное состояние в бетоне образцов серии КЦ5 при ЦЗО



прочность бетона, что и было выявлено при испытаниях на осевое сжатие. Прочность образцов после 5 циклов замораживания и оттаивания увеличилась на 22 %, а после 10 циклов - на 36 % по сравнению с контрольными образцами.

Последующее снижение этого показателя до начального значения после 15 циклов указывает на нарушение совместной работы арматуры и бетона в результате морозного разрушения контактной зоны и исчезновения объемного обжатия.

Таким образом, армирование образцов симметричной продольной стержневой ( $M_s = 1,3\%$ ) и спиральной поперечной арматурой ( $M_s = 1,52...1,58\%$ ,  $M_{s,spir} = 0,4\%$ ) оказывает положительное влияние на стойкость железобетонной центрифугированной конструкции кольцевого сечения в условиях циклического замораживания и оттаивания. Это выражается в уменьшении величины накопленных при Ц30 остаточных деформаций и в существенном увеличении до определенного предела, связанного с совместной работой арматуры и бетона, прочность фрагмента. Этот эффект является следствием возникновения при Ц30 в центрифугированном элементе кольцевого сечения, армированном продольной и поперечной спиральной арматурой, напряженного состояния трехосного сжатия.

Возникновение такого состояния будет зависеть от коэффициентов продольного и поперечного армирования и их соотношения, а также морозостойкости бетона.

Здесь не приводится расчет центрифугированных железобетонных стоек кольцевого сечения с учетом неоднородного температурного деформирования и деформаций деструктивного расширения бетона при Ц30, достаточно полно опубликованный в работах авторов [37,39,60,65].

Однако, произведенная оценка напряженно-деформированного состояния в численном эксперименте на ЭВМ свидетельствует, что основными причинами образования трещин на наружной поверхности центрифугированного элемента являются перепад температурных и остаточных деформаций по толщине стенки и снижение прочностных свойств бетона при Ц30.

## ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Опыт строительства и эксплуатации линий электропередачи, контактных сетей электрифицированного транспорта и освещения свидетельствует о том, что использование железобетонных стоек для их сооружения является весьма эффективным и конкурентоспособным по сравнению с металлическими и деревянными стойками.

При производстве железобетонных стоек за рубежом предпочтение отдается преднапряженным железобетонным стойкам кольцевого сечения, изготавливаемым методом центрифугирования. Среди указанных конструкций наиболее массовыми являются центрифугированные стойки для опор линий электропередачи напряжением 110-1150 кВ. Годовая потребность в железобетонных стойках составляет 130-150 тыс. штук, т.е. 240-260 тыс. м<sup>3</sup> центрифугированного бетона, а в ближайшее время этот объем увеличится до 280-300 тыс. м<sup>3</sup>. Анализ зарубежных патентных и литературных материалов свидетельствует о том, что во многих странах (США, Япония, Германия, Чехо-Словакия, Австралия, Новая Зеландия, Франция, Индия, Швейцария и др.) в последние годы объем центрифугированного бетона также возрастает.

В большинстве своем стойки опор линий электропередачи эксплуатируются в сложных агрессивных и природно-климатических условиях. С учетом удаленности районов электросетевого строительства, экстремальных температурно-влажностных и специфических грунтово-геологических условий, проблема обеспечения требуемой долговечности центрифугированных железобетонных стоек выдвигается на первый план. Дополнительный эффект народнохозяйственного значения при повышении долговечности стоек создается за счет того, что высвободившиеся ресурсы, ранее расходовавшиеся на ремонт (материалы, трудозатраты и др.) могут быть направлены на создание новой стоимости. Даже приближенные расчеты показывают, что этот эффект весьма значителен.

Дальнейший прогресс в технологии бетона в части изготовления длительно стойких центрифугированных конструкций можно видеть в создании на предприятиях стройиндустрии Минэнерго условий для выпуска специальных и обычных бетонов, приспособленных для эксплуатации в самых различных условиях. Конструкции из центрифугированного бетона, стойкие в большинстве природных сред, будут получаться за счет применения специальных цементах, резкого повышения плотности - непроницаемости бетона, введения специальных добавок, снижающих количество воды в составе бетона и условий твердения, гарантирующих получение оптимальной структуры цементного камня.

Заводам стройиндустрии Минэнерго рекомендуется использовать водоредуцирующее действие суперпластификатора С-3 (0,4-1%) для придания центрифугированным стойкам высокой долговечности, обеспечивая при этом, например, марку по морозостойкости бетона F600. Исходя из местных условий, в подобранных рецептурно-технологических диапазонах подобный эффект может быть достигнут при использовании других добавок такого же класса.

Увеличение объемов выпуска центрифугированных стоек требует решения практических задач контроля прочности, трещиностойкости и долговечности бетона в заводских лабораториях. Рекомендуется методика равновесных механических испытаний с получением полных диаграмм состояния центрифугированного бетона, которая позволяет комплексно (т.е. на всех стадиях деформирования и разрушения), многопараметрично (т.е. с одновременным определением прочности, модуля упругости, трещиностойкости и долговечности и т.п.), инвариантно (т.е. независимо от различных условий испытаний определяются действительные, а не сравнительные свойства материала) оценить основные показатели бетона центробежного формования. Предложены неразрушающие методы оценки морозостойкости центрифугированного бетона в заводских условиях и при натурных обследованиях непосредственно на конструкциях кольцевого сечения по накоплению остаточных деформаций и по времени прохождения ультразвукового импульса.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Алексеев С.Н., Розенталь Н.К. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной промышленной среде. - М.: Стройиздат, 1976, - 208 с.
2. Алмазов В.О., Смирнов Г.Н. Железобетонные конструкции в портовом гидротехническом строительстве. - М.: Транспорт, 1986. - 198 с.
3. Ахвердов И.Н. Железобетонные напорные центрифугированные трубы. - М.: Стройиздат, 1967. - 164 с.
4. Ахвердов И.Н. Прочность и деформативность бетона в водонасыщенном состоянии // Сб. тр./ВНИИГ. - Л., 1971. - вып. 68. - Труды координационных совещаний по гидротехнике. - с. 80-86.
5. Ахвердов И.Н. Основы физики бетона. - М.: Стройиздат, 1981. - 464 с.
6. Ахвердов И.Н. Перспектива развития технологии производства центрифугированных железобетонных конструкций // Проблемы создания и применения центрифугированных железобетонных конструкций в строительстве. - Минск: БелНИИНТИ. 1985. - с.9-11.
7. Баташев В.М., Андросов С.Т. Контроль прочности бетона при изготовлении железобетонных центрифугированных стоек опор ВЛ // Энергетическое строительство. - 1970. - № 2. - с.63-65.

8. Берг О.Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона. - М.: Госстройиздат, 1961. - 95 с.

9. Бетон для строительства в суровых климатических условиях / В.М.Москвин, М.М.Капкин, А.Н.Савицкий, В.Н.Ярмаковский. - М.: Стройиздат. 1973. - 172 с.

10. Булгакова М.Г. Исследование влияния отрицательных температур и влажности на перераспределение усилий в двухпролетной железобетонной балке // Повышение эффективности использования материалов при производстве сборных железобетонных конструкций и изделий. - Иркутск, 1984. - с. 51-53.

11. Бурмистров Н.П. Об основных физико-механических свойствах высокопрочного центрифугированного бетона при сжатии // Транспортное строительство. - 1967. - № 9. - с. 47-49.

12. Васильевский Ю.М. Некоторые вопросы проектирования и применения свай-оболочек. // Долговечность и опыт применения железобетонных свай-оболочек в морских гидротехнических сооружениях: Тез. докл. научн. семинара (г. Одесса, март 1975 г.). - М., - 1975. - с.39-41.

13. Гладков В.С., Иванов Ф.М., Рояк Г.С. Ускоренный метод испытания бетонов на морозостойкость // Защита строительных конструкций от коррозии. - М.: Стройиздат, 1966. - с.216-225.

14. Гончаров А.А. Иванов Ф.М. Морозостойкость бетонов различной прочности, нагруженных сжатием // Гидротехническое строительство. - 1969. - № 6. - с. 8-11.

15. Гончаров А.А., Лосев Л.Н. О причинах повреждений свай-оболочек в зоне переменного уровня воды и опыте работ по обеспечению их долговечности. // Долговечность и опыт применения железобетонных свай-оболочек в морских ГТС. - Тез. докл. научн. семинара (г. Одесса, март 1975 г.) - М. - 1975. - с.24-28.

16. Горчаков Г.И. Исследование морозостойкости бетона в связи с расчетными характеристиками его пористости и прочностью: Автореф. дис...доктор. техн. наук. - М. - 1963 - 30 с.

17. Горчаков Г.И., Гузев Е.А., Сейланов Л.А. Совместное влияние нагрузки и отрицательных температур на деформативность изгибаемых элементов // Бетон и железобетон. - 1980. - № 9 - с. 7-9.

18. ГОСТ 10060-76. Бетон. Методы определения морозостойкости.

19. ГОСТ 10060-87. Бетоны. Методы контроля морозостойкости.
20. ГОСТ 12730.2-78. Бетоны. Методы определения влажности. -
21. ГОСТ 12730.4-78. Бетоны. Методы определения показателей пористости. М.
22. ГОСТ 26134-84. Бетоны. Ультразвуковой метод определения морозостойкости.
23. Гузев Е.А., Булгакова М.Г. Особенности напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций в условиях воздействия нагрузки и отрицательных температур // Совершенствование конструктивных форм, методов расчета и проектирования ЖБК. - М.: НИИЖБ, 1983. - с. 167-174.
24. Гузев Е.А., Пинус В.И. Оценка надежности железобетонных конструкций при низких температурах // Бетон и железобетон. - 1984. - № 10 - с. 9-10.
25. Гузев Е.А., Сейланов Л.А. Трещиностойкость бетона и прогнозирование долговечности железобетона // Материалы конф. и совещ. по механике разрушения: Механика разрушения бетона и железобетона. - Севастополь, 1988. - с. 6-9.
26. Гузев Е.А., Сейланов Л.А., Шевченко В.И. Анализ разрушения бетона по полностью равновесным диаграммам деформирования // Бетон и железобетон. - 1985 - № 10 - с. 10-12.
27. Гузев Е.А., Шевченко В.И., Сейланов Л.А. Исследование силовых и энергетических параметров разрушения бетона по полностью равновесным диаграммам его деформирования // Известия вузов, Сер. Строительство и архитектура - 1986. - № 8. - с. 1-5.
28. Гузев Е.А., Шевченко В.И., Сейланов Л.А. Экспериментальные полностью равновесные диаграммы деформирования бетона // Предельные состояния бетонных и железобетонных конструкций энергетических сооружений: Материалы конференций и совещаний по гидротехнике. - 1987 - с. 180-185.
29. Дмитриев С.А. Прочность центробежного бетона // Бетонные и железобетонные работы (Сер. 40: Реф. сб. /ЦИТЭИИ). - М., 1939, - 6 с.
30. Дмитриев С.А. Расчет железобетонных элементов кольцевого сечения // Строительная промышленность. - 1940. - № 2 - с. 44-50.

31. Долговечность железобетона в агрессивных средах / Под редакцией проф. Ф.М.Иванова. М., Стройиздат, 1990 - 320 с.
32. Добавки для бетонных смесей - суперпластификатор С-3 / Ф.М.Иванов, В.М.Москвин, В.Г.Батраков и др. // Бетон и железобетон. - 1978. - № 10. - с. 13-16.
33. Добролюбов Г., Ратинов В.Б., Розенберг Т.И. Прогнозирование долговечности бетона с добавками. - М.: Стройиздат, 1983. - 212 с.
34. Железобетонные стройизделия и конструкции: Отчет о НИР/ ЦНИПС; Руководитель А.А. Гвоздев. - Наряд 6492. - М., 1936.
35. Зайцев Ю.В. Новое в строительной науке. - М.: Знание, 1986, - 63 с.
36. Зикеев Л.Н., Леонович С.Н. Исследование морозостойкости центрифугированного бетона. // Коррозионная стойкость бетона, арматуры и железобетона в агрессивных средах. - М.: НИИЖБ, 1988 - с. 93-99.
37. Зикеев Л.Н., Леонович С.Н. Морозостойкость преднапряженных железобетонных конструкций из центрифугированного бетона // Предварительно напряженные железобетонные конструкции зданий и сооружений. - М.: НИИЖБ, 1989 - с. 93-108.
38. Зикеев Л.Н., Леонович С.Н. Неразрушающие методы контроля морозостойкости центрифугированного бетона // Защита железобетона от коррозии - М.: НИИЖБ, 1990 г.
39. Зикеев Л.Н., Леонович С.Н. Эффективные железобетонные конструкции высокой прочности и долговечности для электросетевого строительства // Разработка и внедрение новых материалов, конструкций и технологий для электросетевого строительства. - М., 1989. с. 48-51.
40. Зинина Е.А. Коррозионная стойкость бетона с суперпластификатором // Исследование и применение бетонов с суперпластификаторами. - М.: НИИЖБ, 1982 - с. 79-86.
41. Иванов Ф.М. Коррозионные процессы и стойкость бетона в агрессивных средах: Автореф. дис... доктор.техн. наук. - М. - 1968. - 36 с.
42. Иванов Ф.М. Защита железобетонных транспортных сооружений от коррозии. М.: Транспорт. 1969, 176 с.

43. Иванов Ф.М. Исследование морозостойкости бетона // Защиты от коррозии строительных конструкций и повышение их долговечности. - М.: НИИЖБ, 1969. - с.109-115.

44. Иванов Ф.М., Поляков Б.И. Самозалечивание и стойкость гидротехнического бетона // Гидротехническое строительство. - 1974. - № 9 - с. 32-35.

45. Иванов Ф.М. Добавки в бетон и перспективы применения суперпластификаторов // Бетон с эффективными суперпластификаторами. - М.: НИИЖБ, 1979 с. 6-21.

46. Иванов Ф.М., Зикеев Л.Н., Леонович С.Н. Структура и морозостойкость центрифугированного бетона с добавками // Исследование и применение химических добавок в бетонах. - М.: НИИЖБ, 1989. - с. 59-66.

47. Иванов Ф.М., Зикеев Л.Н. Леонович С.Н. Коррозионная стойкость центрифугированных железобетонных конструкций // Коррозия и защита строительных конструкций производственных зданий и сооружений: Материалы XIII Всесоюзной конф. коррозионистов. - Донецк, 1989 г.

48. Испытания центрифугированного бетона на морозостойкость. Отчет о НИР/ ДИСИ; Руководитель В.М.Баташев. - Днепропетровск, 1975. - 96 с.

49. Исследование возможности применения ультразвука для оценки морозостойкости бетона / С.В. Шестоперов, В.А. Горшков, Д.Г. Мепуришвили, В.Б.Сыров // Бетон и железобетон. - 1974 - № II. - с. 13-15.

50. Исследование климатических воздействий на конструкции фундаментов зданий и сооружений, возведенных и эксплуатируемых в Якутской АССР: Отчет о НИР (заключит.) НИИЖТ; Руководитель И.З.Актуганов. - Новосибирск, 1985. - 56 с.

51. Исследовать климатические воздействия на элементы железобетонных конструкций и разработать методику назначения морозостойкости бетона для использования в пособиях к главам СНиП П-21 и П-28: Отчет о НИР (заключит.)/НИИЖТ; Руководитель И.З. Актуганов.- Новосибирск, 1985. - 436 с.

52. Исследование целостности свайных фундаментов опор и разработка способов их защиты от разрушения в условиях Крайнего Севера: Отчет о НИР (заключит.)/ СЗ0 "Энергосетьпроект"; Руководитель А.И Курносов. - № 9417 тм. - Л., 1976. - 72 с.

53. Каландадзе В.Ц. Определение прочности центрифугированного бетона // Бетон и железобетон. - 1962. № 8. - с. 364-366.

54. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В.М.Москвин, Ф.М., Иванов, С.Н.Алексеев, Е.А.Гузеев. - М.: Стройиздат, 1980. - 536 с.

55. Кричевский А.П. Расчет железобетонных инженерных сооружений на температурные воздействия. - М.: Стройиздат, 1984 - 148 с.

56. Криогенный бетон / Под ред. А.М.Подвального. М.: Стройиздат, 1986. - 166 с.

57. Кудзис А.П. К вопросу определения прочности центрифугированного бетона // Сб. тр. / ВИСИ. - Вильнюс: Минтис, 1964. - Вып. 4. - Строительство и архитектура. - с. 85-91.

58. Кунцевич О.В. Бетоны высокой морозостойкости для сооружений Крайнего Севера. - Л.: Стройиздат, 1983. - 126 с.

59. Леонович С.Н. Морозостойкость центрифугированного бетона // Повышение качества и эффективности применения бетона и железобетонных изделий и конструкций. М.: НИИЖБ, 1988 с. 79-83.

60. Леонович С.Н. Прочность, деформативность и трещиностойкость центрифугированных железобетонных элементов кольцевого сечения при циклическом замораживании и оттаивании: Автореф.: дис... канд. техн. наук. - М. 1989 - 24 с.

61. Леонович С.Н. Долговечность центрифугированных железобетонных конструкций при циклическом замораживании и оттаивании // Бетон и железобетон - № 10, 1988, с. 40-42.

62. Леонович С.Н. Исследование особенностей структуры центрифугированного бетона // Расчет, конструирование и технология изготовления бетонных и железобетонных изделий. М.: НИИЖБ, 1989. - с. 60-65.

63. Леонович С.Н., Зальцман А.С. Ультразвуковой метод оценки морозостойкости центрифугированного бетона // Сб. тр. / ВНИИЖелезобетон. - М., 1988 - Вып. I - Новые технологические разработки в производстве сборного железобетона - С. 120-124.

64. Леонович С.Н. Зикеев Л.Н., Иванов Ф.М. Повышение долговечности центрифугированных железобетонных конструкций, эксплуатирующихся при низких отрицательных температурах // Обеспечение качества



железобетонных конструкций в суровых климатических условиях и вечномёрзлых грунтах: Материалы Всесоюз. конф. - Якутск, 1988. с. 161-162

65. Леонович С.Н. Расчет центрифугированных железобетонных конструкций при знакопеременных температурных воздействиях // Материалы международной конференции. Иваново, 1989. - с.62-63.

66. Мазур Б.М. Температурные деформации бетонов при низких отрицательных температурах и их влияние на долговечность железобетона: Автореф. дис...канд. техн. наук. - Москва, 1964.-24 с.

67. Марквардт Э. Центрифугированные бетонные и железобетонные трубы // Сб. тр./ ЗаГТИИЗ. - Тифлис., 1934. - Вып. 14 - Центробежный бетон. - с. 37-100.

68. Матвеева О.И. Бетоны, стойкие в агрессивных мерзлотных условиях (на примере Центральной Якутии): Автореф. дис...канд. техн. наук. - Якутск, 1987. - 25 с.

69. Материалы обследования линий электропередачи и исследований по долговечности бетона: Отчет о НИР (заключит.) / Оргэнергострой; Руководитель М.Ф. Козык. - Куйбышев, 1964. - 124 с.

70. Михайлов В.В. Теория и практика центробежного напряженно-армированного бетона. М.: Госстройиздат, 1939. - 188 с.

71. Морозостойкость бетонов, подвергавшихся действию агрессивной солевой среды / Ф.М. Иванов, Г.С.Рояк, В.С.Гладков, А.С.Вакланов // Гидротехническое строительство. - 1966. - № 2 - с. 13.

72. Москвин В.М., Подвальный А.М. О морозостойкости бетона в напряженном состоянии // Бетон и железобетон. - 1960. - № 2. с. 58-64.

73. Москвин В.М., Капкин М.Н., Мазур Б.М. Деформации и напряжения в железобетоне при действии низких отрицательных температур // Коррозия, методы защиты и повышения долговечности бетона и железобетона. - М.: Стройиздат, 1965. - с. 53-58.

74. Никеров П.С. Основные вопросы долговечности и применения свай-оболочек в морских гидротехнических сооружениях // Долговечность и опыт применения железобетонных свай-оболочек в морских ГТС: Тез. докл. научн. семинара (г. Одесса, март 1975 г.). - М. - 1975. - с. 4-5.

75. Опоры ВЯ из центрифугированных полимерцементных стоек для условий низких температур и агрессивной среды: Отчет о НИР (заключит). ВИСИ; Руководитель А.П.Кудзис. - Вильнюс, 1977. - 250 с.

76. Определение рациональных решений центрифугированных стоек для условий низких температур: Отчет о НИР (заключит.) / ВИСИ; Руководитель А.П. Кудзис. - 533/410-37; № г.р. 78069814. - Вильнюс, 1979. - 177 с.

77. Опыт проведения испытаний железобетонных стоек ВД (рекомендации по расчету центрифугированных стоек ВД) / С.Т. Андросов, В.М. Баташев и др. - Днепропетровск: Промінь, 1975. - 114 с.

78. Пецольт Т.М. Железобетонные центрифугированные конструкции промышленных зданий и сооружений: Автореф. дис... докт. техн. наук. - Минск, 1983. - 43 с.

79. Пецольт Т.М. Физико-механические характеристики центробежного бетона // Строительство и архитектура Белоруссии. - 1983. - № 1. - с. 30-31.

80. Пинус Б.И., Семенов В.В., Гузев Е.А. Предельные деформации бетонов, подвергнутых циклическому замораживанию и оттаиванию // Бетон и железобетон. - 1981. № 10. - с. 19-20.

81. Пинус Б.И. Обеспечение долговечности железобетонных конструкций при низкотемпературных воздействиях: Автореф. дис... докт. техн. наук. - М., 1987 - 44 с.

82. Повышение долговечности бетона и железобетонных конструкций в суровых климатических условиях / Д.М. Баженов, Г.И. Горчаков, Д.А. Алимов В.В. Воронин. - М.: Стройиздат, 1984. - 80 с.

83. Повышение морозостойкости морских и речных транспортных сооружений из бетона и железобетона: Отчет о НИР (промежут) / ЦНИИС; Руководитель Ф.М. Иванов. СМ - 02-66.

84. Применение суперпластификаторов в бетоне / В.Г. Батраков, Ф.М. Иванов, Е.С. Силина, В.Р. Фалижман // Строительство и архитектура / Отечественный и зарубежный опыт. Сер. 7 / Строительные материалы и изделия. Вып. 2 - ВНИИИС, 1982 - 60 с.

85. Применимость  $\int$  - интеграла для анализа разрушения бетона // В.В. Жуков, В.И. Шевченко, Е.А. Гузев, Д.А. Сейланов // Изв. вузов, Сер. Строительство и архитектура. - 1987 - № 5 - с. 1-5.

86. Разработать предложения по проектированию и изготовлению экономичных конструкций стоек опор ВД для расширения области применения и внедрить их в практику строительства: Отчет о НИР (заключит.) / ВИСИ; Руководитель А.П. Кудзис. - № 323, Вильнюс, 1986. - 135 с.

87. Разработка опор с центрифугированными стойками на основе полимербетонов с повышенной плотностью, морозостойкостью и коррозионной стойкостью: Отчет о НИР (заключит.) / СЗО "Энергосеть-проект": Руководитель А.И. Курносков. - № 9441 тм-тЗ. - Ленинград. 1978 - 153 с.
88. Руководство по применению химических добавок в бетоне. - М.: Стройиздат, 1980. - 55 с.
89. Руководство по проектированию, изготовлению и применению железобетонных центрифугированных конструкций кольцевого сечения. - М.: Стройиздат, 1979. - 144 с.
90. Сидина Е.С., Суремяз Е.А. Коррозионная стойкость бетонов с суперпластификатором С-3 // Повышение качества и эффективности изготовления бетонных и железобетонных конструкций за счет химических добавок: Тез. докл. Всесоюз. конф. (г. Вильнюс, 22-24 апреля 1981 г.) - М. - 1981 - с. 18-20.
91. СНиП 2.03.01-84. Бетонные и железобетонные конструкции. Нормы проектирования. - М.: Стройиздат, 1985.
92. СНиП 2.03.11-85. Защита строительных конструкций от коррозии. - М.: ЦИП Госстроя СССР, 1986. - 48 с.
93. Сорочер В.И., Козик М.Ф. Исследование деформативных и прочностных свойств центрифугированного бетона // Энергетическое строительство. - 1968. - № 9 - с. 57-60.
94. Стойкость бетона и железобетона при отрицательной температуре / В.М. Москвин, М.М. Капкин, Б.М. Мазур, А.М. Подвальный. - М.: Стройиздат, 1967. - 126 с.
95. Тарасов В.В. Исследования центрифугированных железобетонных изгибаемых элементов кольцевого сечения с продольным сосредоточенным армированием: Автореф. дис... канд. техн. наук. - Минск, 1982. - 24 с.
96. Трапезников Л.П. Температурная трещиностойкость массивных бетонных сооружений. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 272 с.
97. Трапезников Л.П. Температурная трещиностойкость массивных бетонных гидротехнических сооружений. Критерии и методы расчета: Автореф. дис... докт. техн. наук, - Л., 1987. - 48 с.

98. Филонидов А.М. Ускоренное определение ультразвуком морозостойкости бетона гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. - 1976. - № 1. - с. 15-16.

99. Центрифугированный бетон высокой морозостойкости с воздухововлекающими добавками / Э.К. Передереева, В.С.Гладков, Ф.М. Иванов; Г.И.Мазов // Гидротехническое строительство. - 1971. - № 3. - с. 37-40.

100. Чернигин С.Я. Повышение долговечности морских гидротехнических сооружений в Прибалтике // "Долговечность и опыт применения железобетонных свай-оболочек в морских ГТС": Тез. докл. научн. семинара (г. Одесса, март 1975 г.) - М. - 1975. - с. 16-18.

101. Шевченко В.И. Об оценке трещиностойкости бетона по параметрам полных диаграмм изгиба // Заводская лаборатория, - 1986. - № 3 - с. 64-66.

102. Шевченко В.И. Трещиностойкость и долговечность жаростойких бетонов. Автореф. дис...докт. техн. наук. - М.1987, - 47 с.

103. Шестоперов С.В. Долговечность бетона. - М.: Автотранспорт, 1960. - с. 322 - 323.

104. Штаерман Ю.Я. Центрифугированный бетон. - Тифлис: "Техника до Шрома", 1933. - 107 с.

105. Яковенко В.Г. Методы определения прочности центрифугированного бетона // Транспортное строительство. - 1963. - № 2. - с. 48-50.

106. Braun R. Einsatz von Fließmitteln in Betonfertigteilwerken, New von Bau. - 1976. - N 2, N 3, N 4.

107. Fracture Mechanics of Concrete // Edited by F.H. Wittman, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam. - 1983. - 661 p.

108. Hester W.T. Superplasticizers in Ready Mixed Concrete. - NRMCA Publication, 1979. N 158. January.

109. Honigmann E.J.M. Witterungseinflüsse und ihre Raffung im Kurzversuch an schleuderbetonmaststücken. Beton U. Eisen, Berlin, 1935, 34 jahrgang. Heft 19, p. 301-306.

110. Koyanagi W., Rokugo K., Vchida V., Jwage H., Strength and toughness of various types of Conerete // journal of the Society Materials Science, Japan. - vol. 31. - N 356. - p. 60-66.

111. Moksnes of. Admixtures in off shore structures. Jhe Construction Press JTD, Lancaster, England, Tirst published, 1980.

112. Nisher P. Einführung von Rüttelluftoren in fliesbeton. Betonwerk - Fertigteil - Technic, 1977, N 6. S. 285 - 287.

113. Petersson P.E. Comments on the method of Determining the Fracture Energy of Concrete by Means of Jhree - point bond tests on Hotched Beams // Lund Institute of Technology, Report TVBM-3011. - 1982. - 23 p.

114. Preprints of the International Conference of Fracture mechanics of Concrete // Lausanne. - 1985. - 836 p.

115. Tewes R. Beton mit verbesserten Eigenshaften. - Strassen und Tiefbau, 1978. - N 8.

116. Tynes W.O. Investigation of Proprierty Admixtures. - Technical Report C-77 - IVS Army Engineer Waterways Experiment Station, Wicksburg, 1977, april.

117. Leonovich S.N., Alexandrovich A.S. Testing of centrifugal concrete with non - linear methods of fracture mechanics. Proc. XXII International Conference of Young Scientists in the Field of Concrete and Reinforced Concrete. - Irkutsk. - 1990. - volume II, Part III. - p. 62 - 63.