**Нгуен Дык Винь Куанг. Модифицированный бетон для подземных сооружений прибрежной зоны с высоким содержанием сульфатов;[Место защиты: ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»], 2021**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ**

**УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ МОСКОВСКИЙ**

**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**На правах рукописи**

**НГУЕН ДЫК ВИНЬ КУАНГ**

**МОДИФИЦИРОВАННЫЙ БЕТОН ДЛЯ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ**

**ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ СУЛЬФАТОВ**

**2.1.5 Строительные материалы и изделия**

**Диссертация**

**на соискание учёной степени**

**кандидата технических наук**

**Научный руководитель**

**кандидат технических наук, доцент**

**АЛЕКСАНДРОВА**

**Ольга Владимировна**

**Москва - 2022**

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

**ВВЕДЕНИЕ 5**

**ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО ОПЫТА СОЗДАНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БЕТОНОВ ДЛЯ ПОДЗЕМНЫХ И МОРСКИХ СООРУЖЕНИЙ 12**

**1.1 Проблемы подземного строительства во Вьетнаме 12**

**1.2 Особенности бетона для подземного строительства 14**

**1.3 Воздействие коррозионной сульфатной среды на бетонные конструкции в южном**

**регионе Вьетнама 15**

**1.3.1 Источники сульфатов и низкого значения pH среды, вызывающие коррозию бетонных**

**конструкций 16**

**1.3.2 Формы сульфатной коррозии бетона 18**

**1.3.3 Коррозионная стойкость бетона в морской воде и грунтовых водах 23**

**1.4 Математические модели процессов коррозии бетона для подземных сооружений с**

**учетом воздействия агрессивных сред 25**

**1.5 Выводы по главе 1 30**

**ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ 32**

**2.1 Методы исследований 32**

**2.1.1 Рентгеноструктурный анализ 34**

**2.1.2 Метод сканирующей электронной микроскопии 34**

**2.1.3 Мет од трансм иссионной элект ронной мик роскопии (ТЭМ) 34**

**2.1.4 Анализ размеров частиц методом лазерной дифракции 35**

**2.2 Методы определения технологических характеристик бетонных смесей и физико-механических и эксплуатационных показателей бетонов на их основе 35**

**2.2.1 Определение удобоукладываемости бетонных смесей 36**

**2.2.2 Определение водопоглощения и водонепроницаемости бетонных образцов 37**

**2.2.3 Ультразвуковой импульсный метод определения прочности бетона на сжатие 38**

**2.2.4 Определение прочности бетонных образцов на сжатие и на растяжение при изгибе и**

**при раскалывании 39**

**2.2.5 Определение статического модуля упругости бетона 41**

**2.2.6 Исследование плотности структуры модифицированных бетонов 42**

**2.2.7 Определение сульфатостойкости бетонов 43**

**2.2.8 Определение стойкости бетонных образцов к коррозии выщелачивания и коррозии под действием растворов солей 45**

**2.2.9 Исследование ускоренным методом коррозионной стойкости стальной арматуры в**

**зависимости от структуры модифицированных бетонов 45**

**2.3 Характеристики используемых материалов 47**

**2.3.1 Цемент 48**

**2.3.2 Заполнители и наполнитель 49**

**2.3.3 Активные минеральные добавки 51**

**2.3.4 Добавки химические 54**

**2.4 Проектирование состава модифицированного бетона для подземных конструкций,**

**подверженных воздействию различных агрессивных сред 55**

**2.5 Выводы по главе 2 59**

**ГЛАВА 3. ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ**

**КОМПЛЕКСА МИНЕРАЛЬНЫХ ДОБАВОК ДЛЯ МОДИФИЦИРОВАНИЯ СВОЙСТВ БЕТОНА 60**

**3.1 Разработка математической модели процесса массопереноса при жидкостной коррозии**

**бетона с учетом влияния грунта прибрежной зоны 60**

**3.2 Исследование влияние золы-уноса на свойства модифицированных бетонов 69**

**3.3 Исследование влияние комплекса минеральных добавок и тонкомолотого кварцевого песка на прочностные свойства и коррозионную стойкость модифицированных бетонов 76**

**3.4 Выводы по главе 3 87**

**ГЛАВА 4. СИНТЕЗ НАНОРАЗМЕРНОГО КРЕМНЕЗЁМА ИЗ ВЫСОКОМОДУЛЬНОГО БЕЛОГО ПЕСКА И ВЛИЯНИЕ ЕГО ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НА СВОЙСТВА И КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ БЕТОНА И АРМАТУРЫ 89**

**4.1 Синтез и характеристика наночастиц кремнезема из природного белого песка 89**

**4.2 Исследование влияния наночастиц кремнезема на прочностные свойства**

**модифицированных бетонов, их стойкость к проникновению хлорид-ионов и сульфатной коррозии 93**

**4.2.1 Проектирование составов бетонных смесей с нанокремнеземом для получения**

**модифицированных бетонов 93**

**4.2.2 Определение прочностных свойств бетонов с различным содержанием**

**нанокремнезема 94**

**4.2.3 Исследование влияния наночастиц кремнезема на микроструктуру бетона 96**

**4.2.4 Исследование влияния нанокремнезема на водопоглощение бетонов 98**

**4.2.5 Влияние нанокремнезема на стойкость бетонов к проникновению хлорид-ионов .... 99**

**4.2.6 Исследование стойкости бетонов к коррозии под действием раствора сульфата**

**натрия 102**

**4.2.7 Определение сульфатостойкости бетона 106**

**4.3 Исследование влияния наночастиц и суперпластификатора на коррозионную стойкость стальной арматуры в железобетонных конструкциях 107**

**4.3.1 Причины и механизмы износа железобетона 107**

**4.3.2 Теоретическое определение электрического тока методом ускоренной коррозии .. 111**

**4.3.3 Определение силы тока при ускоренной коррозии арматуры в бетонных балках ... 111**

**4.4 Выводы по главе 4 120**

**ГЛАВА 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ АЛЬТЕРНАТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ БЕЛОГО КВАРЦЕВОГО ПЕСКА ТРАДИЦИОННОМУ РЕЧНОМУ 121**

**5.1 Обоснование возможности использования белого песка, как альтернативы речному**

**песку во Вьетнаме 121**

**5.2 Физико-механические свойства и коррозионная стойкость модифицированных бетонов, содержащих природный белый кварцевый песок в качестве замены речного**

**песка 123**

**5.2.1 Свойства природного белого песка 123**

**5.2.2 Технологические свойства бетонных смесей 123**

**5.2.3 Определение механических характеристик затвердевшего бетона 125**

**5.2.4 Исследование стойкости бетона к коррозии под действием растворов солей**

**Na2SO4 129**

**5.2.5 Испытание стальной арматуры ускоренным методом на коррозионную стойкость в образцах-балках из бетонов разработанных составов, содержащих белый кварцевый песок 130**

**5.3 Выводы по главе 5 135**

**ГЛАВА 6. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ МОДИФИЦИРОВАННОГО БЕТОНА ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ ВО ВЬЕТНАМЕ 137**

**6.1 Технологическая схема получения высокоэффективного модифицированного бетона 137**

**6.2 Экологическая и экономическая эффективность использования модифицированного бетона, произведенного во Вьетнаме 139**

**6.2.1 Расчет экономической эффективности применения разработанного**

**модифицированного бетона на основе местных сырьевых материалов Вьетнама 139**

**6.2.2 Сокращение выбросов CO2 модифицированного бетона 144**

**6.3 Выводы по главе 6 149**

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ 152**

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 155**

**ПРИЛОЖЕНИЯ 168**

**ПРИЛОЖЕНИЕ А 168**

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б 169**

**ПРИЛОЖЕНИЕ В 175**

**ПРИЛОЖЕНИЕ Г 180**

**ПРИЛОЖЕНИЕ Д 198**

**ПРИЛОЖЕНИЕ Е 199**

**ПРИЛОЖЕНИЕ Ж 200**

**ПРИЛОЖЕНИЕ З 201**

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Итоги выполненного исследования:

1. На основе изучения результатов исследований российских и зарубежных учёных установлены основные факторы, влияющие на прочностные и структурно-механические характеристики железобетона и коррозионную стойкость сооружений, находящихся в зоне прибрежных морских акваторий Вьетнама, морская среда которых имеет повышенное содержание агрессивных сульфат- и хлорид- ионов. Установлено, что основными факторами, определяющими стойкость к коррозии железобетонных конструкций, являются мероприятия, противодействующие массопереносу (диффузии) свободного гидроксида кальция из внутренней структуры бетона через слой грунта в морскую акваторию.
2. Обоснована и экспериментально доказана возможность получения бетона с модифицированной структурой, стойкого к воздействию сульфатсодержащих агрессивных сред с использованием местных для Вьетнама сырьевых материалов путем использования комплекса минеральных добавок, состоящего из золы-уноса и микрокремнезема совместно с нанокремнезёмом и тонкомолотым кварцевым порошком, который предназначен для строительства подземных сооружений прибрежной зоны с высоким содержанием сульфатов. Модифицированный бетон для строительных работ в агрессивной среде с жарко-влажными климатическими условиями Вьетнама с точки зрения прочности и долговечности может быть изготовлен из смесей с соотношением вода+суперпластификатор:вяжущее, равным 0,3, и содержанием цементирующих материалов не менее 550 кг/м3, включая от 20 до 30 % золы-уноса и от 5 до 12,5 % микрокремнезема.
3. На базе физических представлений об особенностях массопереноса гидроксида кальция в пористой структуре твёрдого тела разработана математическая модель массопроводности (выщелачивания) ионов Са2+ в системе «бетон-грунт-морская акватория», основанная на дифференциальных уравнениях нестационарной диффузии с комбинированными граничными условиями II-го и IV-го рода, позволяющая моделировать динамику полей концентраций переносимых агрессивных компонентов и продуктов реакции, а также решать обратную задачу по определению коэффициентов массопроводности и массоотдачи на основе полученных экспериментальных данных, с целью прогнозирования долговечности железобетонной конструкции.
4. Предложен режим синтеза нано^Ю2 из местных материалов Вьетнама путем разложения кварцевого песка в расплавленной соли гидроксида натрия при температуре 500°C под действием ультразвуковых волн. Предложенный метод является простым, характеризуется относительно низкой температурой реакции, равномерной дисперсией легирующих ионов
5. Доказано, что частичная замена в составе вяжущего сульфатостойкого портландцемента на нано^Ю2 в количестве 1-2% масс. повышает коррозионную стойкость стальных арматурных стержней в бетоне. С точки зрения микроструктуры бетона, введение нано- SiO2 способствует ее уплотнению за счет снижения пористости (полная капиллярная пористость составляет 1,1 - 0,96%), что приводит к повышению прочности и снижению водопоглощения до 0,44% по массе модифицированных бетонов. Введение 2 % масс. нанокремнезема приводит к большему уплотнению структуры модифицированного бетона по сравнению с бетоном, содержащим 1% масс. Нанокремнезема (полная капиллярная пористость 0,96%, водопоглощениепо массе 0,377%), а также с бетоном контрольного состава (полная капиллярная пористость 1,3%, водопоглощение по массе 0,548 %), не содержащим нанокремнезем.

Наблюдается меньшая (на 49,5%) потеря массы стали из-за коррозии в бетонных образцах, содержащих 1% масс. нано^Ю2; длина, ширина и глубина питтинга трещин, вызванных коррозией, также были ниже в образцах, содержащих 1% масс. нанокремнезема.

1. Доказано, что более доступный белый кварцевый песок может быть использован в качестве мелкого заполнителя как альтернатива более дорогому речному песку. Образцы бетона, содержащие в качестве мелкого заполнителя природный белый кварцевый песок, показали более высокую стойкость к проникновению хлорид-ионов из окружающей среды. Значение проницаемости для ионов хлора структуры бетонных образцов, содержащих в качестве мелкого заполнителя 100% белого песка, на 292 % ниже, чем у бетонных образцов, содержащих речной песок. Добавление 1% и 1,5% нанокремнезема от массы цемента в бетонные смеси, содержащие белый песок в качестве мелкого заполнителя, приводит к еще большему повышению стойкости бетонов к проникновению хлорид-ионов.

Установлено, что модифицированные бетоны на белом песке обладает повышенной стойкостью к сульфатной коррозии по сравнению с бетонами на речном песке. Значение прочности на сжатие образцов бетонов на белом песке, подвергнутых воздействию 10%-ного раствора Na2SO4, снизилось на 2,4%, в то время как у бетонных образцов на речном песке - на 5,3%.