

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 666.972

**ГОЛШАНИ**

**Масуд**

**СТРУКТУРА БЕТОНА С ДОБАВКАМИ ИНГИБИТОРОВ КОРРОЗИИ  
СТАЛИ И ЕГО ЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА ПО ОТНОШЕНИЮ  
К СТАЛЬНОЙ АРМАТУРЕ**

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

по специальности

05.23.05 – Строительные материалы и изделия

Минск, 2012

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

- Научный руководитель** **Бабицкий Вячеслав Вацлавович,**  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Технология бетона  
и строительные материалы» Белорусского  
национального технического университета
- Официальные оппоненты:** **Веренько Владимир Адольфович,**  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Проектирование дорог»  
Белорусского национального технического  
университета;
- Марковский Михаил Филиппович,**  
кандидат технических наук, доцент, директор  
РУП «Институт БелНИИС»
- Оппонирующая организация** Учреждение образования «Брестский  
государственный технический университет»

Защита состоится «30» ноября 2012 г. в 16<sup>00</sup> часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.05 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65, к. 1, ауд. 202. Тел./факс 8 (017) 265-95-87.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью учреждения, следует направлять на имя ученого секретаря совета по адресу: 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65, Белорусский национальный технический университет.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «    » октября 2012 г.

Ученый секретарь  
совета по защите диссертаций,  
кандидат химических наук, доцент

П.И. Юхневский

© Голшани М., 2012

© Белорусский национальный  
технический университет, 2012

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из уникальных свойств железобетона является его потенциальная долговечность. Однако капиллярно-пористое пространство цементного камня не создает надежного барьера для попадания в тело бетона различных агрессивных веществ. Так, например, углекислый газ, присутствующий в атмосфере Земли, достаточно энергично взаимодействует с продуктами гидратации цемента, образуя соединения, водные растворы которых имеют реакцию, близкую к нейтральной. И при достижении прокарбонизированным (нейтрализованным) слоем поверхности арматуры она активируется и становится возможным начало процесса коррозии стали.

С другой стороны, ионы хлора, попадающие к поверхности стали с компонентами бетонной смеси, с составляющими химических добавок, а также извне, в процессе эксплуатации железобетонных конструкций в агрессивных условиях, при определенном (критическом) количестве также вызывают активацию стальной арматуры.

В бетоноведении в последнее время развивается перспективное направление увязывания свойств бетона, включая и химические добавки, с его структурными особенностями, то есть структура бетона определяет весь комплекс физико-механических характеристик материала, его проницаемость, морозостойкость и коррозионную стойкость. Вместе с тем, влияние структуры цементного камня и бетона на их защитные свойства по отношению к стальной арматуре исследовано недостаточно. В изучении этой взаимосвязи, получении системы расчетных формул видится одно из направлений как повышения, так и прогнозирования долговечности железобетона.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Связь работы с крупными научными программами и темами.** Настоящая работа выполнялась в соответствии с государственной научно-технической программой «Разработка технологий рециклинга вторичных ресурсов и ресурсосберегающая модернизация промышленных технологий многоотраслевого назначения» (ГНТП «Ресурсосбережение-2015»), задание 1.99 «Разработать и освоить ресурсосберегающую технологию изготовления железобетонных изделий и конструкций на основе оптимизации режимов тепловой обработки бетона, тепловой реабилитации пропарочных камер и применения отходов промышленного производства».

**Цель и задачи исследования.** Целью работы являлась разработка уточненных зависимостей, положенных в основу обобщенной модели для

оценки и прогнозирования коррозионной стойкости железобетонных конструкций при воздействии углекислого газа и ионов хлора.

Для достижения поставленной цели решали следующие задачи:

- экспериментально исследовать защитные свойства бетона различной структуры без химических добавок и с добавками ингибиторов коррозии стали, в том числе и с добавкой полифункционального действия, отхода химического производства, по отношению к стальной арматуре железобетона;

- экспериментально исследовать кинетику изменения структурно-механических характеристик (тепловыделения цемента, пластической прочности, водопоглощения, показателя среднего размера открытых капиллярных пор, средней плотности и прочности на сжатие) цементного камня при твердении в естественных условиях;

- разработать упрощенную установку и соответствующую методику для исследования кинетики карбонизации бетона и изучить на ней влияние структурных особенностей цементного камня и добавок ингибиторов коррозии стали на интенсивность нейтрализации материала;

- основываясь на полученных результатах, определить и математически описать влияние основных структурных факторов, оказывающих влияние на защитные свойства бетона по отношению к стальной арматуре;

- предложить метод проектирования состава бетона с элементами прогнозирования коррозионной стойкости стальной арматуры железобетона;

- предложить программный продукт для комплексного проектирования состава бетона и оценки долговечности железобетонных конструкций при воздействии углекислого газа и хлор-ионов;

- оценить достоверность предлагаемой системы прогноза.

**Объектом исследования** являются цементный камень, бетон и стальная арматура при воздействии агрессивных сред, содержащих углекислый газ и ионы хлора.

**Предметом исследования** является метод прогнозирования коррозионной стойкости бетонных и железобетонных конструкций при воздействии углекислого газа и ионов хлора.

**Положения, выносимые на защиту:**

- результаты экспериментальных исследований коррозионного состояния стальной арматуры в бетонах различного состава, процессов его структурообразования: кинетики тепловыделения цемента, пластической прочности цементного теста, прочности на сжатие, водопоглощения, показателей однородности и среднего размера капиллярных пор, средней плотности цементного камня, а также интенсивности карбонизации цементного камня с добавками ингибиторов коррозии стали, включая и отход химического

производства полифункционального действия, – ускоритель твердения бетона и ингибитор коррозии стали;

- упрощенная методика исследования кинетики карбонизации бетона;
- зависимость для расчета критического количества хлор-ионов в связи с капиллярной и общей пористостью бетона;
- зависимость для расчета эффективного коэффициента диффузии углекислого газа в бетоне, как функции капиллярной пористости и объема цементного камня;
- методика проектирования составов тяжелого бетона, в части прогнозирования коррозионной стойкости стальной арматуры;
- программный продукт для комплексного проектирования состава бетона и прогнозирования коррозионного состояния стальной арматуры железобетонных конструкций.

**Личный вклад соискателя.** Диссертационная работа представляет собой самостоятельный труд соискателя. Автору принадлежат выбор направления и постановка задач исследований, выбор экспериментальных методик и проведение эксперимента, анализ, обобщение и интерпретация полученных результатов исследований.

Метод проектирования состава бетона, компьютерная программа «ВКТ–Коррозия» разработаны при участии научного руководителя.

**Апробация результатов диссертации.** Основные положения и результаты работы были доложены, обсуждены и опубликованы в трудах следующих конференций и семинаров: 60-й Международной научно-технической конференции «Наука – образованию, производству, экономике» (г. Минск, 27 апреля 2010 г.), Junior Researchers Conference «EUROPEAN AND NATIONAL CONTEXT IN RESEARCH» (27–28 April 2011 Polotsk State University), Республиканской научной конференции студентов и аспирантов Республики Беларусь «НИРС-2011» (18 октября 2011 г.), третьем Международном симпозиуме «Проблемы современного бетона и железобетона» (г. Минск, 9–11 ноября 2011 г.), Международной научно-технической конференции «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (г. Могилев, 19–20 апреля 2012 г.).

**Опубликованность результатов диссертации.** Основные положения диссертационной работы отражены в 11 публикациях, в том числе 4 статьи в рецензируемых научных журналах (всего 1,2 авторских листа), 7 – в материалах и тезисах докладов научно-технических конференций.

Получен патент на полезную модель № 8033 «Установка для определения кинетики карбонизации бетона». Разработана компьютерная программа «ВКТ–

Коррозия», зарегистрированная в Центре интеллектуальной собственности РБ (свидетельство № 399).

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, 5 глав, заключения, списка литературных источников и приложения.

Объем диссертации – 97 листов машинописного текста. Работа содержит 125 рисунков, 26 таблиц, 1 приложение. Список литературных источников включает 233 наименований, из которых 11 – авторские работы.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Первая глава** посвящена аналитическому обзору литературы.

Критическое количество хлор-ионов в бетоне, принятое равным 0,4 % от массы цемента, определяет момент активации стальной арматуры и ее последующей коррозии. В то же время имеются воззрения о том, что эта величина зависит от многих факторов, как внутренних, так и внешних, что пока не нашло должного отражения в литературе. Нахождение взаимосвязи структурных (или иных) особенностей бетона с коррозионным состоянием стальной арматуры позволило бы существенно повысить точность прогнозирования долговечности железобетона, а также упорядочить область использования химических добавок, имеющих в своем составе хлор-ионы, например, противоморозных.

Для повышения долговечности железобетонных конструкций широко применяют добавки ингибиторов коррозии стали, повышающие критическое количество хлор-ионов. Данной проблеме посвящены работы С.Н. Алексева, Н.К. Розенталя, В.Б. Ратинова и др. Однако воздействие этих добавок на технологические свойства цементного теста (бетонной смеси), цементного камня (бетона) изучено недостаточно, что снижает возможности инженерам-технологам правильно назначать параметры технологического процесса производства железобетонных изделий и конструкций. Влияние ингибиторов коррозии стали на интенсивность карбонизации бетона также практически не изучено.

Исследования карбонизации цементного бетона проводятся лишь в ограниченном перечне лабораторий (с применением методики, разработанной Н.К. Розенталем), что связано со сложностью методики, дороговизной и дефицитностью оборудования и приборов. Разработка упрощенной методики определения глубины карбонизации цементного камня или бетона позволит проводить соответствующие исследования в рядовых научных подразделениях, вплоть до заводских лабораторий и тем самым облегчить прогнозирование

долговечности железобетонных конструкций при их эксплуатации в средах, содержащих углекислый газ.

Изучение связи эффективного коэффициента диффузии углекислого газа в бетоне с его различными структурными особенностями может позволить уточнить формулы для соответствующих расчетов. В конечном итоге будут созданы предпосылки для совершенствования компьютерной программы «Технолог» в части прогнозирования железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в средах, содержащих хлор-ионы и углекислый газ.

**Во второй главе** приведены характеристики используемых в экспериментах материалов, основные методики проведения исследований, средства измерений и испытательное оборудование, последовательность статистической оценки полученных результатов.

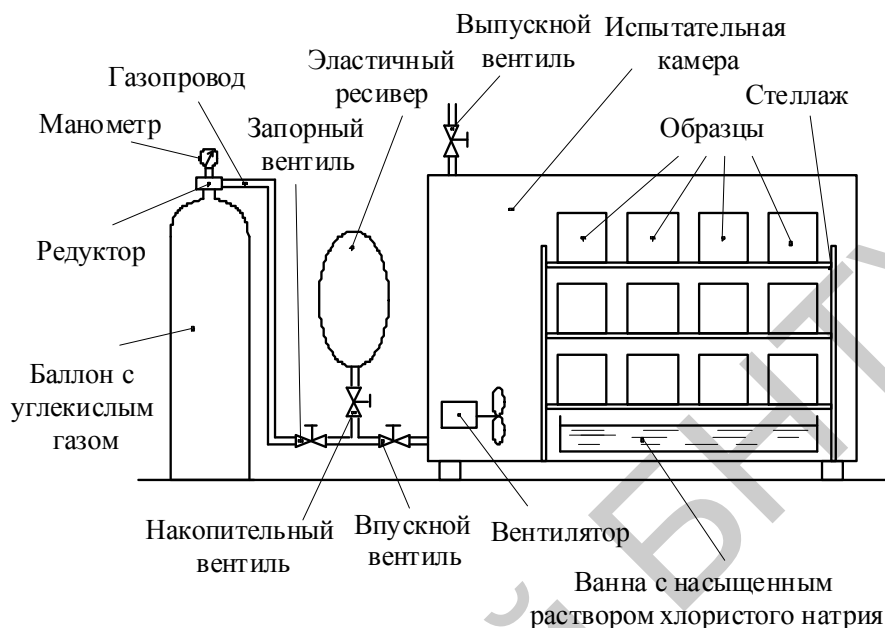
В качестве добавок ингибиторов коррозии стали использовали нитрит натрия (НН), тетраборат натрия (ТБН) и тринатрийфосфат (ТНФ). Кроме того в качестве добавки полифункционального действия изучали отход производства Гродненского химического завода, условно названный ОХП (отход химического производства), представляющий собой в основном смесь нитритов и карбонатов в соотношении 7:3).

Исследования структурообразования цементного теста проводили с использованием методик: калориметрии (на установке, разработанной на ОАО «Завод СЖБ № 1» г. Минска), пластической прочности, а цементного камня – кинетики водопоглощения, показатель среднего размера капиллярных пор  $\lambda$  и показатель однородности открытых капиллярных пор  $\alpha$ , средней плотности. Степень гидратации цемента оценивали по количеству химически связанной воды, определяемой прокаливанием проб цементного камня в муфельной печи.

Исследования коррозионного состояния стальной арматуры проводили с помощью потенциостатического метода в соответствии с действующим стандартом.

Для исследования диффузионной проницаемости цементного камня и бетона при воздействии углекислого газа разработана специальная установка (рисунок 1). В отличие от установки, предложенной Н.К. Розенталем, испытания образцов проводят в течение 10 суток в среде со 100-процентной концентрацией углекислого газа. Для поддержания однородности агрессивной среды в емкости при незначительном избыточном давлении предложен ресивер, выполняемый из эластичного газонепроницаемого материала. Это существенно упростило и удешевило установку, сделало ее доступной для рядовых лабораторий. В таблице 1 приведены сравнительные данные по глубине карбонизации цементного камня различной плотности и

рассчитанному эффективному коэффициенту диффузии (ЭКД) углекислого газа, подтверждающие приемлемость предложенной установки и методики.



**Рисунок 1 – Схема предлагаемой установки для исследования кинетики карбонизации бетона**

Таблица 1 – Характеристики цементного камня

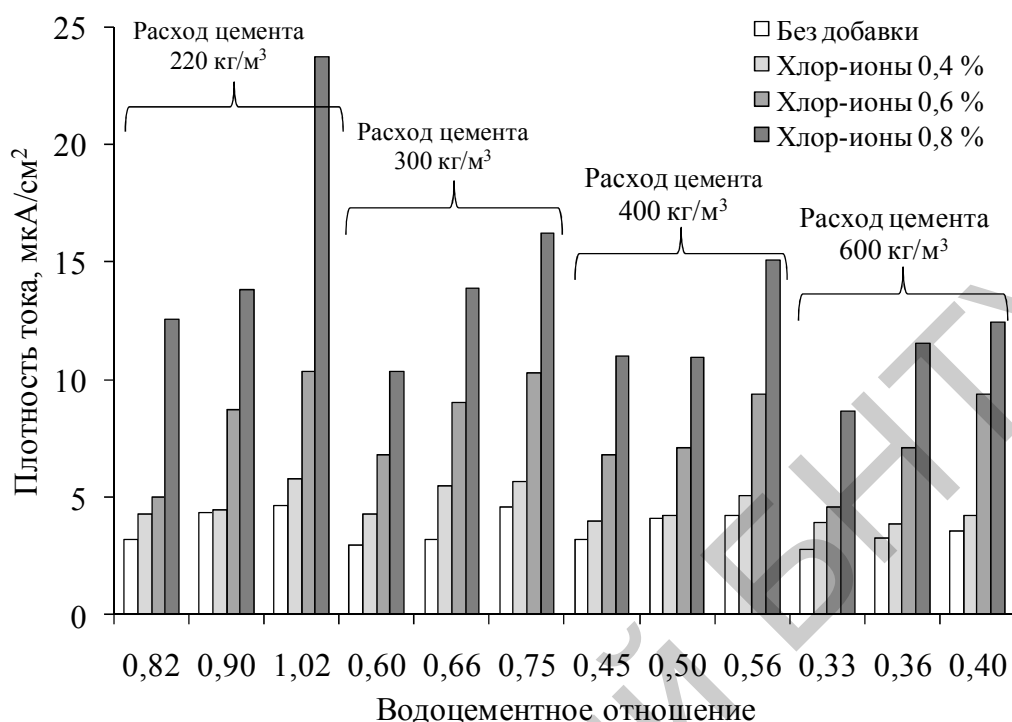
| В/Ц  | Глубина карбонизации цементного камня в мм |                       | Эффективный коэффициент диффузии углекислого газа в цементном камне ( $D_{CO_2}$ ) в $см^2/с$ |                       |
|------|--|-----------------------|---|-----------------------|
|      | Классическая методика                      | Предлагаемая методика | Классическая методика   | Предлагаемая методика |
| 0,25 | 1,4  | 3,9                   | $2,02 \cdot 10^{-05}$   | $2,19 \cdot 10^{-05}$ |
| 0,30 | 2,7  | 7,2                   | $6,89 \cdot 10^{-05}$   | $6,86 \cdot 10^{-05}$ |
| 0,35 | 4,1  | 12,1                  | $1,47 \cdot 10^{-04}$   | $1,79 \cdot 10^{-04}$ |
| 0,40 | 7,0  | 18,5                  | $3,98 \cdot 10^{-04}$   | $3,89 \cdot 10^{-04}$ |

**В третьей главе** представлены результаты изучения связи структурных особенностей цементного камня и бетона с коррозионным состоянием стальной арматуры.

В опытах использовали 12 составов бетона. Расход цемента изменялся от 220 до 600 кг, а водоцементное отношение – от 0,33 до 1,02, то есть охватывался практически весь диапазон используемых в настоящее время бетонов. Подвижность бетонных смесей составляла от 2 до 21 см, что обеспечивало слитную структуру бетона. Содержание хлор-ионов (0,4, 0,6 и 0,8 % от массы цемента) регулировалось введением добавки хлорида натрия. Влияние основных технологических факторов (расход цемента и



водоцементное отношение) на плотность тока при потенциале +300 мВ (через 20 циклов насыщения/высушивания) представлено на рисунке 2.



**Рисунок 2 – Влияние водоцементного отношения на плотность тока при потенциале +300 мВ**

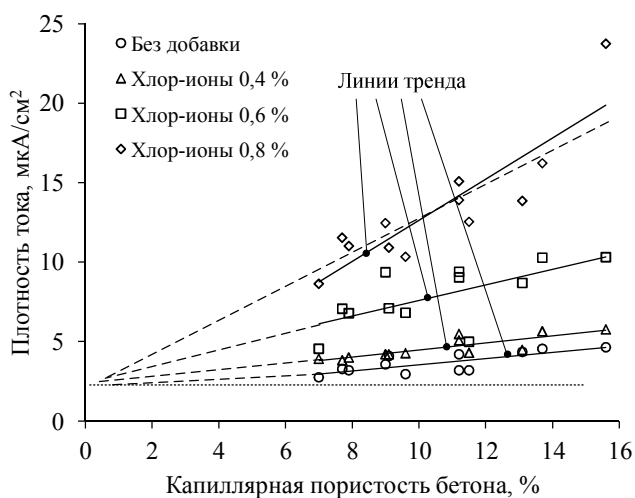
Как и ожидалось, склонность стальной арматуры к коррозии возрастает с увеличением водоцементного отношения, сокращением расхода цемента (то есть суммарно со снижением плотности бетона), а также повышением количества хлор-ионов.

Была сделана попытка связать состояние арматуры с общим содержанием хлор-ионов в бетоне ( $\text{кг/м}^3$ ), их содержанием в капиллярах бетона, содержанием «свободных» хлор-ионов (с учетом их частичного связывания в гидрохлоралюминаты), успеха не имевшая. Связь плотности тока ( $i$ ) с водоцементным отношением ( $В/Ц$ ), прочностью бетона ( $f_b$ ), его морозостойкостью ( $F$ ) и водонепроницаемостью ( $W$ ), оцениваемая по коэффициенту корреляции, также оказалась недостаточной (таблица 2).

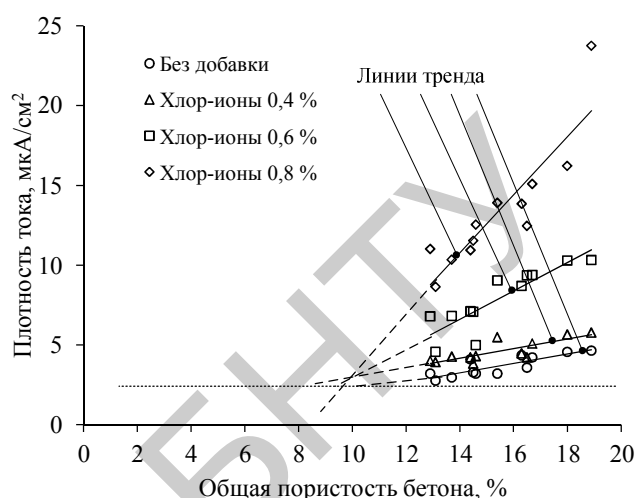
**Таблица 2 – Коэффициент корреляции**

| Взаимосвязь | Без добавки | Содержание хлор-ионов, % от массы цемента |       |       |
|-------------|-------------|---|-------|-------|
|             |             | 0,4                                       | 0,6   | 0,8   |
| $В/Ц - i$   | 0,61        | 0,67                                      | 0,44  | 0,76  |
| $f_b - i$   | -0,57       | -0,67                                     | -0,47 | -0,62 |
| $F - i$     | -0,49       | -0,71                                     | -0,45 | -0,57 |
| $W - i$     | -0,51       | -0,71                                     | -0,47 | -0,58 |
| $\Pi_k - i$ | 0,77        | 0,84                                      | 0,67  | 0,77  |
| $\Pi_0 - i$ | 0,85        | 0,81                                      | 0,87  | 0,89  |

В принципе, плотность бетона может характеризоваться и такими общепринятыми структурными параметрами, как капиллярная и общая пористость. На рисунках 3 и 4 представлены графики, связывающие их расчетные величины с плотностью тока.



**Рисунок 3 – Зависимость плотности тока при потенциале +300 мВ от капиллярной пористости бетона**



**Рисунок 4 – Зависимость плотности тока при потенциале +300 мВ от общей пористости бетона**

Нанесенные на полученные значения линии тренда для различных величин содержания хлор-ионов пересекаются для каждого графика практически в одной точке. Это, а также их достаточно тесная корреляция (таблица 2) создали предпосылки для получения соответствующих формул. Если принять, что критерий плотности тока, соответствующий переходу стальной арматуры из пассивного состояния в активное, составляет около 10 мкА/см<sup>2</sup>, то, например, при контроле по капиллярной пористости бетона ( $\Pi_k$  в дол. ед.) предельное содержание хлор-ионов составляет:

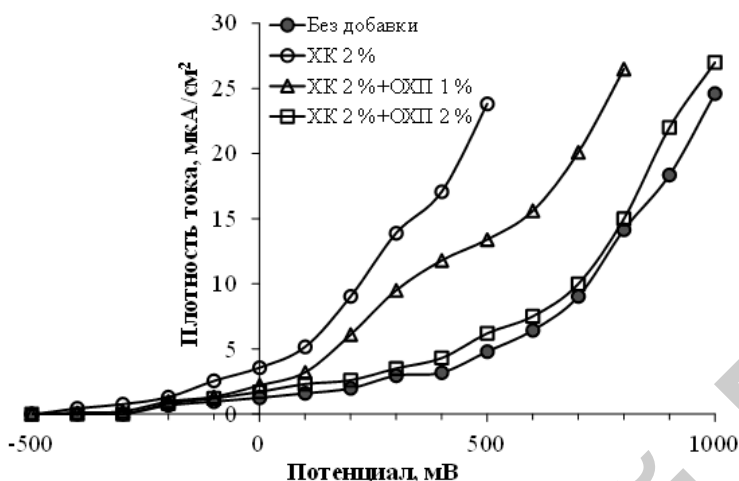
$$Cl_{кр}^{бд} = 3 \sqrt{\frac{k_k}{\Pi_k}}, \% \quad (1)$$

где  $k_k$  - поправочный коэффициент (для исследованного цемента может быть принят равным 0,0335).

Таким образом, получены простые формулы, позволяющие еще на стадии проектирования состава бетона рассчитать, в зависимости от его пористости (капиллярной или общей), критическое содержание хлор-ионов, вызывающее возможность перехода стальной арматуры из пассивного состояния в активное.

Проведены исследования коррозионного состояния стальной арматуры с добавкой ОХП. Для выявления ингибирующего эффекта анодные поляризационные кривые снимали в бетоне без добавок и, как оказалось, плотность тока была минимальной (рисунок 5). Введение в бетонную смесь

добавки хлорида кальция (ХК) в количестве 2 % от массы цемента вызвало активацию стали – плотность тока при потенциале +300 мВ более 10 мкА/см<sup>2</sup>. А одновременное введение 1, а тем более 2 % добавки ОХП подавляет активирующее действие хлор-ионов. Следовательно, добавка ОХП может быть отнесена к ингибиторам коррозии стали.



**Рисунок 5 - Коррозионное состояние стальной арматуры в бетоне**

Получена также формула, позволяющая рассчитывать критическое количество хлор-ионов в бетоне с добавкой ингибитора ( $CI_{кр}^и$  в % от массы цемента) в зависимости от критического количества хлор-ионов в бетоне без добавки ингибитора ( $CI_{кр}^{бд}$  в % от массы цемента), коэффициента эффективности добавки ингибитора ( $k_{эф}^и$  в д. ед.) и дозировки добавки ( $D$  в % от массы цемента):

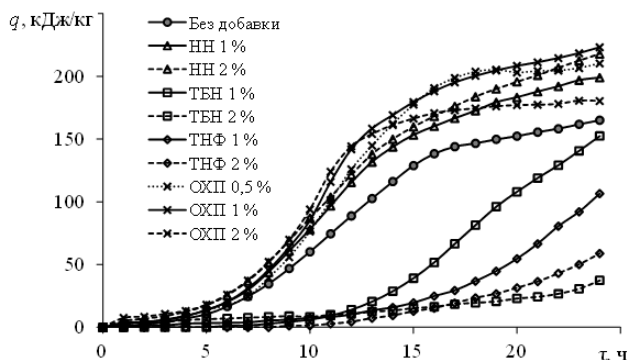
$$CI_{кр}^и = CI_{кр}^{бд} + k_{эф}^и \cdot D, \% \quad (2)$$

Коэффициент эффективности исследованных добавок: 0,40, 0,35, 0,33 и 0,30 для добавок НН, ОХП, ТНФ и ТБН соответственно. Данная формула может быть использована как для расчета содержания противоморозных добавок, содержащих хлор-ионы, так и при прогнозировании долговечности железобетона при внешней хлоридной агрессии.

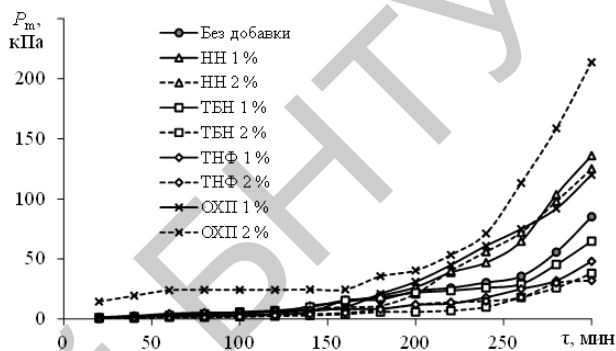
**В четвертой главе** рассмотрены вопросы структурообразования цементного теста и камня с добавками ингибиторов коррозии стали.

Как оказалось, добавка ОХП (пример для цементного теста с относительным водосодержанием, равным 1,3, приведен на рисунках 6–9) интенсифицирует процессы тепловыделения цемента, а, следовательно, и гидратационные процессы. Вместе с тем добавки ТБН и ТНФ достаточно отчетливо замедляют процессы структурообразования цементного теста.

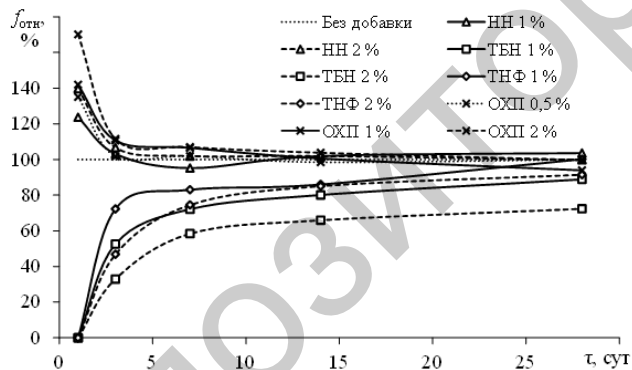
Полученные данные полностью подтверждаются и результатами исследования кинетики изменения пластической прочности цементного теста. Надо отметить, что попытка связать тепловыделение цемента с величиной пластической прочности цементного теста успеха не имела. Исследования кинетики изменения прочности цементного камня, водопоглощения, структурных особенностей и средней плотности также подтвердили результаты, полученные при оценке тепловыделения цемента.



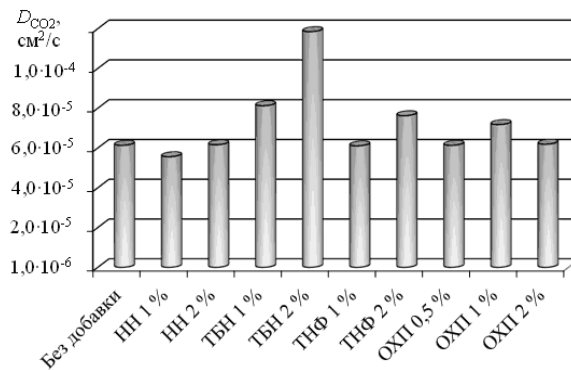
**Рисунок 6 – Удельное тепловыделение цемента в твердеющем цементном тесте**



**Рисунок 7 – Нарастание пластической прочности цементного теста**



**Рисунок 8 – Изменение прочности цементного камня ( $f_{цк}$ )**



**Рисунок 9 – Эффективный коэффициент диффузии углекислого газа в цементном камне ( $D_{CO_2}$ )**

Можно констатировать, что добавка ОХП для начальных сроков твердения (1 сутки) стоит в ряду достаточно эффективных добавок-ускорителей. Однако со временем (более поздние сроки твердения) эффективность добавки, как ускорителя твердения, снижается.

Оценка эффективного коэффициента диффузии (ЭКД) углекислого газа, проведенная по предложенной методике (рисунок 9), показала, что добавка

ТБН явно, в сравнении с другими добавками, увеличивает диффузионную проницаемость цементного камня.

Другие же добавки ингибиторов коррозии стали, включая и ОХП, сравнительно мало влияют на диффузионные характеристики цементного камня (а, следовательно, и бетона) при воздействии углекислого газа.

Совместно с ОАО «Завод СЖБ № 1» г. Минска проведены исследования влияния добавок ингибиторов коррозии стали на режим тепловлажностной обработки бетона и в результате оказалось, что они влияют на продолжительность предварительной выдержки изделий перед пропариванием.

Проведены эксперименты по оценке глубины карбонизации цементного камня (21 состав в диапазоне водоцементных отношений от 0,25 до 0,42). Параллельно рассчитывали степень гидратации цемента и капиллярную пористость цементного камня по системе формул, предложенных проф. В.В. Бабицким. В результате получена достаточно простая формула, связывающая ЭКД углекислого газа в цементном камне с его расчетной капиллярной пористостью ( $\Pi_k$  в дол. ед.).

$$D_{CO_2к} = k_{CO_2ц} \cdot \Pi_k^2, \text{ см}^2/\text{с}, \quad (3)$$

где  $k_{CO_2ц}$  – коэффициент, зависящий от вида цемента и для цемента производства ОАО «Красносельскстройматериалы» может быть принят равным  $0,0025 \text{ см}^2/\text{с}$ .

Полагая, что ЭКД углекислого газа в бетоне определяется как диффузионной характеристикой цементного камня, так и его объемом ( $V_k$  в дол. ед.), получена следующая формула:

$$D_{CO_2б} = \frac{k_{CO_2ц} \cdot \Pi_k^2}{\sqrt[3]{V_k^2}}, \text{ см}^2/\text{с}. \quad (4)$$

Представленная зависимость (4) открывает возможность для прогнозирования глубины карбонизации бетона еще на стадии проектирования состава бетона.

**В пятой главе** отражены конечные результаты исследований.

Предложен метод проектирования состава бетона. В любом методе должно найти отражение два основных момента: расчет прочности бетона и водосодержания бетонной смеси, обеспечивающего заданную удобоукладываемость.

В отличие от других формул, описанных в литературе, известный «закон водоцементного отношения» может быть представлен не только как зависимость прочности бетона ( $f_b$  в МПа) от  $(B/C)_b$ , но и с учетом ряда иных факторов:

$$f_6 = \frac{0,3 \cdot k_3 \cdot k_r \cdot f_{ц}}{k_{то} \cdot \left[ \left( \frac{B}{Ц} \right)_6 - 0,08 \right]}, \text{ МПа}, \quad (5)$$

где  $k_3$  – коэффициент, учитывающий влияние заполнителей на прочность бетона, дол. ед.;  $k_r$  – коэффициент, зависящий от степени гидратации цемента, дол. ед.;  $f_{ц}$  – активность цемента, МПа;  $k_{то}$  – коэффициент, зависящий от отпускной прочности бетона, дол. ед.

Преимущество формулы (5) заключается в учете отпускной прочности бетона и возможности рассчитывать прочностные характеристики бетона не только в проектном возрасте, но и в иные сроки.

«Закон постоянства водопотребности бетонной смеси», лежащий в основе большинства методов подбора состава бетона, имеет ряд недостатков. Поэтому для совершенствования расчетов выявлена взаимосвязь удобоукладываемости бетонной смеси, водоцементного отношения бетонной смеси и объема цементного теста ( $V_T$ ), которая может быть описана эмпирической формулой:

– для подвижной смеси (ОК в см):

$$V_T = \frac{0,17 \cdot ОК^{0,1}}{\sqrt[3]{\left[ \left( \frac{B}{Ц} \right)_6 \right]^2}} + 0,07 \cdot \left( \frac{B}{Ц} \right)_6^3, \text{ м}^3, \quad (6)$$

– для жесткой (Ж в с):

$$V_T = \frac{0,2}{\sqrt[3]{\left[ \left( \frac{B}{Ц} \right)_6 \right]^2}} \cdot Ж^{0,1} + 0,07 \cdot \left( \frac{B}{Ц} \right)_6^3, \text{ м}^3. \quad (7)$$

В дальнейшем по общеизвестным формулам рассчитывают расходы цемента и воды. Для расчета расходов песка и щебня в основу метода положены закономерности, полученные В.П. Сизовым, и связывающие оптимальную долю песка в смеси заполнителей с объемом цементного теста и иными легко учитываемыми влияющими факторами.

Как оказалось, предложенный метод достаточно точен. Так, например, отклонение рассчитываемых расходов цемента от фактических (проанализировано на 78 составах бетона), характеризуется средним квадратичным отклонением 9,8 кг при коэффициенте вариации 2,8 %. Поэтому метод может быть использован как при проектировании составов бетона для конструкций в сборном и монолитном вариантах (в том числе и с химическими добавками), так и в системе формул для расчета долговечности железобетона.

Полученные формулы логично дополняют модели, разработанные С.Н. Алексеевым, Н.К. Розенталем, В.Ф. Степановой для прогнозирования коррозионного состояния железобетонных конструкций при агрессивном воздействии углекислого газа и хлор-ионов.

Так, для расчета глубины карбонизации бетона ими предложена общеизвестная апробированная зависимость:

$$x = \sqrt{\frac{2 \cdot c \cdot \tau \cdot D_{\text{CO}_2}}{m_0 \cdot \frac{\text{Ц}}{300}}}, \text{ см}, \quad (8)$$

где  $c$  – концентрация углекислого газа, доли ед.;  $\tau$  – продолжительность воздействия газа на бетон, с;  $m_0$  – реакционная емкость бетона для бетона с расходом цемента 300 кг в 1 м<sup>3</sup>, см<sup>3</sup>/см<sup>3</sup>; Ц – расход цемента в 1 м<sup>3</sup> бетона, кг.

Реакционная емкость в (8) представляет собой постоянную величину, равную примерно 42 см<sup>3</sup>. Однако, если принять, что карбонизируется не весь бетон, а только продукты гидратации цемента, то выражение (8) можно записать следующим образом:

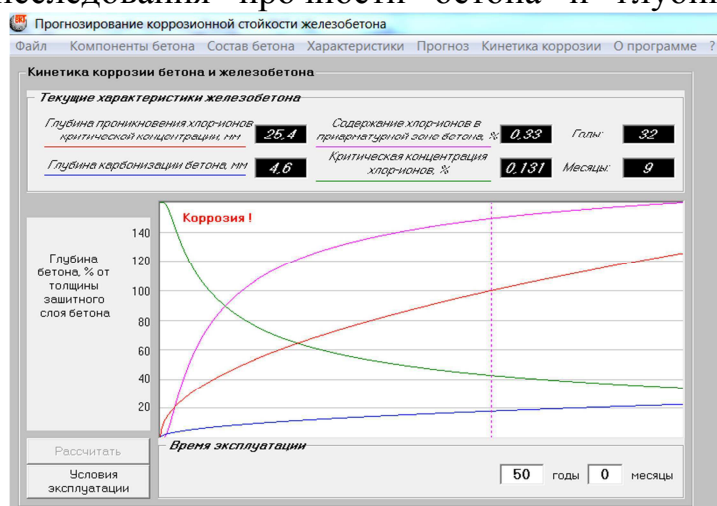
$$x = k_t \cdot k_\omega \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot c \cdot \tau \cdot D_{\text{CO}_2}}{m_{\text{пр}} \cdot \alpha \cdot \text{Ц} \cdot (1 - \eta)}}, \text{ см}, \quad (9)$$

где  $m_{\text{пр}}$  – реакционная емкость продуктов гидратации цемента, см<sup>3</sup>/кг;  $\alpha$  – степень гидратации цемента, дол. ед.;  $\eta$  – содержание инертных минеральных добавок в цементе, дол. ед.

Коэффициент  $k_t$  в (9) учитывает влияние температуры эксплуатационной среды, а  $k_\omega$  – влажности. Они рассчитываются по известным формулам, приведенным в работах Н.К. Розенталя и В.Ф. Степановой. Нами также проведены исследования глубины карбонизации цементного камня, выдержанного в течение месяца среде с относительной влажностью от 20 до 100 %. И полученные результаты подтвердили известную экстремальную зависимость интенсивности процессов карбонизации бетона от относительной влажности воздуха (максимум приходится на диапазон 40–70 %).

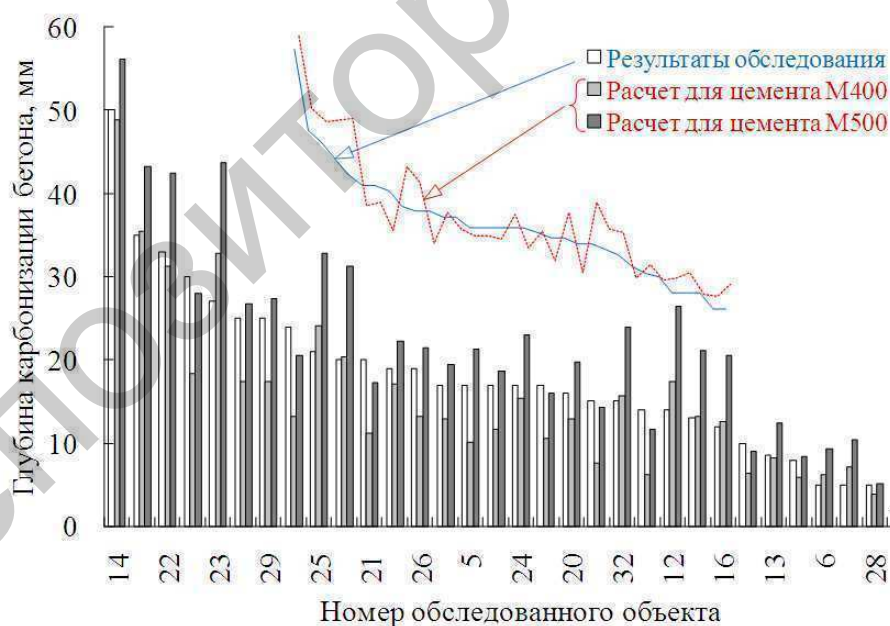
Расчет интенсивности накопления хлор-ионов в приарматурной зоне бетона осуществляется по известным моделям, предложенным российскими учеными. Но начало коррозии определяется не моментом превышения количества хлор-ионов величины 0,4 % от массы цемента, а величинами, рассчитываемыми по (1) или (2). Для реализации системы полученных и базовых формул, позволяющих рассчитывать состав бетона и долговечность железобетона, разработан программный продукт «ВКТ–Коррозия», являющийся модификацией компьютерной программы «ВКТ–Технолог», одно из окон которого представлено на рисунке 10.

В ГП «БелДорНИИ» РБ проведены достаточно обширные натурные исследования прочности бетона и глубины его карбонизации в железобетонных конструкциях автодорожных мостов Республики Беларусь, построенных начиная с 1951 года.



**Рисунок 10 – Расчет процессов карбонизации бетона защитного слоя и накопления хлор-ионов в приарматурной зоне**

С помощью программного продукта по фактическим величинам прочности бетона (для цементов марок 400 и 500) рассчитывали составы бетона и глубину карбонизации бетона (рисунок 11). Можно отметить, что результаты вполне удовлетворительны, что подтверждается и статистическими выкладками. Так, коэффициент вариации отклонений расчетных данных от фактических составил 26 %, что, на наш взгляд, приемлемо для практических расчетов.



**Рисунок 11 – Фактическая и расчетная глубина карбонизации бетона в железобетонных автодорожных мостах Республики Беларусь**

Попытка же связать глубину карбонизации бетона с его прочностью успеха не имела, что еще раз подтверждает то, что прочностные



характеристики бетона не могут однозначно определять его склонность к карбонизации.

Коме того рассчитанные по предлагаемой методике результаты сопоставлялись с глубиной карбонизации бетона, рассчитанной по формуле К. Кишитани, номограмме, предложенной Н.К. Розенталем, по различным моделям (Schiessel, Bob, De Sitter, Papadakis), обобщенным проф. С.Н. Леоновичем, и показали достаточную точность.

В течение августа 2011 г. – апреля 2012 г. компьютерная программа «ВКТ–Коррозия» тестировалась при изготовлении фундаментов, колонн и перекрытий на одном из строительных объектов (общим объемом около 2000 м<sup>3</sup>) Исламской Республики Иран. Эксплуатироваться железобетонных конструкций будут в условиях воздействию солей-хлоридов и углекислого газа. Как оказалось, точность расчета составов бетона достаточна – коэффициент вариации отклонений рассчитанных величин прочности бетона от фактических колебался в пределах от 8 до 17 %.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **Основные научные результаты диссертации**

1. Получены результаты экспериментальных исследований коррозионного состояния стальной арматуры в бетонах различного состава, процессов структурообразования и интенсивности карбонизации цементного камня с добавками ингибиторов коррозии стали, включая и отход химического производства (добавка ОХП). Установлено, что добавка ОХП имеет полифункциональные свойства, являясь ускорителем твердения цементного камня и бетона и ингибитором коррозии стали. Показана необходимость учета влияния химических добавок при назначении режимов тепловлажностной обработки бетона [1, 2, 3, 4, 7, 10, 11].

2. Анализ анодных поляризационных кривых стальной арматуры в бетоне с расходом цемента от 220 до 600 кг и водоцементным отношением от 0,33 до 1,02 позволил установить устойчивую связь критического количества хлор-ионов и пористости бетона. Это позволяет перейти от постоянной величины критического количества хлор-ионов, принимаемой для армированных конструкций равной 0,4 % от массы цемента, к изменяющейся в зависимости от структурных особенностей бетона [11].

3. Результаты исследования кинетики карбонизации цементного камня по предложенной методике позволили уточнить зависимость для расчета эффективного коэффициента диффузии углекислого газа как функции капиллярной пористости цементного камня и его объема в 1 м<sup>3</sup> бетона. Это дает

возможность отказаться от экспериментального определения эффективного коэффициента диффузии или его произвольного назначения, основываясь на интуитивных предположениях и, следовательно, повысить точность расчетов [1, 3, 4, 5, 6, 9].

4. Выявленная взаимосвязь объема цементного теста, водоцементного отношения и удобоукладываемости бетонной смеси положена в основу методики проектирования состава тяжелого бетона. Методика дополнена предложенными формулами для расчета кинетики карбонизации бетона защитного слоя и накопления критического количества хлор-ионов в приарматурной зоне [3, 4, 5, 8].

5. Разработана компьютерная программа, предназначенная для оперативного проектирования состава бетона, включая и учет добавок ингибиторов коррозии стали, а также прогнозирования состояния железобетонных конструкций при их эксплуатации в агрессивных средах, содержащих углекислый газ и хлор-ионы. Апробация программного продукта на строительных объектах Республики Беларусь и Республики Иран показала достаточную для практических целей точность расчетов [1, 4].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

1. Разработана методика и упрощенная лабораторная установка для исследования процессов карбонизации цементного камня и бетона в среде углекислого газа 100–ной концентрации, включающая накопитель газа в виде эластичной емкости, выполненной из латекса, что позволяет отказаться от сложной системы регулирования концентрации углекислого газа в испытательной емкости.

2. Разработанный метод проектирования состава тяжелого бетона может быть положен в систему расчетов проектирования состава бетона, твердеющего в условиях как тепловлажностной обработки, так и естественного твердения бетона.

3. Разработанная компьютерная программа может быть использована для комплексного оперативного проектирования состава бетона и прогнозирования состояния железобетонных конструкций при их эксплуатации в агрессивных средах, содержащих углекислый газ и хлор-ионы.

4. Результаты исследований могут быть рекомендованы для корректировки ПП–99 к СНиП 3.09.01–85 «Применение добавок в бетоне» в части переноса добавки тринатрийфосфат из ускорителей твердения бетона в замедлители и дополнения перечня добавок, повышающих защитные свойства бетона по отношению к стальной арматуре, добавками тринатрийфосфата и ОХП.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

### Статьи в рецензируемых журналах

1. Голшани, М. Прогнозирование глубины карбонизации бетона железобетонных мостовых конструкций / М. Голшани, В.В. Бабицкий, О.М. Вайтович // Строительная наука и техника. – 2011. – № 3. – С. 45–47.

2. Голшани, М. Предварительная выдержка бетона с химическими добавками / М.С. Бирик, М. Голшани, В.В. Бабицкий // Строительная наука и техника. – 2011. – № 4. – С. 14–16.

3. Голшани, М. Структурообразование цементного камня с добавками ингибиторов коррозии стали / М. Голшани, В.В. Бабицкий // Строительная наука и техника. – 2011. – № 5. – С. 13–16.

4. Голшани, М. Влияние структурных особенностей бетона на глубину его карбонизации / М. Голшани, В.В. Бабицкий, М.С. Бирик // Строительная наука и техника. – 2011. – № 6. – С. 21–25.

### Материалы конференций

5. Golshani, M. Method of rapid assessment of concrete carbonation / M. Golshani // European and national dimension in research 2011: materials of Junior Researchers. Conference : in 5p. / Polotsk State University. – Polotsk : PSU, 2011. – P. 120–123.

6. Голшани, М. Методика исследования карбонизации цементного камня / М. Голшани, А.С. Рубан, В. В. Бабицкий // НИРС – 2011: Респ. науч. конф. студентов и аспирантов высших учебных заведений Респ. Беларусь, Минск, 18 октября 2011 г. / БГУ. – Минск : БГУ, 2011. – С. 169.

7. Перспективы применения нитрит-содержащей добавки в технологии бетона / М.И. Кузьменков, О.Е. Хотянович, М.С. Бирик, И.И. Тулупов, М. Голшани, В.В. Бабицкий // Проблемы современного бетона и железобетона : матер. III Междунар. симпозиум : в 2 т., редкол.: М.Ф. Марковский [и др.]. – Минск: БелНИИС, 2011. – Т. 2. – С. 268–275.

8. Голшани, М. Расчетно-графический метод проектирования состава тяжелого бетона / В. В. Бабицкий, М. Голшани // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : матер. Междунар. науч.-техн. конф. : в 2 ч. / Белорус.-Рос. ун-т. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2012. – Ч. 2. – С. 51–52.

## Тезисы докладов

9. Голшани, М. Установка для исследования карбонизации бетона / М. Голшани // Наука – образованию, производству, экономике : матер. 8-й Междунар. науч.-техн. конф. : в 4 ч. / БНТУ. – Минск : БНТУ, 2010. – Т. 2. – С. 237.

10. Голшани, М. Структурообразование цементного камня с добавками-ингибиторами коррозии стали / М. Голшани, А.С. Рубан // Наука – образованию, производству, экономике : матер. 9-й Междунар. науч.-техн. конф. : в 4 ч. / БНТУ. – Минск : БНТУ, 2011. – Т. 2. – С. 266.

## Статьи в журналах

11. Голшани, М. Влияние структуры бетона на его защитные свойства по отношению к стальной арматуре / М. Голшани, В.В. Бабицкий // Строительный рынок. – 2012. – № 2. – С. 20–23.

## РЭЗІЮМЭ

Голшані Масуд

### **Структура бетону з дадаткамі інгібітараў карозіі сталі і яго ахоўныя ўласцівасці ў адносінах да сталёвай арматуры**

**Ключавыя словы:** крытычная колькасць хлор-іёнаў, глыбіня карбанізацыі бетону, інгібітары карозіі сталі, эфектыўны каэфіцыент дыфузіі вуглякіслага газу, цеплавылучэнне цэменту, пластычная трываласць цэментавага цеста, структураўтварэння цэментавага каменя, склад бетону, камп'ютарная праграма.

**Мэта работы:** распрацоўка ўдакладнёных залежнасцяў, што пакладзены ў аснову абагульненай мадэлі для адзнакі і прагназавання каразійнай устойлівасці жалезабетонных канструкцый пры ўздзеянні вуглякіслага газу і іёнаў хлору.

**Метады даследавання:** патэнцыястатычны метады адзнакі каразійнага стану сталёвай арматуры жалезабетонных канструкцый, вызначэнне эфектыўнага каэфіцыента дыфузіі вуглякіслага газа ў бетоне, калорыямярны метады вызначэння цеплавылучэння цэменту, пластычная трываласць цэментавага цеста.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна.** Усталявана сувязь паміж капілярнай ці агульнай сітаватасцю бетону і крытычнай колькасцю хлор-іёнаў, пакладзеная ў аснову разліку працягласці пасіўнага стану сталёвай арматуры жалезабетонных канструкцый.

Прапанавана метадыка вызначэння глыбіні карбанізацыі цэментавага каменя і бетону. Паказана ўзаемасувязь эфектыўнага каэфіцыенту дыфузіі вуглякіслага газу ў цэментавым камені і бетоне з іх структурнымі асаблівасцямі.

Усталяваны ўплыў дадаткаў інгібітараў карозіі сталі на працэс структураўтварэння цэментавага цеста і каменя. Паказана, што дадатак адыходу хімічнай вытворчасці Гродзенскага хімічнага камбіната можа быць скарыстана як паскаральнік для цвярдзення бетону і інгібітар карозіі сталі.

Распрацавана камп'ютарная праграма для разліку складу бетону пры ўключэнні дадаткаў інгібітараў карозіі сталі, і працягласці пасіўнага стану сталёвай арматуры жалезабетонных канструкцый пры аграсіўным уздзеянні вуглякіслага газу і соляў-хларыдаў.

## РЕЗЮМЕ

Голшани Масуд

### **Структура бетона с добавками ингибиторов коррозии стали и его защитные свойства по отношению к стальной арматуре**

**Ключевые слова:** критическое количество хлор-ионов, глубина карбонизации бетона, ингибиторы коррозии стали, эффективный коэффициент диффузии углекислого газа, тепловыделение цемента, пластическая прочность цементного теста, структурообразование цементного камня, состав бетона, компьютерная программа.

**Цель работы:** разработка уточненных зависимостей, положенных в основу обобщенной модели для оценки и прогнозирования коррозионной стойкости железобетонных конструкций при воздействии углекислого газа и ионов хлора.

**Методы исследования:** потенциостатический метод оценки коррозионного состояния стальной арматуры железобетонных конструкций, определение эффективного коэффициента диффузии углекислого газа в бетоне, калориметрический метод определения тепловыделения цемента, пластическая прочность цементного теста.

**Полученные результаты и их новизна.** Установлена связь между капиллярной или общей пористостью бетона и критическим количеством хлор-ионов, положенная в основу расчета длительности пассивного состояния стальной арматуры железобетонных конструкций.

Предложена методика определения глубины карбонизации цементного камня и бетона. Показана взаимосвязь эффективного коэффициента диффузии углекислого газа в цементном камне и бетоне с их структурными особенностями.

Установлено влияние добавок ингибиторов коррозии стали на процесс структурообразования цементного теста и камня. Показано, что добавка отхода химического производства Гродненского химического комбината может быть использована как ускоритель твердения бетона и ингибитор коррозии стали.

Разработана компьютерная программа для расчета состава бетона, включая добавки ингибиторов коррозии стали, и длительности пассивного состояния стальной арматуры железобетонных конструкций при агрессивном воздействии углекислого газа и солей-хлоридов.

## SUMMARY

Golshani Masud

### **Structure of concrete with additives of corrosion inhibitors of a steel and its protective properties in relation to an iron fittings**

**Keywords:** critical quantity of a chlorine-ions, depth карбонизации concrete, ингибиторы steel corrosion, effective factor of diffusion of carbonic gas, a cement thermal emission, plastic durability of the cement test, structurization of a cement stone, concrete structure, the computer program.

**Object of research:** working out of the specified dependences taken as a principle generalised model for an estimation and forecasting of corrosion firmness of ferro-concrete designs at influence of carbonic gas and ions of chlorine.

**Methods of research:** electrochemical method of an estimation of a corrosion condition of steel armature of ferro-concrete designs, definition of effective factor of diffusion of carbonic gas of concrete, calorimetric method of definition of a thermal emission of cement, plastic durability of the cement test

**The obtained results and their novelty.** Connection between capillary or general porosity of concrete and critical quantity of the chlorine-ions, taken as a principle calculation of duration of a passive condition of steel armature of ferro-concrete designs is established.

The technique of definition of depth carbonation a cement stone and concrete is offered. The interrelation of an effective coefficient of diffusion of carbonic gas in a cement stone and concrete with their structural features is shown.

Influence of additives steel corrosion inhibiting on process structurizations of the cement test and a stone is established. It is shown that the additive of a withdrawal of chemical manufacture of the Grodno chemical industrial complex can be used as the hardening-accelerating concrete and steel corrosion inhibiting.

The computer program for calculation of structure of concrete, including additives steel corrosion inhibiting, and duration of a passive condition of steel armature of ferro-concrete designs is developed at external influence of carbonic gas and salts-chlorides.