

**ВЛИЯНИЕ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ДОБАВОК И ПАВ НА ПРОЧНОСТЬ  
И СТЕПЕНЬ ПРОНИЦАЕМОСТИ БЕТОНА**

**INFLUENCE OF FINE ADDITIVES AND SURFACTANTS ON THE STRENGTH  
AND DEGREE OF CONCRETE PERMEABILITY**

***Oksana Shkromada***

*Department of Therapy, Pharmacology, Clinical Diagnostics and Chemistry  
Sumy National Agrarian University  
160 Herasym Kondratiev str., Sumy, Ukraine, 40021  
[oshkromada@gmail.com](mailto:oshkromada@gmail.com)*

***Andriy Paliy***

*Department of Technical Systems and Animal Husbandry Technologies  
Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture  
44 Alchevskih str., Kharkiv, Ukraine, 61002  
[paliy.andriy@ukr.net](mailto:paliy.andriy@ukr.net)*

***Oksana Yurchenko***

*Department of Construction Production  
Sumy National Agrarian University  
160 Herasym Kondratiev str., Sumy, Ukraine, 40021  
[kosareva\\_82@mail.ua](mailto:kosareva_82@mail.ua)*

***Nadiia Khobot***

*Department of Architecture and Engineering Studies  
Sumy National Agrarian University  
160 Herasym Kondratiev str., Sumy, Ukraine, 40021  
[14.khobot@gmail.com](mailto:14.khobot@gmail.com)*

***Alina Pikhtirova***

*Department of Public Health  
Sumy State University  
2 Rymskogo-Korsakova str., Sumy, Ukraine, 40007  
[alinca.sumy@gmail.com](mailto:alinca.sumy@gmail.com)*

***Ivan Vysochin***

*Department of Architecture and Engineering Studies  
Sumy National Agrarian University  
160 Herasym Kondratiev str., Sumy, Ukraine, 40021  
[via1946@ukr.net](mailto:via1946@ukr.net)*

***Ganna Fedorenko***

*Department of Automation of Production Processes  
Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture*

40 Sumska str., Kharkiv, Ukraine, 61001  
[a\\_gunchenko@ukr.net](mailto:a_gunchenko@ukr.net)

**Anatoliy Paliy**

Laboratory of Veterinary Sanitation and Parasitology  
National Scientific Center «Institute of Experimental and Clinical Veterinary  
Medicine»

83 Pushkinska str., Kharkiv, Ukraine, 61023  
[paliy.dok@gmail.com](mailto:paliy.dok@gmail.com)

### **Аннотация (Abstract)**

Приведены результаты исследований по определению влияния наночастиц диоксида титана ( $\text{nanoTiO}_2$ ), мелкодисперсного диоксида титана в анатазной кристаллической форме ( $\text{anatazTiO}_2$ ) и поверхностно-активных веществ (ПАВ) на прочность при сжатии, степень проницаемости и термическую устойчивость образцов бетона. Добавление частиц нанотитана, титана анатаза и ПАВ до 2 % к цементу ускоряет процесс гидратации и увеличивает прочность бетона, а также оказывает сильное воздействие на его микроструктуру.

В результате проведенных исследований экспериментально доказано, что прочность на сжатие бетона увеличивается при добавлении добавок наночастиц диоксида титана ( $\text{nanoTiO}_2$ ) на 23,2 %, мелкодисперсного диоксида титана в анатазной кристаллической форме ( $\text{anatazTiO}_2$ ) – на 21,7 % до 5 % концентрации по массе.

Кроме того, введение указанных добавок уменьшает проникающую способность бетона. Это происходит за счет уменьшения поглощения бетоном воды при введении в него добавок нанотитана, титана анатаза. Введение в бетон добавок от 1 % до 5 % по массе снижает глубину проникновения хлоридов в 10–15 раз, по сравнению с контролем.

Применение метода температурно-программируемой десорбционной масс-спектрометрии (ТПД-МС) доказало, что увеличение процентного содержания наночастиц  $\text{TiO}_2$  до 5 % в бетонных смесях коррелирует с повышением микропористости и уровнем дисперсности указанных смесей, что обуславливает сдвиг пиков интенсивного газовыделения из образцов при нагреве в сторону низких температур (на примере диоксида углерода  $\text{CO}_2$ ).

Полученные образцы бетона планируется применить для изготовления полов в животноводческих помещениях. Вводимые добавки были подобраны ввиду того, что не являются токсичными веществами и при соприкосновении с биологической средой животноводческих помещений (моча, фекалии) не будут вступать с ними в реакцию.

**Ключевые слова:** бетон, нанотитан, титан анатаз, поверхностно-активные вещества, прочность на сжатие, проницаемость, термические свойства.

## **1. Introduction**

Создание материалов с повышенными физико-механическими характеристиками обусловлено совершенствованием и развитием технологии строительства зданий и сооружений.

Бетонные покрытия используются очень часто в животноводческих зданиях, для дорожных покрытий. К ним предъявляются особенные требования по прочности и проницаемости.

Среди полупроводников с фотокаталитическими свойствами на основе оксидов и сульфидов, можно выделить диоксид титана ( $\text{TiO}_2$ ), оксид цинка ( $\text{ZnO}$ ), оксид вольфрама ( $\text{WO}_3$ ). Тем не менее, диоксид титана был взят в связи с его высокой фотокаталитической активностью, химической стабильностью, доступностью. Данные способности только недавно были использованы для бетонов и изделий из него. Помимо фотокаталитической активности, важны его механические свойства и долговечность. Были проведены исследования бетона, содержащего наночастицы  $\text{TiO}_2$  для дорожного покрытия, в которых описаны характеристики усталости бетонов и подверженность их стрессам. Исследователи [1] показали, что введение наночастиц  $\text{TiO}_2$  в бетонную смесь повышает степень стойкости к истиранию.

В нашей работе часть цемента была заменена на наночастицы диоксида титана ( $\text{nanoTiO}_2$ ), мелкодисперсного диоксида титана в анатазной кристаллической форме ( $\text{anatazTiO}_2$ ) и ПАВ, что дало возможность повысить прочность и проницаемость бетона. В качестве нанокристаллического наполнителя был использован диоксид титана ( $\text{TiO}_2$ ) размером частичек меньше 0,5 мкм и мелкокристаллический наполнитель титан анатаз с размером частиц 3–5 мкм. Наноматериалы имеют большее значение отношения между площадью поверхности и объемом, чем другие подобные частицы в больший размер, что делает наноматериалы более реактивными [2, 3].

Научный интерес обусловлен новыми потенциальными применениями частиц порядка нанометров. Наноматериалы имеют большее значение соотношения между площадью поверхности и объемом, чем другие подобные частицы большего размера, что делает их более реактивными. Обычно ожидается, что если объемная концентрация твердого вещества поддерживается постоянной, для конкретной обрабатываемости замена цемента на мелкий порошок увеличит потребность в воде из-за увеличение площади поверхности. Это больше наблюдается при введении наночастиц в смешанный (многокомпонентный) бетон [4].

Также в бетонную смесь вводили ПАВ. Алкилтриметиламинхлорид (ПАВ) относится к группе дезинфицирующих средств, содержащих соль четвертичного аммония, неионогенный ПАВ, низший спирт комплексон. Средство используется в качестве заменителя цианистых соединений в электролитах, в гуманной медицине для дезинфекции хирургических инструментов, оборудования, сушильных шкафов, помещений. Благодаря своим способностям образовывать пленку вокруг частиц бетона они являются также хорошим заполнителем для уменьшения пор в бетоне и связывания частиц [5, 6].

Поверхностно-активные вещества могут усиливать захват воздуха

цементной пастой (воздухововлекающие агенты) при быстром перемешивании цементного раствора или они могут быть использованы для создания предварительно сформированной водной пены, и позже включены в цементный раствор. В обоих процессах поверхностно-активные вещества остаются в цементной пасте и могут, таким образом, влиять на реологические свойства и старение цементного матрикса. Помимо цементных пен, поверхностно-активные вещества могут быть использованы в качестве уноса воздуха агенты в морозостойком бетоне и в качестве добавок, уменьшающих усадку [7].

Проведенные испытания образцов на проницаемость хлорид-ионов показали, что введение нанотитана  $TiO_2$ , титана анатаза и поверхностно-активного вещества в бетон приводит к снижению данного показателя, в сравнении с контрольными образцами. Также в работе образцы бетона с содержанием 1 и 2 % концентрации поверхностно-активного вещества показали увеличение плотности на сжатие на 18, 9 % и 21,7 % соответственно, по сравнению с контрольными образцами.

Добавление микрокристаллических наполнителей также может влиять на стабильность размеров цементной смеси путем увеличения усадки цементного материала. Размер частиц наполнителя может быть оптимально выбран так, чтобы наполнитель мог увеличить реакцию гидратации, но не значительно влиять на стабильность размеров цементной системы. Добавление мелкого нереакционноспособного наполнителя к цементу модифицирует реакцию гидратации в основном за счет разбавления, модификации гранулометрического состава и гетерогенной нуклеации [8, 9].

Связующая фаза цементной смеси образуется при реакции (гидратации) портленда цементного клинкера с водой. Главным из компонентом бетона является цемент, который состоит из оксид кальция ( $CaO$ ) 60 %, глины и различные оксидов и примесей. Когда вода смешивается с цементом, начинается ряд сложных реакций. В традиционных бетонных смесях основными составляющими прочности соединениями являются силикаты кальция, которые вступают в реакцию с водой с образованием геля гидрата силиката кальция [10]. Нет достаточного количества данных о том, как частицы  $TiO_2$  влияют на уровень карбонизации в бетоне, что было показано в данной работе.

Применение в работе термопрограммированной масс-спектрометрии (ТПД-МС) дало возможность получить данные о воздействии нанотитана, титана анатаза и ПАВ на термические свойства образцов бетона. Введение добавок в бетонные смеси дало результат снижение температуры максимального нагревания экспериментальных образцов до 520–530 °С и преобладание эндотермических процессов над экзотермическими [11].

Также экспериментально было доказано, что в процессе нагревания бетона происходит испарение воды и других гидратированных веществ, что приводит к потере веса образцов [12].

Приоритетной задачей в строительстве является повышение прочности бетона. Таким образом главным направлением в развитии физико-механических характеристик бетона и бетонных смесей является введение в

бетонную смесь малого количества мелкодисперсных добавок, позволяющих повысить прочность бетона при сжатии. Такими добавками могут служить поверхностно-активные вещества, влияющие на подвижность бетонной смеси и органические соединения.

## 2. Materials and Methods

Целью исследования является изучение воздействия добавок на основе наночастиц диоксида титана ( $\text{nanoTiO}_2$ ), мелкодисперсного диоксида титана в анатазной кристаллической форме ( $\text{anatazTiO}_2$ ), ПАВ (алкилтриметиламинхлорида) на прочность, проницаемость и термические свойства.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- определить физико-механические свойства образцов бетона с различными добавками (прочность на сжатие и проницаемость);
- исследовать влияние добавок на основе наночастиц диоксида титана ( $\text{nanoTiO}_2$ ), мелкодисперсного диоксида титана в анатазной кристаллической форме ( $\text{anatazTiO}_2$ ), ПАВ на термические свойства образцов бетона.

Исследования проводились в лаборатории архитектуры и инженерных изысканий Сумского национального аграрного университета (Украина) в течение 2019 года. Для эксперимента были использованы портландцемент М 400 г. Кривой Рог (Украина); речной песок и щебень г. Сумы, Украина. В качестве добавки к бетону был использован нанотитан, титана анатаз ПАТ “Сумыхимпром” (Украина), поверхностноактивное вещество – алкилтриметиламинхлорид.

Смеси бетона были подготовлены с различным содержанием наночастиц диоксида титана  $\text{TiO}_2$  меньше 0,5 мкм; с размером частиц 3–5 мкм – мелкодисперсного диоксида титана в анатазной кристаллической форме. ПАВ вводили в бетонную смесь в 1 и 2 % концентрации. Бетонную смесь готовили с заменой цемента частицами  $\text{TiO}_2$  от 1 до 5 мас. %. Содержание всех смесей составляет  $500 \text{ кг/м}^3$ . Пропорции смесей представлены в табл. 1.

Таблица 1

Пропорциональные соотношения смеси бетонов

$\text{TiO}_2$ (%)	Количество ( $\text{кг/м}^3$ )	
	Цемент	$\text{TiO}_2$
0	500	0
1	495	5
2	490	10
5	475	25

В лаборатории были изготовлены исследуемые образцы бетона размерами  $70 \times 70 \times 70 \text{ мм}^3$  экспозиция твердения составила 7, 28 и 90 дней. Физико-механические свойства бетона исследования прочности на сжатие определяли

согласно общепринятой методике [13].

Результат проникновения хлорид-ионов в образцы бетона оценивали погружением кубиков бетона со всех сторон, кроме одной в 3 % раствор NaCl в течение 28 дней. После этого образцы разрушали и опрыскивали серебром 0,1 % раствор нитрата, для определения глубины проникновения хлорида [14]. Эти глубины были определены как точки в образцах, где свободные хлориды превышали 0,15 % от массы цемента. Хлориды вступали в реакцию с раствором нитрата серебра ( $\text{AgNO}_3$ ) 0,1 % с образованием белого осадка хлорида серебра ( $\text{AgCl}$ ). Отсутствие или ограниченное наличие свободного хлорида выражалось коричневым осадком оксида серебра ( $\text{Ag}_2\text{O}$ ), образующимся в результате реакции раствора  $\text{AgNO}_3$  и гидроксидов в бетонных образцах.

Для исследования термических свойств образцов бетона использовали установку термопрограммированной масс-спектрометрии (ТПД-МС), которая состоит из высокотемпературной печи и газового масс-спектрометра МХ-7304 (ОАО SELMI г. Сумы, Украина). Для эксперимента отбирали образцы весом 3 мг. Технические детали эксперимента подробно представлены в работе [15].

Фиксировали пики температуры, скорости нагревания образца, потерю веса и выделенные при этом ионы с молекулярными массами ( $m/z$ ): 2 – водород; 16 – кислород; 18 – вода; 28 – оксид углерода (CO) и 44 – диоксида углерода ( $\text{CO}_2$ ).

На рис. 5–7 показаны кривые результата термического анализа для экспериментальных образцов бетона с добавками наночастиц диоксида титана  $\text{TiO}_2$  меньше 0,5 мкм; с размером частиц 3–5 мкм – мелкодисперсного диоксида титана в анатазной кристаллической форме. ПАВ вводили в бетонную смесь в 1 и 2 % концентрации. На температурных кривых наблюдается эндотермический процесс потери молекул воды при температуре от до 300 ° до 420 °С. При температуре от 420 °С до 720 °С процесс является эндотермическим из-за диссоциации карбонатов.

### 3. Results

#### 3. 1. Результаты исследований прочности на сжатие и проникновение хлорида в бетон

В таблице 2 приведены результаты испытания прочности на сжатие образцов бетона на 7, 28 и 90 день твердения. Полученные данные показывают, что прочность на сжатие увеличивается при добавлении добавок в 1 % концентрации наночастиц диоксида титана на 18,4 %; мелкодисперсного диоксида титана в анатазной кристаллической форме – на 16,5 %, в сравнении с контролем.

При увеличении добавки до 5 %, прочность образцов бетона снижается, однако показатели все еще выше, в сравнении с контрольной бетонной смесью без добавок (табл. 2).

Таблица 2

Оценка прочности образцов бетона на сжатие

$\text{TiO}_2$	%	Прочность на сжатие (МПа)
----------------	---	---------------------------

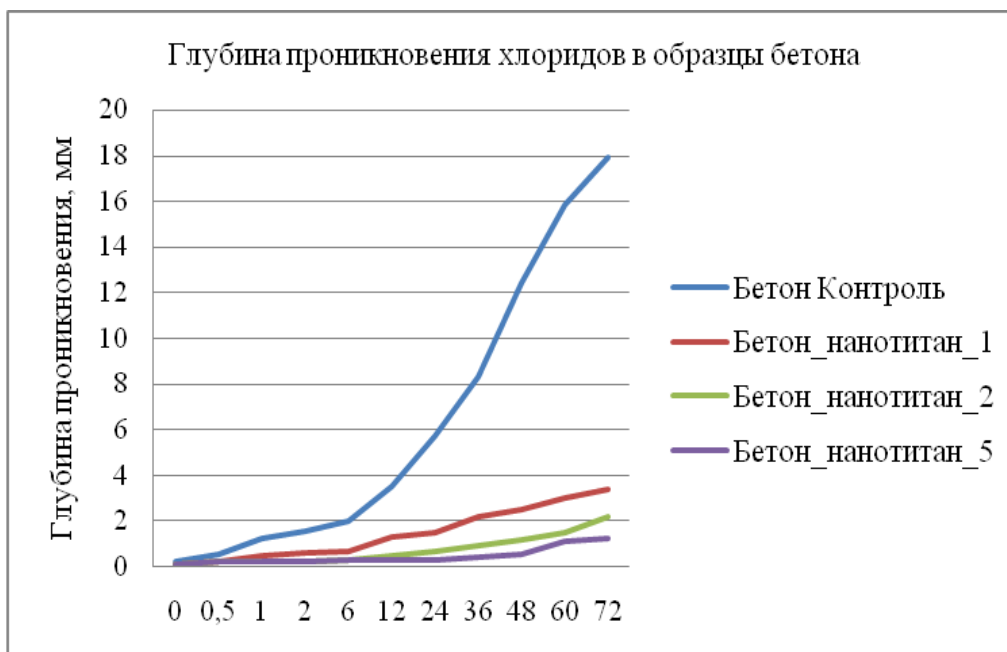
нанотитан		7 дней	28 дней	90 дней
	0	16,0	42,6	61,2
	1	20,5	50,2	72,5
	2	23,6	56,4	75,4
	5	24,5	57,3	70,8
TiO <sub>2</sub> Титан анатаз	1	22,3	49,5	71,3
	2	24,5	53,6	74,5
	5	21,5	52,9	69,6
ПАВ	1	18,5	43,5	72,8
	2	21,6	45,3	74,5

Прочность образцов, имеющих в своем составе 2 % наночастиц диоксида титана ( $\text{nanoTiO}_2$ ) возрастает на 23,2 % , мелкодисперсного диоксида титана в анатазной кристаллической форме ( $\text{anatazTiO}_2$ ) – на 21,7 % соответственно.

Вероятно, снижение прочности 5 % бетона связано с превышением количества частиц титана необходимого для заполнения пор бетона. Также больший процент наночастиц диоксида титана, чем 2,0 %, снижает прочность на сжатие из-за уменьшения содержания гидратированной извести. А это приводит к дефициту прочности. В результате высокой реакционной способности наночастиц диоксида титана происходит быстрое потребление кристаллического гидроксида кальция, который образуется при гидратации портландцемента на ранних сроках твердения. Вследствие этого, гидратация цемента ускоряется, и образуются большие объемы продуктов реакции.

Образцы бетона с содержанием 1 и 2 % концентрации поверхностно-активного вещества показали увеличение плотности на сжатие на 18,9 % и 21,7 % соответственно, по сравнению с контрольными образцами. Этот процесс происходит за счет уменьшения объема крупных пор.

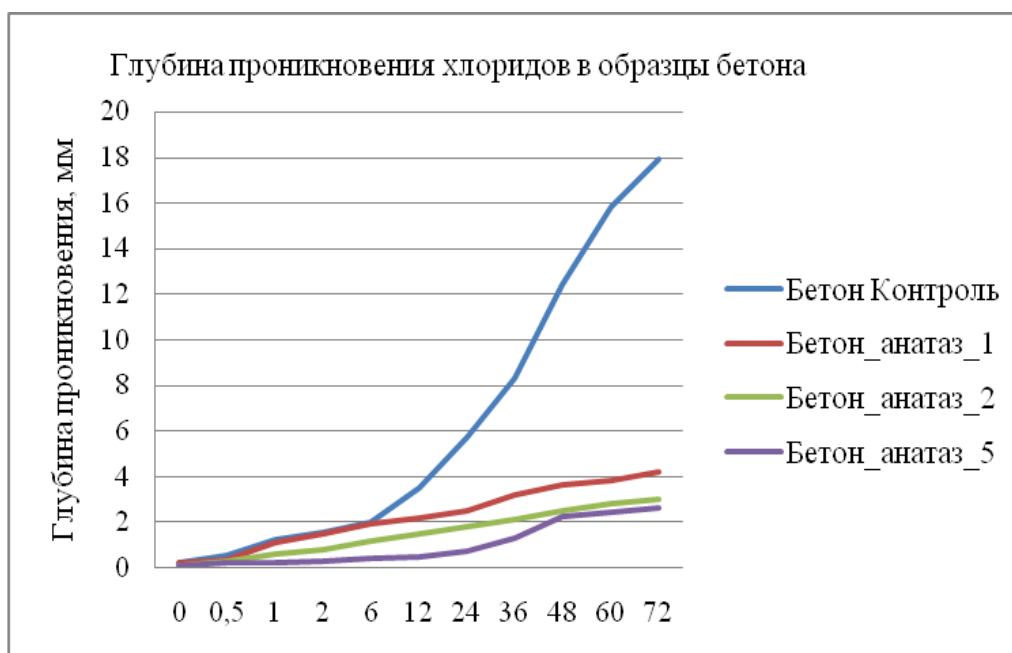
Для подтверждения улучшения прочностных свойств бетона был проведен эксперимент на проницаемость бетона с разными добавками. Рассчитаны глубины проникновения хлорида в образцы после 28 дней погружения в 5 % раствор NaCl (**рис. 1**). Результаты показали, что в контрольных образцах бетона было усиленное проникновение хлорида, по сравнению с опытными.



**Рис. 1.** Глубина проникновения хлоридов в образцы бетона, при экспозиции 0–72 часа

Для контрольных смесей бетона без добавок глубина проникновения составила 17,9 %. При введении в бетон нанодисперсной добавки диоксида титана от 1 % до 5 % глубина проникновения хлоридов снизилась до 3,0 мм соответственно.

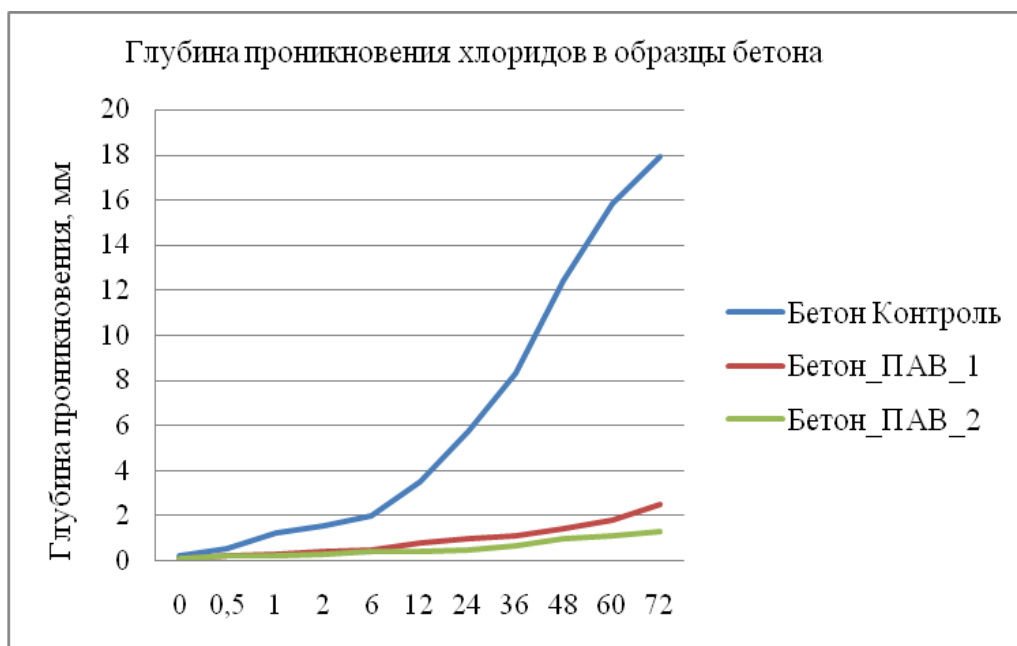
Добавление в бетонную смесь титана анатаза в зависимости от концентрации изменяло степень проникновения хлорида при различных экспозициях (**рис. 2**).



**Рис. 2.** Глубина проникновения хлоридов в образцы бетона, при экспозиции 0–72 часа

Добавление в бетон мелкокристаллической добавки титана анатаза в диапазоне 1 % до 5 % глубина впитывания 3 % раствор NaCl остановилась на отметке до 2,6–4,2 мм соответственно. Итак, благодаря добавкам сформированная структура имеет прерывистые поры и значительно уменьшает проникновение хлоридов в образцы.

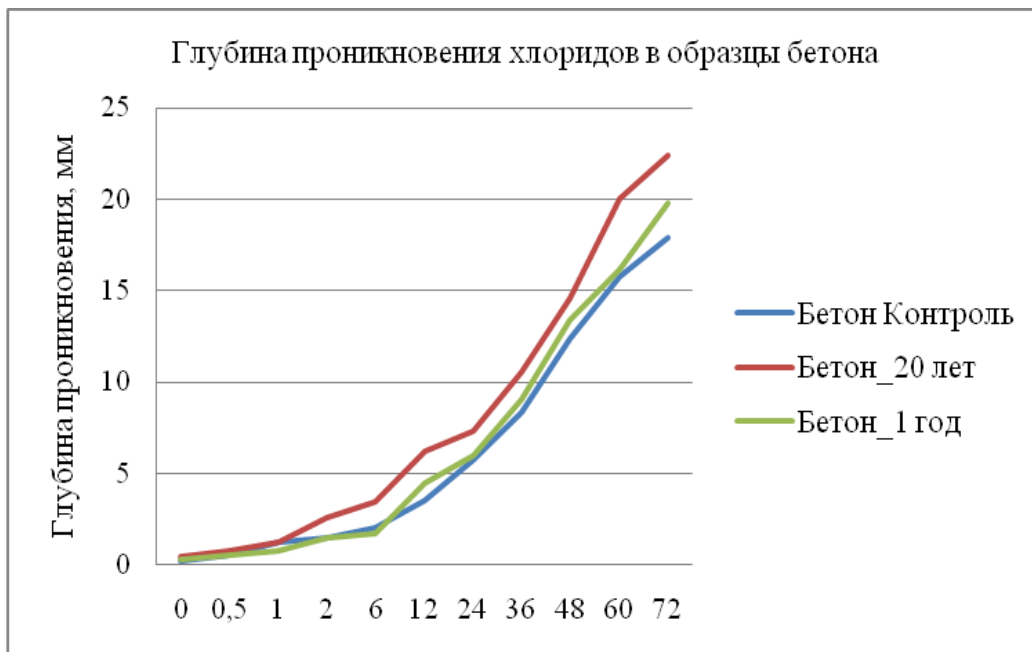
В предыдущих опытах было доказано, что введение ПАВ в бетонную смесь изменяет его термические свойства. Определение технических характеристик, таких как проницаемость образца, представлено на **рис. 3**.



**Рис. 3.** Глубина проникновения хлоридов в образцы бетона, при экспозиции 0–72 часа

Поверхностно-активное вещество (алкилтриметиламинхлорид) в экспериментальных образцах применяли в качестве вяжущего вещества, опираясь на его способность образовывать нанопленку вокруг кристаллов бетона при смешивании бетонной массы. Снижение проницаемости исследуемых образцов для хлоридов связано с увеличением плотности образца.

Согласно проведенным исследованиям ученых доказан факт разрушения микроструктуры бетона с течением времени. Изменения проницаемости образцов бетона разного возраста представлены на **рис. 4**.



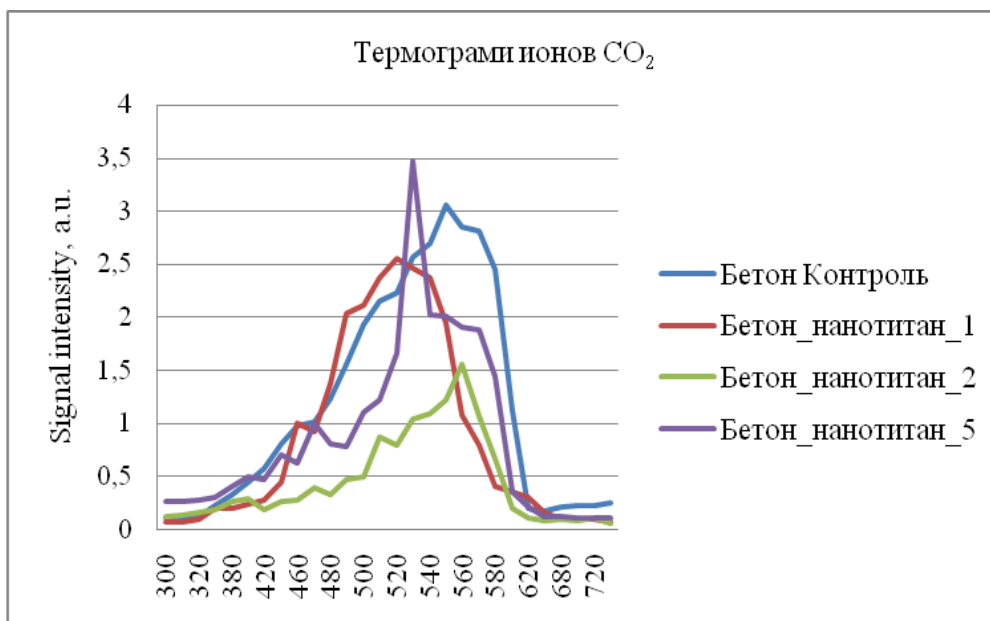
**Рис. 4.** Глубина проникновения хлоридов в образцы бетона, при экспозиции 0–72 часа

В сравнении с контрольными образцами 28 дней твердения, бетоны сроком эксплуатации 1 год и 20 лет имели глубину проникновения для хлоридов при экспозиции 72 часа 22,4–19,8 мм. Для смесей бетона без добавок 0 % глубина проникновения составила 17,9 мм.

Изучение свойств бетона с добавками: нанокристаллическими, мелкокристаллическими и вяжущими (ПАВ) на проницаемость и методом ТПД-МС подтверждают их эффективность.

### **3. 2. Результаты проведения термопрограммированной масс-спектрометрии (ТПД-МС) образцов бетона**

Использование метода ТПД-МС для прогнозирования направления и интенсивности воздействия мелкодисперсных добавок и поверхностноактивных веществ на температуру разрушения образцов бетона (рис. 5–7).



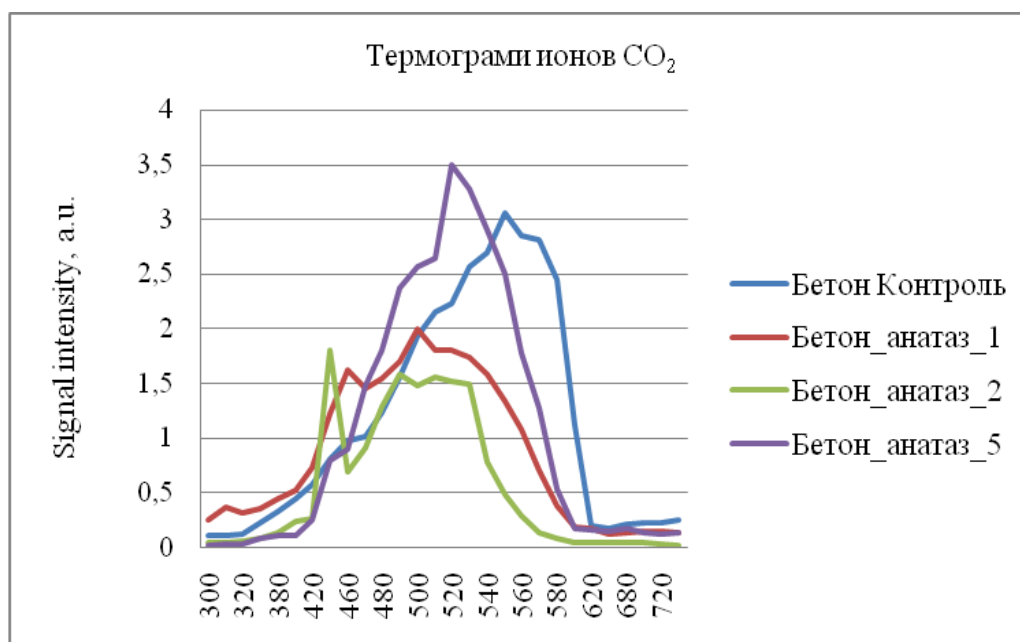
**Рис. 5.** Термограммы выделения/устранения CO<sub>2</sub> (m/z = 44) путем термического разложения образца

На **рис. 5** приведены термограммы разрушения образцов бетона с добавлением TiO<sub>2</sub> нанотитана. Фиксировали время и температуру разложения образцов в зависимости от выделения оксида углерода CO и диоксида углерода CO<sub>2</sub>, а также испарения молекул воды. Чем прочнее образец бетона, тем меньше время и температура нагрева образца, при котором он теряет воду и оксид углерода. Согласно этих данным были построены термограммы. Бетон, обогащенный нанотитаном 1–2 % концентрации начинает выделять оксид углерода при температуре 520 °С. Максимальный четко очерченный интенсивный пик нагревания образца бетона с добавлением нанотитана 5 % составляет 520–530 °С. Однако, по сравнению с другими образцами, он быстро нагревается и остывает, его пик спадает практически сразу. При температуре от 420 до 520 °С, пики наблюдали при нагревании экспериментальных образцов бетона из-за дегидроксилирования бетона, сгорания органических веществ и реакции разложения.

В то же время, контрольный образец бетона начинает выделять диоксида углерода при значениях температур начиная с 550 °С, причиной чего является более рыхлая структура. Содержание в составе бетона нанокристаллических заполнителей приводит к снижению температуры выделения CO<sub>2</sub> – кривая стремится влево, к более низким температурам. Контрольный образец содержит только крупнокристаллические добавки, которые нагреваются дольше, пористость образца выше и соответственно молекулы воды, содержащиеся в микропорах, испаряются дольше. Детальное приведенных на **рис. 5** кривых зависимостей выхода CO и CO<sub>2</sub> из образцов от температуры отражает четко выраженную тенденцию к смещению максимума выхода газообразных веществ в направлении роста температуры нагрева в зависимости от наличия примесей в образце. Исходя из полученных результатов, можно заключить, что образцы

бетона, содержащие в своем составе нанотитан, имели большую плотность, по сравнению с контрольными.

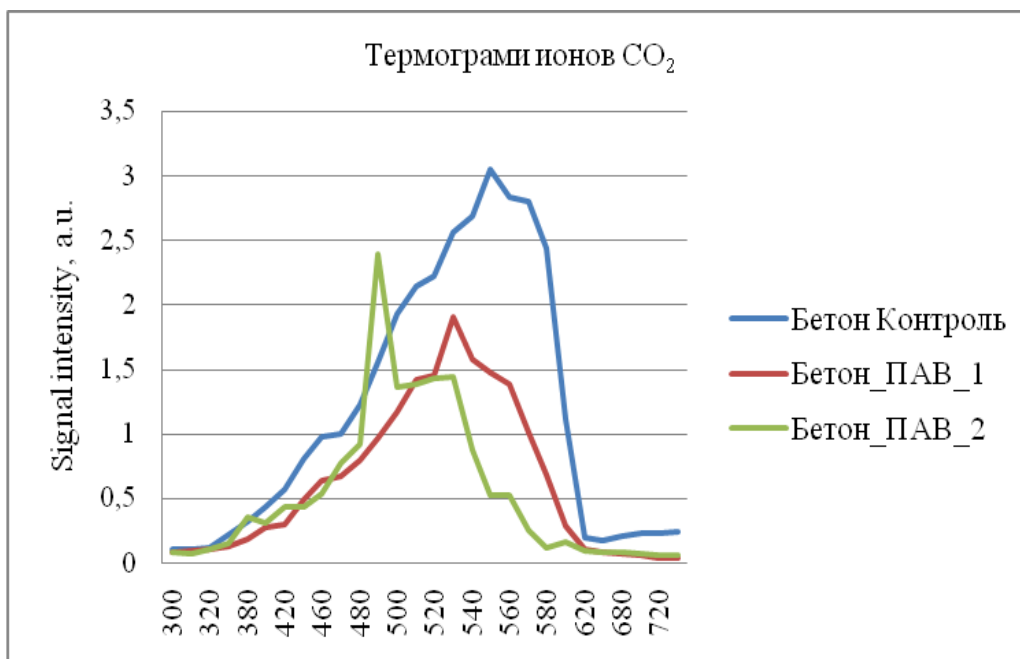
На **рис. 6** приведена термограмма нагревания образцов бетона с добавлением титана анатаза с размером частиц 3–5 мкм.



**Рис. 6.** Термограммы выделения/устранения CO<sub>2</sub> ( $m/z = 44$ ) путем термического разложения образца

Диапазон нагревания образцов 1–2 % анатаза находится в пределах 420–520° С. Не дает четкого пика нагревания бетон с 5 % анатазом при 520° С. Термограмма контрольного образца при этом находится в более высоком диапазоне температур 560–580° С, процесс является эндотермическим из-за диссоциации карбонатов. В контрольных образцах происходит сжигание органических веществ, удаление воды вследствие дегидроксилирования и разложением карбонатов, но при более высоких температурах, в сравнении с экспериментальными.

В следующих экспериментальных образцах в качестве вяжущего вещества использовали алкилтриметиламинхлорид, который содержит соль четвертичного аммония, неионогенный ПАВ (**рис. 7**).



**Рис. 7.** Термограммы выделения/устранения CO<sub>2</sub> (m/z = 44) путем термического разложения образца

В результате проведенного эксперимента установлено, что температура накаливания образцов с добавкой ПАВ 2 % составила 490°С, а ПАВ 1 % – 520° С. Момент максимального накаливания, при котором образцы бетона теряют оксид и диоксид углерода, а также воду фиксирует прибор масс-спектрометр. Увеличение процентного соотношения ПАВ к бетону уменьшает время и температуру нагревания образца. Возможно, что ПАВ заполняет большинство каверн и пространств в бетоне. В результате чего исследуемые образцы имеют меньший диаметр каверн, в сравнении с контрольными.

В процессе применения метода ТПД-МС в диапазоне температур 300–720°С происходило обезвоживание гидратированных продуктов и потеря веса в образцах бетона (табл. 3).

Таблица 3

Результаты потери веса образцами бетона во время накаливания при температуре 300–720°С

	%	Начальный вес образца, мг	Конечный вес образца, мг	Потеря веса, %
TiO <sub>2</sub> нанотитан	0	3,0	2,52	16,0
	1	3,0	2,67	11,0
	2	3,0	2,73	9,0
	5	3,0	2,75	8,3
TiO <sub>2</sub> титан анатаз	1	3,0	2,65	11,6
	2	3,0	2,70	10,0
	5	3,0	2,74	8,7

ПАВ	1	3,0	2,68	10,6
	2	3,0	2,76	8,0

Результаты показывают, что после накаливания бетона происходит испарение воды и других веществ, что приводит к потере веса образцов. Увеличение потери веса диаметрально противоположно количеству введенных наночастиц  $TiO_2$  в бетоны до 5 % и ПАВ до 2 %. Максимальная потеря веса происходит в контрольных образцах, которые содержат больше воды и других продуктов гидратации.

Увеличение процентного содержания наночастиц  $TiO_2$  и титана в анатазной форме до 5 %; ПАВ до 2 % в бетонных смесях ускоряет время пиковых нагрузок и отводит тепло. Исходя из полученных результатов можно заключить, что экспериментальные образцы бетона имели большую плотность, по сравнению с контрольными.

#### 4. Discussion

Проведенные результаты испытания физико-механических свойств образцов бетона на 7, 28 и 90 день твердения при введении добавок наночастиц диоксида титана ( $nanoTiO_2$ ), мелкодисперсного диоксида титана в анатазной кристаллической форме ( $anatazTiO_2$ ) в 1 и 2 % концентрации показывают значительное повышение прочности на сжатие. При увеличении добавки до 5 %, прочность образцов бетона снижается.

Уменьшенные глубины проникновения хлоридов происходит за счет снижения поглощения воды в бетон благодаря введению добавок, которые вызвали уплотнение образцов. При введении в бетон нанодисперсной добавки диоксида титана от 1 % до 5 % глубина проникновения хлоридов снизилась до 3,0 мм соответственно. Добавление в бетон мелкокристаллической добавки титана анатаза в диапазоне 1 % до 5 % глубина впитывания 3 % раствор  $NaCl$  остановилась на отметке до 2,6–4,2 мм. Итак, благодаря добавкам сформированная структура имеет прерывистые поры и значительно уменьшает проникновение хлоридов в образцы.

Применение метода температурно-программируемой десорбционной масс-спектрометрии (ТПД-МС) доказало, что увеличение процентного содержания наночастиц  $TiO_2$  до 5 % в бетонных смесях ускоряет процесс нагревания образцов при более низких температурах, что свидетельствует о повышении прочности.

Согласно исследованиями на термограмме портландцементного камня нормального твердения выявлены три основных эндотермических эффекта, вызванных удалением адсорбционной воды из гелеобразных продуктов гидратации и кристаллогидратной воды из гидросульфатоалюмината кальция (до 300 °C), а также дегидратацией портландита –  $Ca(OH)_2$  (300–580 °C) и диссоциацией  $CaCO_3$  (580–720 °C).

После накаливания бетона происходит испарение воды и других веществ, что приводит к потере веса образцов. Обычный бетон теряет после накаливания 16 % первоначального веса. При увеличении концентрации

введённых наночастиц  $\text{TiO}_2$  в бетоны до 5 % и ПАВ до 2 % потеря веса снижается почти в два раза. Обычный бетон содержит больше продуктов гидратации, которые в процессе нагревания испаряются, и образец значительно теряет свой первоначальный вес.

Таким образом применение добавок на основе наночастиц диоксида титана ( $\text{nanoTiO}_2$ ), мелкодисперсного диоксида титана в анатазной кристаллической форме ( $\text{anatazTiO}_2$ ), ПАВ (алкилтриметиламинхлорида) позволяет повысить плотность структуры, и, как следствие, прочность, долговечность и стойкость бетона в агрессивных условиях эксплуатации.

## 5. Выводы (Conclusions)

Экспериментально доказано, что образцы бетона с содержанием до 5 % нанотитана, титана анатаза показали увеличение плотности на сжатие, по сравнению с контрольными образцами на 23,2 и 21,7 % соответственно. Образцы бетона с содержанием 1 и 2 % концентрации поверхностно-активного вещества имели также большую плотность на сжатие на 18,9 % и 21,7 % соответственно.

Применение метода температурно-программируемой десорбционной масс-спектрометрии (ТПД-МС) доказало, что увеличение процентного содержания наночастиц  $\text{TiO}_2$  до 5 % в бетонных смесях ускоряет время нагревания при более низких температурах и доказывает увеличение прочности экспериментальных образцов.

Введения добавок диоксида титана ( $\text{nanoTiO}_2$ ), мелкодисперсного диоксида титана в анатазной кристаллической форме ( $\text{anatazTiO}_2$ ) и поверхностно-активных веществ (ПАВ) снижает проницаемость образцов бетона для хлор-ионов до 10 %.

## References

[1] Nazari, A., Riahi, S. (2010). The effect of  $\text{TiO}_2$  nanoparticles on water permeability and thermal and mechanical properties of high strength self-compacting concrete. *Materials Science and Engineering*, 528, 2, 56-763.

[2] Aravind, R., Devasena, M., Sreevidya, V., Vadivel, M. (2016). Dispersion characteristics and flexural behavior of concrete using nano titanium dioxide. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 9(3), 443-447. ISSN 0974-5904

[3] Fattah, K., Tamimi, A., Alkadi, A., Afaneh, M., Awada, M., Khalaf, A. (2019). Self-Cleansing Cement Matrix using Nano Titanium Dioxide. *International Journal of Advances in Mechanical and Civil Engineering (IJAMCE)*, 6(1), 37-40. ISSN: 2394-2827

[4] Nazari, A., Riahi, S., Riahi, S., Shamekhi, S. F., Khademnoand, A. (2010). An investigation on the Strength and workability of cement based concrete performance by using  $\text{ZrO}_2$  nanoparticles. *Journal of American Science*, 6(4), 29-33.

[5] Prusty, J. K., Patro, S. K., Basarkar, S. S. (2016). Concrete using agro-waste as fine aggregate for sustainable built environment – A review. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 5(2), 312-333.

<https://doi.org/10.1016/j.ijssbe.2016.06.003>

[6] Okojie, L. O. (2014). Cement Production and Sustainable Rural Farming Livelihood in Nigeria: Striking a Sensible Balance Through Environmental Legislation and Enforcement. *European Journal of Sustainable Development*, 3(3), 251-262. doi:10.14207/ejsd.2014.v3n3p251

[7] Gelardi, G., Mantellato, S., Marchon, D., Palacios, M., Eberhardt, R. A. B., Flatt. (2016). Science and technology of concrete admixtures. *Chemistry of Chemical Admixtures*. Woodhead Publishing, 149-218.

[8] Farzad, S. (2012). Effects of TiO<sub>2</sub> nanoparticles on increasing split tensile strength of limestone aggregate-based concrete. *Journal of American Science*, 8(2), 715-718. ISSN: 1545-1003. <http://www.americanscience.org>.

[9] Hunashyal, A. M., Tippa, S. V., Quadri, S. S., Banapurmath, N. R. (2011). Experimental Investigation on Effect of Carbon Nanotubes and Carbon Fibres on the Behavior of Plain Cement Mortar Composite Round Bars under Direct Tension. *ISRN Nanotechnology*, ID 856849. doi:10.5402/2011/856849

[10] Visser, J. H. M. (2014). Influence of the carbon dioxide concentration on the resistance to carbonation of concrete. *Construction and Building Materials*, 67, 8-13. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.11.005

[11] Marangu, J. M., Thiong'o, J. K., Wachira, J. M. (2019). Review of Carbonation Resistance in Hydrated Cement Based Materials. *Journal of Chemistry*, 1-6, ID 8489671. <https://doi.org/10.1155/2019/8489671>

[12] Smykatz-Kloss, W. (1974). Differential Thermal Analysis, Applications and Results in Mineralogy. *Minerals and Rocks*, II, 185.

[13] DSTU B B.2.7-224:2009. (2010). Building materials. Concrete strength control rules. *Minregionstroy of Ukraine, Kyiv*, 23.

[14] Methodical instructions for determining the sensitivity of microorganisms to antimicrobials by the method of diffusion into agar using standard disks with antibiotics (approved by the SCCM Scientific Council of Ukraine from 20.12.2007). (2010).

[15] Bertron, A. (2014). Understanding interactions between cementitious materials and microorganisms: a key to sustainable and safe concrete structures in various contexts. *Mater Struct.*, 47(11), 1787-1806. doi:10.1617/s11527-014-0433-1

Шкромада Оксана Іванівна

Доктор ветеринарних наук, доцент

Кафедра терапії, фармакології, клінічної діагностики та хімії

Сумський національний аграрний університет

вул. Г. Кондратьєва, 160, м. Суми, Україна, 40021

E-mail: [oshkromada@gmail.com](mailto:oshkromada@gmail.com)

Контактний тел.: 0999190657