

УДК 666.972:666.972.53

Толмачов С.М., д-р техн. наук

ОСОБЛИВОСТІ ПОВІТРОУТЯГНЕННЯ У ДОРОЖНІ БЕТОНИ ТА ФІБРОБЕТОНИ

Анотація. У статті показано, вплив додатково залученого повітря на властивості дорожнього цементного бетону. Встановлено, що додаткове повітря можна залучити в бетон за допомогою повітроутягуючих добавок або за допомогою поліпропіленової фібри. Показано, що порова структура бетону залежить від способу повітроутягнення. У статті наведено теоретичне обґрунтування причин відмінності в поровій структурі бетону.

Ключові слова: дорожній бетон, фібробетон, повітроутягнення, міцність, морозостійкість, порова структура

УДК 666.972:666.972.53

Толмачев С.М., д-р техн. наук

ОСОБЕННОСТИ ВОЗДУХОВОВЛЕЧЕНИЕ В ДОРОЖНЫЕ БЕТОНЫ И ФИБРОБЕТОНЫ

Аннотация. В статье показано, влияние дополнительно вовлеченного воздуха на свойства дорожного цементного бетона. Установлено, что дополнительный воздух может вовлечь в бетон с помощью воздухововлекающих добавок или с помощью полипропиленовой фибры. Показано, что поровая структура бетона зависит от способа воздухововлечения. В статье приведено теоретическое обоснование причин отличия в поровой структуре бетона.

Ключевые слова: дорожный бетон, фибробетон, воздухововлечение, прочность, морозостойкость, поровая структура

UDC 666.972:666.972.53

Tolmachov S. M., Dr. Tech. Sci.

FEATURES OF AIR ENTRAINMENT IN CONCRETE ROAD AND FIBER-REINFORCED CONCRETE

Abstract. The article shows the influence of entrained air further on the properties of cement concrete road. It is found that the additional air can engage in concrete using air-entraining additives or by using polypropylene fibers. It is shown that the pore structure of the concrete depends on the method of air entrainment. The article gives a theoretical justification reasons for the differences in the pore structure of the concrete.

Keywords: road concrete, fiber concrete, air entrainment, strength, frost resistance, pore structure

Вступ

Для підвищення довговічності дорожніх і аеродромних бетонів в їх склад зазвичай вводять додаткову кількість повітря. У нормативних документах різних країн прийнято, що забезпечити необхідну морозостійкість можливо при вмісті залученого повітря на рівні 3,5...7,5 %. На практиці найчастіше використовують повітроутягнення на рівні 5...6 %, не більше. Зазвичай для цього використовують повітроутягуючі хімічні добавки. Відомо також, що при повітроутягнення негативно впливає на міцність бетонів. Вважається, що 1 % залученого повітря приводить до зниження міцності бетону на 4...5 %. Наші дослідження показали, що зниження міцності від повітроутягнення залежить від кількості додаткового повітря і може досягати майже 14 % на 1 % повітря [1]. Додаткове повітроутягнення можливо також при введенні комплексу добавок, що складається з суперпластифікатору (СП) і повітроутягуючої добавки (ПУ), наприклад, СНО [2], що на думку авторів можна пояснити кращими параметрами диспергування повітряної фази. Було також встановлено, що додаткове повітроутягнення можна забезпечити за рахунок введення поліпропіленової фібри [3].

Стає очевидним, що для поліпшення довговічності і зниження негативного впливу повітроутягнення на властивості бетону, необхідно не просто введення додаткової кількості повітря, а модифікація порової структури. Останнім часом в дорожні бетони вводять різного роду фібру, тому метою дослідження було встановлення особливостей повітроутягнення в бетонні суміші в присутності різних повітроутягуючих добавок.

Експериментальні та теоретичні дослідження

Слід зазначити, що загальновідомою причиною зниження міцності бетонів є збільшення в першу чергу загальної та відкритої пористості.

Дослідження, проведені нами, при науковому супроводі будівництва ділянок бетонних доріг і майданчиків в період з 2005 до 2015 року показали, що при утриманні в бетонній суміші залученого повітря в кількості 3,4...3,7 % морозостійкість бетонів відповідає марці не нижче F300 (табл. 1). Обстеження цих ділянок в 2016 році показало, що вони знаходяться в задовільному стані. Міцність бетонів з повітровтягненні 5,6 % на 15 % менше, ніж бетонів з вмістом повітря 3,5 %. Водопоглинання складу з великим повітровтягненням більше на 16 %, що можна пояснити частковим збільшенням відкритої пористості, яке супроводжує зростання повітровтягнення. Коефіцієнти морозостійкості після 200 і після 300 циклів заморожування-відтавання обох складів не нижче 0,95, що вище в бетонах з великою кількістю повітря.

Таблиця 1 – Властивості бетонів з різною кількістю залученого повітря

№ з/п	Кількість залученого повітря	Міцність при стиску у віці 28 діб, R _{ст} , МПа	Водопоглинання W, %	K _{мрз} після кількості циклів	
				200	300
1	3,6 %	43,1	2,5	1,04	0,96
2	5,6 %	36,8	2,9	1,1	0,97

* в складі бетонної суміші знаходиться комплекс суперпластифікатор + повітровтягуюча добавка

Важливим наслідком цих практичних досліджень є те, що міцність бетону складу з меншим повітровтягненням відповідає марці M450, а з більш високим – марці M350. Додатково проведені дослідження показали, що збільшення кількості залученого повітря за рахунок традиційного застосування повітровтягуючих добавок, приводить також до збільшення числа відкритих пір і зміщення їх середнього радіусу в більшу сторону.

Іншим способом поліпшення властивостей бетону, в тому числі морозостійкості є введення фібри. Однак, деякі вчені, наприклад, як в [4], це пояснюють підвищенням адгезії волокон до цементної матриці. Дані табл. 2 показують, що застосування повітроутягуючої добавки забезпечує необхідний рівень вмісту додаткового повітря (4,6 % при такий витраті добавки). При введенні комплексу суперпластифікатор + повітровтягуюча добавка вміст залученого повітря зростає, що пов'язано зі слабкою повітроутягуючою здатністю суперпластифікаторів.

Таблиця 2 – Вміст залученого повітря в бетонних сумішах з добавками

№ з/п	Вид и кількість добавки	Вміст залученого повітря, %
1	ВВ, 0,1 % від $m_{ц}$	4,6
2	СП 0,7 % + ПУ 0,1 % від $m_{ц}$	5,2
3	Ф 0,24 % від $m_{ц}$	4,2
4	СП 0,7 % + ПУ 0,1 % + Ф 0,24 % від $m_{ц}$	6,8

* ПУ - повітроутягуюча добавка Sika Mix Plus, СП - суперпластифікатор Sika 2508, Ф - фібра поліпропіленова

Встановлено, що до підвищення вмісту залученого повітря приводить також введення поліпропіленової фібри (до 4,2 %). З огляду на повітровтягувальну здатність всіх трьох добавок, їх спільне введення в бетонну суміш має привести до значного повітроутягнення, що підтвердили результати досліджень (табл. 2) – кількість повітря зросла до 6,6 %. Ця кількість перевищує рекомендовані межі (5...6 %) і може привести до значного зниження міцності бетону, особливо, якщо додатково залучене повітря утворює велику пористість. З огляду на те, що поліпропіленова фібра являє собою досить міцні волокна, можна припустити, що ці волокна при перемішуванні будуть сприяти руйнуванню, в першу чергу, великих повітряних бульбашок.

Дослідження, які були проведені О. Шелудько і Дюйвісом показали, що мінімальна товщина плівки в водному розчині олеату натрію, яка утворює бульбашку повітря, становить 40 Å, а у водному розчині змочувача ОП-7 – в два рази більше, приблизно 85 Å [5]. Товщина цих плівок в два рази більше довжини молекули ПАР і також як поверхневий натяг залежить від концентрації ПАР. При концентрації розчину ОП-7 $C = 0,5 \%$, його поверхневий натяг становить $\sigma = 35 \cdot 10^{-3}$ Н/м. Для олеату натрію вже при $C = 0,1 \%$ $\sigma \approx 30 \cdot 10^{-3}$ Н/м, а при $C = 0,05 \%$, збільшується до $\sigma \approx 40 \cdot 10^{-3}$ Н/м [6].

Відомо, що в стійкій піні (яку створюють за допомогою піноутворювача, типу олеату натрію або ОП-7) окремі її бульбашки з часом можуть змінювати свої розміри [5]. При цьому розміри дрібних бульбашок завжди зменшуються, а великих – збільшуються. Це відбувається тому, що газ, в дрібних бульбашках відчуває більший тиск, ніж газ у великих бульбашках. Цей тиск направлено назовні бульбашки і прагне вирівнятися із зовнішнім тиском, спрямованим всередину бульбашки за рахунок дифузії газу через рідку плівку. Відповідно до рівняння Лапласа, капілярний тиск зростає зі зменшенням радіуса бульбашки і збільшенням поверхневого натягу:

$$\Delta P = \frac{4 \cdot \sigma}{R}, \quad (1)$$

де σ – поверхневий натяг;

R – радіус бульбашки;

коефіцієнт 4 враховує те, що бульбашка має дві поверхні - внутрішню і зовнішню.

При незмінному σ цей тиск залежить від радіуса і, отже, зі збільшенням радіуса стає менше, що приводить до можливості збільшення обсягу бульбашки. І, навпаки, при малих радіусах воно зростає, відбувається стиснення бульбашки.

Необхідно враховувати також те, що при перемішуванні бетонної суміші, що містить бульбашки залученого повітря, спостерігається руйнування найбільших бульбашок саме в силу того, що зі збільшенням радіуса бульбашки відбувається зменшення величини капілярного тиску. При цьому стабільність (стійкість) бульбашки знижується. Прикладання в цей момент до бульбашки зовнішнього тиску приводить до його руйнування. З огляду на те, що поліпропіленова фібра являє собою волокна діаметром близько 5 мкм, питомий тиск, який чиниться такими волокнами при перемішуванні досить великий, і може приводити до додаткового руйнування бульбашок залученого повітря, в першу чергу, великих. З іншого боку, фібра сприяє додатковому повітроутягненню, але розміри цих бульбашок повітря повинні відрізнятися більшою однорідністю і бути меншого радіуса.

Висловлене підтверджують дані зміни кількості залученого повітря з різними добавками (табл. 2). Наприклад, при введенні до складу бетонної

суміші одночасно суперпластифікатору, повітроутягуючої добавки і фібри кількість залученого повітря зростає неадитивно.

Дані оптичної мікроскопії відколів розчину бетону, що містить суперпластифікатор в комплексі з повітроутягуючою добавкою або фіброю підтвердили висловлене припущення про те, що введення фібри при перемішуванні суміші сприяє руйнуванню великих повітряних бульбашок (рис. 2). Очевидно, що в бетоні, що містить, наприклад, суперпластифікатор Sika 2508 і повітроутягуючу добавку Sika Mix Plus, разом з дрібними повітряними бульбашками присутні також великі, які і знижують міцність бетону (рис. 1 а, 2 а). На відміну від цього, в бетоні без Sika Mix Plus, але що містить поліпропіленову фібру, кількість залученого повітря менше (що узгоджується з даними табл. 2), і він представлений бульбашками малого діаметра (близько 6 мкм).

Деяким поясненням більшої однорідності і більш високою стійкістю залучених фіброю повітряних бульбашок може служити те, що збільшення в'язкості середовища приводить до підвищення стійкості пін. Якщо вважати, що введення повітроутягуючої ПАР сприятиме деякому зниженню в'язкості бетонної суміші, а введення фібри приводить до підвищення в'язкості, то більш в'язка суміш забезпечить більшу стабільність повітряних бульбашок, що містяться в ній.

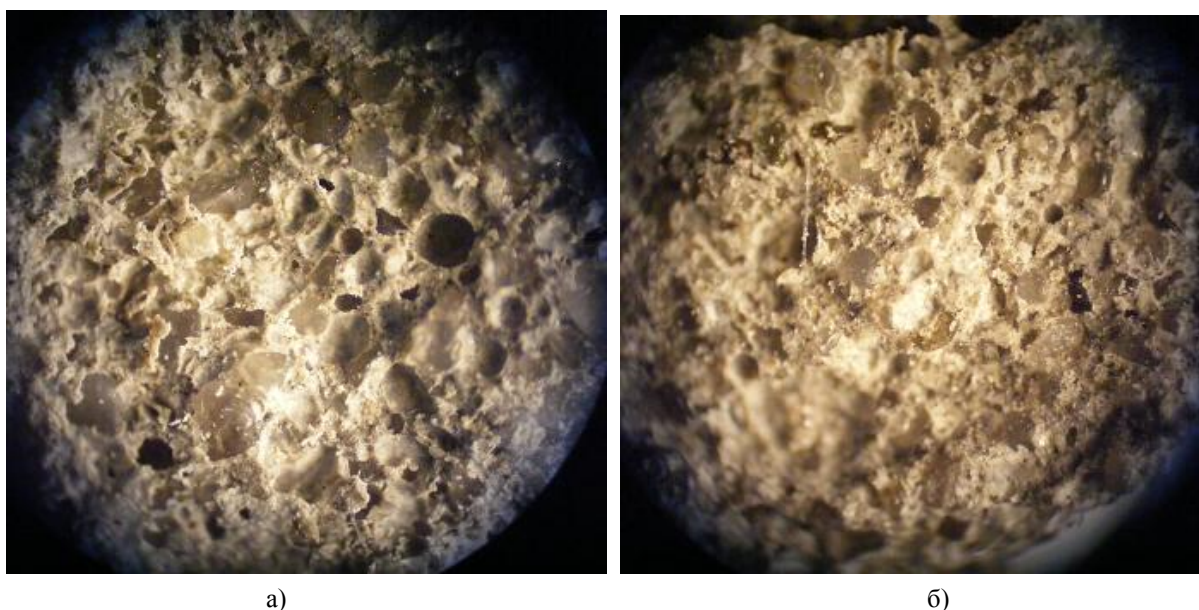


Рисунок 1 – Структура бетону з добавками: а) СП + ПУ (збільшення x32); б) СП + Фібра (збільшення x32)

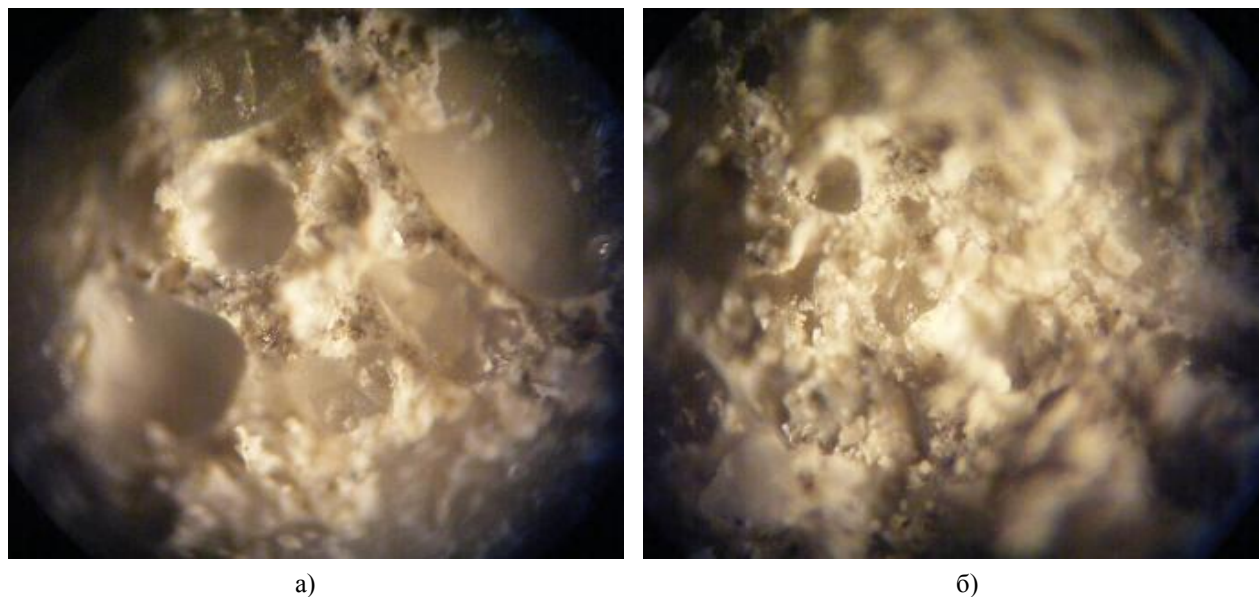


Рисунок 2 – Структура бетону з добавками: а) СП + ПУ (збільшення x100); б) СП + Фібра (збільшення x100)

Розглянемо ще один компонент бетонної суміші, який впливає на стабільність повітряної бульбашки – це суперпластифікатор. Підвищенню стійкості повітряних бульбашок сприятиме, так званий, «ефект Гіббса», який проявляється тільки в середовищах з ПАР [5]. Він пояснюється наявністю у плівки, яка обмежує бульбашку, досить високої в'язкості в поверхневому шарі. Підвищена в'язкість обумовлена існуванням приповерхневого подвійного електричного шару. В цьому випадку є певна суперечність: з одного боку згідно з формулою Лапласа при зниженні поверхневого натягу полегшується можливість деформування і руйнування повітряної бульбашки, а з іншого – встановлено, що основну роль грає здатність плівки підвищувати або знижувати поверхневий натяг при локальних деформаціях. Цю здатність Гіббс називав «ефективною пружністю плівки». Вона полягає в тому, що якщо одна ділянка плівки схильна розтягуванню, то відбувається збільшення його поверхні, а значить, концентрація ПАР на цій ділянці знизиться. Це приведе до підвищення поверхневого натягу на межі розділу фаз, що приведе до появи на цій ділянці стискаючих зусиль, що приводять до зміцнення. Цей ефект проявляється в тим більшою мірою, чим вище здатність плівки швидко змінювати поверхневий натяг при локальній зміні концентрації. Крім того, даний ефект практично не проявляється в розчинах ПАР, які мають постійний поверхневий натяг, який не залежить від концентрації, що характерно для ПАР, які володіють повітровтягувальною дією. Це, наприклад, олеат натрію або ОП,

в яких σ стає незмінною при концентраціях вище 0,1 %. Але він може добре проявлятися в розчинах йоногенних ПАР, наприклад, суперпластифікаторів. Тому повітряні бульбашки, що залучені в пластифіковану бетонну суміш за рахунок поліпропіленової фібри, будуть більш стійкими, ніж бульбашки, утворені дією повітроутягуючої добавки. Велика стійкість повітряних бульбашок в присутності фібри підтверджена в дослідженнях [7]. Автори пояснюють це кращим зчеплення між ними і протяжними волокнами фібри.

Дані табл. 3 також підтверджують висловлене вище. При приблизно однаковій кількості залученого повітря в бетон, що містить комплекс СП + ПУ має на 2 % меншу щільність і на 11 % меншу міцність у порівнянні з бетоном, що містить комплекс СП + Ф. Про менший вміст великих пір свідчить також трохи більше водопоглинання таких бетонів.

Таблиця 3 – Властивості бетонів з добавками

№ з/п	Показники	СП + Ф + ПУ	СП + Ф	СП + ПУ
1	Повітроутягнення, %	6,6	4,6	4,8
2	Міцність, МПа	41,4	49,7	44,1
3	Щільність, кг/м ³	2330	2400	2360
4	Стиранність, гр/см ²	0,30	0,25	0,3
5	Водопоглинання, W _m , %	2,8	2,0	2,3

Прямі дослідження морозостійкості бетонів, що містять зазначені комплекси добавок, показало, що їх морозостійкість відповідає марці F400 (рис. 3). Незважаючи на те, що коефіцієнт морозостійкості після 400 циклів випробувань у бетонів, що містять СП + Ф трохи нижче, ніж у бетонів з комплексом СП + ПУ, особливу увагу викликають кращі показники міцності, водопоглинання та стиранність в бетонах, що містять комплекс СП + Ф, що вельми важливо для дорожніх і аеродромних бетонів. В реальних умовах експлуатації ці показники будуть сприяти підвищенню довговічності таких бетонів.

Проведемо розрахунок капілярного тиску, що виникає в повітряних бульбашках. Дослідження показали, що в системі СП + ПУ середній діаметр бульбашок становить 15 мкм, а в системі СП + Ф він зменшений до 6 мкм (рис. 1, 2).

За нашими даними поверхневий натяг на межі розподілу фаз «водний розчин ПАР – повітря» при концентрації СП Sika 2508 1 % становить $\sigma =$

0,047Н/м. Поверхневий натяг при концентрації повітроутягуючої добавки Sika Mix Plus 0,25 % становить $\sigma = 0,062$ Н/м. Величина поверхневого натягу водного розчину СП + ПУ зазначених концентрацій становить $\sigma = 0,043$ Н/м.

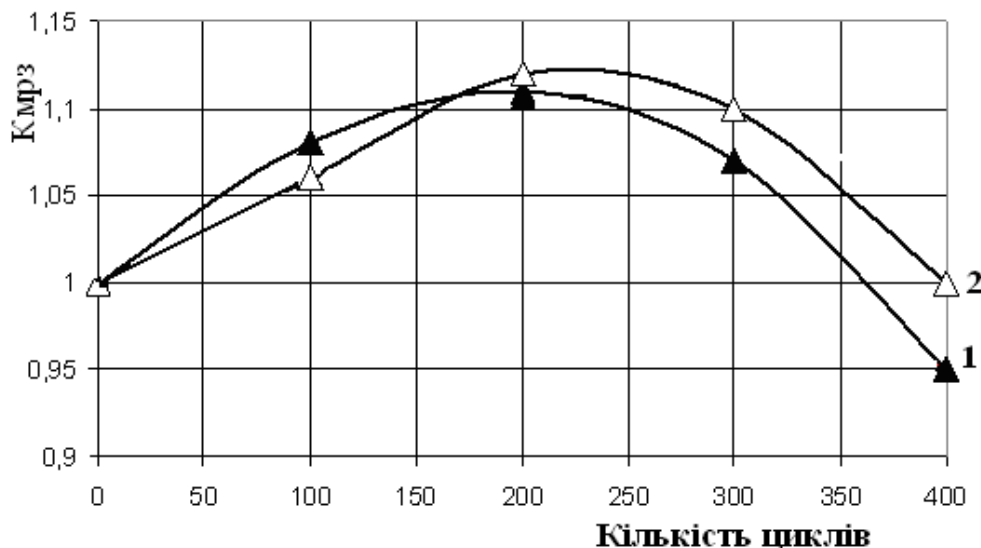


Рисунок 3 – Морозостійкість бетонів з різними добавками: 1) склад з СП + Ф; 2) склад з СП + ПУ

Тоді для системи СП + ПУ $\Delta p = 4\sigma/R = 4 \cdot 0,043 / 7,5 \cdot 10^{-6} = 22930$ Па або 22,9 кПа.

Для системи СП + Ф $\Delta p = 4\sigma/R = 4 \cdot 0,047 / 3 \cdot 10^{-6} = 62666$ або 62,7 кПа.

Тобто капілярний тиск в повітряних бульбашках при введенні до складу бетонної суміші поліпропіленової фібри в 2,74 рази вище, ніж в бульбашках, що утворюються повітроутягуючою добавкою. Це підтверджує велику стійкість таких бульбашок.

Висновки

1. Показано, що застосування поліпропіленової фібри замість повітроутягуючої добавки дозволяє забезпечити необхідне повітроутягнення при одночасному поліпшенні експлуатаційних властивостей бетону. Це обумовлено формуванням більш однорідною і дрібнопористою порової структури за рахунок дії фібри.

2. Встановлено, що застосування поліпропіленової фібри дозволяє при необхідності зменшити витрату повітроутягуючої добавки.

3. Теоретично обґрунтовано і розрахунковим шляхом доведено позитивний вплив суперпластифікаторів спільно з поліпропіленової фіброю на

підвищення стабільності існування повітряних бульбашок в порівнянні з системою суперпластифікатор і повітроутягуюча добавка.

Література

1. Толмачев С.Н. Снижение прочности бетона при введении воздухововлекающих добавок в бетонную смесь / С.Н. Толмачев, А.В. Бражник // Современные проблемы строительства и жизнеобеспечения: безопасность, качество, энерго- и ресурсосбережение: сб. трудов III Всероссийской научн.-практ. конф. – Якутск, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Амосова. - 3-4 марта 2014. - С. 369 – 373.

2. Шитиков Е.С. Лигносультфонатные пластификаторы нового типа для бетонных смесей и бетонов различного назначения / Е.С. Шитиков, А.М. Кириллов, Л.А. Феднер, С.Н. Ефимов, А.Б. Самохвалов // Строительные материалы. - 2002. - № 6. - С. 36 – 38.

3. Бражник А.В. Монолитные дорожные цементные бетоны высокой морозостойкости с органоминеральным комплексом и фиброй. Дисс...канд. техн. наук. – Харьков, 2015. - 151 с.

4. Василик П.Г. Применение волокон в сухих строительных смесях / П.Г. Василик, И.В. Голубев // Строительные материалы. - 2002. - № 9. - С. 26 – 27.

5. Воюцкий С.С. Курс коллоидной химии / С.С. Воюцкий. – М.: «Химия», 1975. – 512 с.

6. Парфенова Л.Н. Гидродинамические и поверхностно-активные свойства гуматов / Л.Н. Парфенова, М.В. Труфанова, С.Б. Селянина и др. // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12. – Ч. 7. – С. 1411 – 1417.

7. Моргун Л.В. Влияние дисперсного армирования на агрегативную устойчивость пенобетонных смесей / Л.В. Моргун, В.Н. Моргун // Строительные материалы. – 2003. – № 1. – С. 33 – 35.

Рецензенти:

Мішутін А.В., д-р техн. наук, Одеська державна академія будівництва і архітектури.
Снітко В.П. канд. нехн. наук. Національний транспортний університет.

Reviewers:

Mishutin A.V., Dr. Tech. Sci., Odessa State Academy of Construction and Architecture.
Snitko V. P. candidate. nehn. Sciences. National Transport University.

Стаття надійшла до редакції: **28.12.2016 р.**