

О.П. Симоненко, О.Б. Ступін, П.В. Асланов, О.Ю. Собко  
Донецький національний університет,  
кафедра фізики нерівноважних процесів, метрології і екології

## ВИСОКОКОНЦЕНТРОВАНА СУСПЕНЗІЯ ПОЛІЕТИЛЕНОКСИДУ І ПЕРСПЕКТИВИ ЇЇ ПРАКТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ В ЕНЕРГООЩАДЖЕННІ Й ЕКОЛОГІЇ

© Симоненко О.П., Ступін О.Б., Асланов П.В., Собко О.Ю., 2012

Наведено результати експериментальних даних щодо розробки складу, технології приготування і використання висококонцентрованої суспензії поліетиленоксиду в енергоощадженні й екології.

**Ключові слова:** енергоощадження, екологія, ефект Томса, висококонцентрована суспензія, технологія приготування, галузі застосування.

**This article represents the results of experimental findings on the development of structure, technology of preparation and usage of highly concentrated suspension of polyethyleneoxide in energy saving and ecology.**

**Key words:** energy-saving, ecology, Toms` effect, highly concentrated suspension, preparation, application.

**Вступ.** Цунамі, яке виникло в результаті сильного землетрусу біля берегів Японії, масові пожежі й повені в 2010–2011 рр., що відбулися фактично на всіх континентах нашої планети, викликали низку техногенних катастроф, були причиною загибелі великої кількості людей, нанесли і продовжують наносити значний матеріальний збиток, суттєво забруднюють навколишнє середовище.

Під час ліквідації наслідків катастроф і аварій стало очевидно, що використовувані для цих цілей технологічні процеси і технічні засоби ще зовсім не досконалі. Передовсім це стосується гасіння великомасштабних пожеж, аварійного відкачування в короткі терміни великої кількості води, розбирання численних завалів, придушення пилу в зоні лиха тощо. Особливо треба зауважити, що дуже часто ці роботи трапляється виконувати у техногенно-небезпечних умовах. Крім цього, в результаті аварій з експлуатації часто виходять підприємства, які виробляють електроенергію. Така ситуація ставить завдання виконати аварійно-відновлювані роботи, створити нормальні умови життя людям, які проживають у районах стихійного лиха, а також забезпечити відповідні служби технологіями і технічними засобами, що характеризуються незначним споживанням електроенергії. Цілковито очевидно, що наявні і непошкоджені під час стихійного лиха або техногенних аварій системи і устаткування (тепло- та холодозабезпечення, каналізації тощо) експлуатуватимуть з максимальним навантаженням, тобто в так званому “піковому режимі”.

У роботах [1–4], в яких використано однорідні розчини високомолекулярних полімерів – поліетиленоксиду (ПЕО) і поліакриламід (ПАА), показано принципову можливість підвищення ефективності роботи гідравлічних систем за рахунок зниження гідродинамічного опору тертя в трубопроводах і проточних вузлах гідромашин. Але, як засвідчує практика, такий спосіб не використовують широко. Це пов’язано з необхідністю застосування для його реалізації громіздкого обладнання. Окрім цього, однорідні розчини в результаті окислювальної деструкції дуже швидко втрачають властивість знижувати гідродинамічний опір тертя.

Автори робіт [5–7] вперше в Україні застосували для зниження гідродинамічного опору тертя полімерні суспензії й ультраслабкі полімерні покриття, які з використанням спеціальних генераторів можуть застосовуватися в пожежогасінні для збільшення пропускної спроможності трубопроводів каналізаційних систем і аварійного відкачування води. Але, як показали результати промислових випробувань для використання в екстремальних ситуаціях необхідно створити досконалішу полімерну композицію і генератор приготування розчину з неї.

**Мета роботи** – розроблення складу, основ технології приготування висококонцентрованої суспензії поліетиленоксиду (ПЕО) і визначення перспектив її практичного застосування в енергоощадженні й екології.

**Основна частина.** У багатьох випадках під час використання суспензій ПЕО в енергоощадженні у зв'язку із зниження гідродинамічного опору тертя в трубах і проточних частинах гідромашин (ефект Томса), а також для вирішення проблем екології і техногенної безпеки виникає необхідність у використанні композицій з підвищеним вмістом високомолекулярного полімеру. Особливо гостро ця проблема стоїть у разі використання таких композицій на автономних об'єктах (катерах, літаках і вертольотах, які задіяні для гасіння великомасштабних пожеж), можливості яких обмежені щодо зберігання і транспортування великої кількості полімерних матеріалів, а також у мобільних установках, за тривалого застосування яких виникає необхідність доставки композицій на велику відстань без транспортних засобів на місце використання (аварійне відкачування і пожежогасіння у віддалених забоях вугільних шахт тощо).

У зв'язку з цим в останні роки вчені всього світу інтенсивно працюють над створенням висококонцентрованих полімерних композицій (суспензій, паст, брикетів тощо) з мінімальним вмістом баласту (наприклад, дисперсійного середовища в суспензіях і пастах), а також наповнювача в твердих полімерних брикетах.

У цій роботі показано можливість створення висококонцентрованої суспензії ПЕО і розглянено варіанти її практичного застосування в енергоощадженні й екології.

Основними вимогами до полімерної суспензії, яка призначена для застосування на автономних об'єктах є високий вміст полімеру і велика швидкість її розчинення. Так, наприклад, під час використання ПЕО для зниження гідродинамічного опору об'єктів, що рухаються у воді, час розчинення полімеру, як правило, не повинен перевищувати 20 секунд.

У роботах [8, 9] наведено склади суспензій, до яких входять тонкодисперсний порошок ПЕО, пропіленгліколь, неіоногенна поверхнево-активна речовина (ПАР) (0–5) % ваг. і загусник (0,1–5) % ваг. [8] і рівноцільні суміші дрібнодисперсного порошку ПЕО з гліцерином [9]. Гідродинамічна ефективність водних розчинів цих суспензій на 20-й секунді з початку розчинення дуже мала. Це пов'язано з великою в'язкістю таких суспензій і малою швидкістю їх розчинення у воді. Зі збільшенням у таких суспензіях вмісту полімеру вище 30 % ваг. величина ефекту зниження гідродинамічного опору тертя у водних розчинах різко зменшується.

У роботі [10] зроблено спробу підвищити вміст ПЕО в суспензії за рахунок використання як дисперсійного середовища (ДС) суміші двох рідин, які не розчиняють полімер, але самі і в суміші дуже добре розчиняються у воді.

До складу такої суспензії входять порошкоподібний ПЕО з щільністю 1,15–1,26 г/см<sup>3</sup> і дисперсійне середовище, в якому один з рідких компонентів має щільність нижче від щільності ПЕО, а інший – вище. Найнижчу в'язкість з таких рідин, дібраних для приготування ДС із щільністю близькою до щільності часток ПЕО, є етиленгліколь і гліцерин. Густина ДС з суміші етиленгліколя і гліцерину може становити 96,5–103,5 % від щільності ПЕО. В'язкість суміші гліцерину з етиленгліколем нижча за в'язкість чистого гліцерину – ДС, яке використовувалось у роботі [9] і суміші етиленгліколя із загусником – ДС, яке рекомендоване в роботі [8]. Тому суспензія ПЕО, склад якої наведений у патенті [10], може мати підвищений вміст полімеру, велику швидкість розчинення у воді і вищу гідродинамічну ефективність на 20-й секунді з початку розчинення цієї суспензії, склади яких наведено в роботах [8, 9] (за однакового вмісту в них полімеру). Проте, як показали дослідження, гідродинамічна ефективність водних розчинів цієї суспензії залишається низькою, значно меншою від максимально можливої.

Суспензії ПЕО, склад яких наведено в [8–10], готують звичайним механічним змішуванням компонентів, які входять до їхнього складу. Метою цієї роботи є підвищення в суспензії концентрації ПЕО, гідродинамічної ефективності її водних розчинів за допомогою збільшення швидкості розчинення ПЕО і зменшення деструкції полімерних макромолекул у процесі його розчинення. Вказана мета досягається введенням до складу полімерної суспензії дрібнодисперсного карбонату кальцію за такого співвідношення компонентів, ваг. %:

ПЕО	35–60;
карбонат кальцію	1,8–22,0;
дисперсне середовище	останнє до 100,

а також способом її приготування, який полягає в тому, що порошкоподібний ПЕО ретельно змішують з тонкодисперсним карбонатом кальцію, з отриманням однорідної маси, а отриману суміш пресують під тиском  $80\text{--}100\text{ кгс/см}^2$  у кульки діаметром від 1,0 до 3,0 мм. Отримані таким способом кульки надалі змішують з дисперсійним середовищем. Як дисперсійне середовище можна використовувати гліцерин, етиленгліколь, суміш гліцерину з етиленгліколем або з водою. Під час виконання цієї роботи для приготування суспензії використовували ПЕО виробництва Новосибірського НДІ хімічної технології з розмірами полімерних часток менше 200 мкм. Молекулярна маса цього ПЕО дорівнювала 3–7 млн. Попередні дослідження показали, що вміст ПЕО в висококонцентрованої суспензії не повинен перевищувати 60 % ваг., оскільки його подальше підвищення приводить до різкого збільшення в'язкості суспензії. Окрім цього, відбувається зменшення швидкості розчинення ПЕО і, як наслідок, знижується гідродинамічна ефективність її розчинів. Використання суспензії ПЕО, що містить менше 35 % ваг., вважається недоцільним, оскільки для досягнення рівних значень величини ефекту зниження гідродинамічного опору тертя необхідно збільшувати кількість такої суспензії обернено пропорційно щодо вмісту в ній полімеру.

Розміри частинок порошкоподібного карбонату кальцію для приготування суміші з ПЕО не повинні перевищувати 50 мкм. За більших розмірів цих частинок ефективність використання суспензії погіршується. У цій роботі як природний мінерал, що містить карбонат кальцію, використовували крейду тонкого помелу. Концентрація карбонату кальцію в суспензії не має бути менше 1,8 % ваг., оскільки в цьому випадку пресовані з його суміші з ПЕО кульки (навіть після вивільнення полімерних часток) матимуть низьку швидкість розчинення у воді, а водні розчини суспензії ПЕО – малу гідродинамічну ефективність. Збільшення концентрації карбонату кальцію у суспензії більше 22,0 % ваг. (за рахунок зменшення вмісту дисперсійного середовища) підвищує в'язкість суспензії ПЕО і теж зменшує гідродинамічну ефективність її водних розчинів.

Пресування суміші ПЕО з карбонатом кальцію проводили за тиску від 80 до 100 кгс/см<sup>2</sup>. Якщо тиск буде більшим  $100\text{ кгс/см}^2$  – зменшується швидкість розчинення ПЕО з отриманих пресуванням кульок і зменшується гідродинамічна ефективність водного розчину суспензії загалом. Зі зниженням тиску пресування нижче  $80\text{ кгс/см}^2$  зменшується щільність кульок, підвищується в'язкість суспензії гідродинамічна ефективність її водних розчинів.

З суміші ПЕО з карбонатом кальцію пресували кульки діаметром від 1 до 3 мм. Якщо діаметр кульок буде меншим ніж 1 мм – підвищується в'язкість суспензії і зменшується гідродинамічна ефективність її розчинів. Збільшення діаметру кульок більше ніж 3 мм зменшує швидкість їх розчинення у воді і зменшує гідродинамічну ефективність водних розчинів суспензії.

Якщо порошкоподібну суміш ПЕО з карбонатом кальцію не піддавати пресуванню з отриманням кульок необхідних розмірів і форми, а безпосередньо змішувати з дисперсійним середовищем, то в'язкість отриманої так суспензії буде дуже велика, величина ефекту зниження гідродинамічного опору тертя в її водних розчинах на 20-й секунді розчинення дуже малою, навіть меншою від величини ефекту в розчинах суспензій, склади яких наведено в патентах [8, 10]. У випадку, якщо пресування проводити не суміші ПЕО з карбонатом кальцію у вказаній пропорції, а пресувати чистий порошкоподібний ПЕО, то швидкість розчинення ПЕО з таких кульок буде дуже малою, а значення ефекту послаблення гідродинамічного опору тертя буде практично дорівнювати нулю.

Пресовані частки повинні мати чітку кулясту форму, оскільки в цьому випадку в'язкість суспензії буде мінімальною, а швидкість розчинення порівняно з частками інших форм – циліндровою, кубічною тощо – максимальною.

Розчинення суспензії ПЕО здійснювали на установці, яка являє собою скляний циліндр діаметром 90 мм і заввишки 120 мм, в якому обертався ротор лопатевої мішалки діаметром 22 мм. Споживана потужність мішалки – 12 Вт/л.

У цій установці розчиняли 5 мл суспензії ПЕО в 500 мл води впродовж 20 секунд. Після цього розчин піддавали п'ятихвилинному центрифугуванню для розділення розчиненого і нерозчиненого ПЕО. Центрифугування здійснювали на центрифусі ОПН-3 зі швидкістю обертання її ротора 3000 об/хв.

Гідродинамічну ефективність розчинів суспензій визначали після розбавлення водою концентрованих розчинів до робочої концентрації по ПЕО, рівною  $5 \cdot 10^{-4}$  %. Дослідження проводили на турбулентному капілярному реометрі. Довжина капілярного каналу і його діаметр дорівнювали 1,16 мм і 1000 мм відповідно. Виміри проводили при числі Рейнольдса, що дорівнює  $Re = 1,2 \cdot 10^4$ , яке розраховували за в'язкістю води.

Значення ефекту зменшення гідродинамічного опору тертя розраховували за формулою:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda}, \% = \frac{\Delta p_e - \Delta p_p}{\Delta p_e} \cdot 100 \%,$$

де  $\Delta p_a$  і  $\Delta p_\delta$  – перепади тиску під час руху в капілярі води і розчину полімерної суспензії (за їх постійної витрати), відповідно. Похибка під час визначення величини  $\Delta\lambda/\lambda$  не перевищувала 1,0 %.

Приготування суспензії проводили за допомогою змішування відповідної ДС і кульок, отриманих пресуванням суміші порошку ПЕО з дрібнодисперсним карбонатом кальцію. Змішування проводили з використанням лопатевої мішалки з числами обертів 60 об/хв протягом 30 хвилин до отримання однорідного складу.

Приклад 1. 35,0 г порошку ПЕО з молекулярною масою 5,5 млн змішували з 1,8 г дрібнодисперсного карбонату кальцію. З цієї суміші під тиском  $80 \text{ кГ/см}^2$  пресували кульки діаметром 1 мм, які потім змішували з 50,3 мл (63,2 г) гліцерину. Отриману суспензію розчиняли у воді. Величина ефекту зниження гідродинамічного опору тертя у водному розчині цієї суспензії з часом розчинення 20 секунд дорівнювала 27,2 %, а за повного розчинення – 54,3 % (див. табл. 1).

Приклади 2–8. З використанням методики (див. приклад 1) готували суспензії ПЕО. Вміст складових компонентів суспензій, умови їх приготування і результати експериментальних випробувань наведено в табл. 1.

Приклад 9 (дані про склад суспензії і умови її приготування наведено в роботі [9]). У 51,7 мл (65,0 г) гліцерину додавали 35,0 г ПЕО з молекулярною масою 5,5 млн і ретельно перемішували. Отриману суспензію розчиняли у воді. Величина ефекту зниження гідродинамічного опору у водному розчині (на 20-й секунді розчинення) становила 15,5 %, а за повного розчинення – 39,9 %.

Приклади 10–15 (дані про склади суспензій і умови їх приготування наведені в роботах [9–10]). За методикою, яка була використана в прикладі 9, готували суспензію ПЕО. Вміст компонентів суспензій і результати їх випробувань наведено в табл. 1.

Порівняння результатів експериментальних випробувань висококонцентрованих за ПЕО суспензій (приклади 1–8) і суспензій з тонко-дисперсних порошоків ПЕО (приклади 9–15) дають змогу зробити такі висновки:

а) гідродинамічна ефективність (на 20-й секунді від початку розчинення) у водних розчинах висококонцентрованих суспензій вище в 1,6–2,0 раза порівняно з тонкодисперсними (вміст ПЕО у яких дорівнює 35 % ваг.), внаслідок зниження в'язкості суспензії і у зв'язку із збільшенням швидкості її розчинення;

б) під час повного розчинення висококонцентрованої суспензії величина ефекту зниження гідродинамічного опору тертя в її водних розчинах більше в 1,3–1,4 раза порівняно з складами тонкодисперсних суспензій з вмістом ПЕО 30 % ваг. за рахунок зменшення деструкції ПЕО під час розчинення у воді.

Порівняльні випробування реологічних властивостей тонкодисперсної суспензії, яка містить 30 % ваг. порошку ПЕО з розміром полімерних часток до 200 мкм і суспензій з підвищеним до 50 % ваг. вмістом полімеру були проведені на безнасосній установці, вимірювальна ділянка якої була у вигляді труби діаметром 21,6 мм і довжиною 2075 мм. Перепад тиску на контрольній ділянці труби вимірювали манометром “Сапфір 22ДД”. Усі випробування були проведені за температури 20 °С.

Під час обробки результатів реологічних досліджень випробовуваних матеріалів розрахунки проводилися з використанням таких формул:

$$\tau = \frac{d\Delta p}{4l} \quad (\text{напряга тертя на стінці труби, Па});$$

$$\gamma = \frac{8u}{d} \quad (\text{швидкість зсуву, 1/с});$$

$$\eta = \frac{\tau}{\gamma} \quad (\text{динамічна в'язкість, Па}\cdot\text{с});$$

$$Re = \frac{udp}{\eta} \quad - \quad (\text{число Рейнольдса}).$$

**Склад, умови приготування й величина ефекту зниження гідродинамічного опору тертя (ГОТ) у водних розчинах висококонцентрованих (до 60 % ваг.) і тонкодисперсних (з вмістом 35% ваг.) суспензіях ПЕО**

№ з/п	Молекулярна маса ПЕО, млн	Складові компоненти та їх концентрація в суспензії, ваг. %			Величина тиску пресування кульок із суміші ПЕО і СаСО <sub>3</sub> , кг/см <sup>2</sup>	Діаметр кульок, мм	Величина ефекту зниження ГОТ у водних розчинах, %		Джерело інформації
		ПЕО	Карбонат кальцію (СаСО <sub>3</sub> )	Дисперсійне середовище (ДС). Складові компоненти (їх співвідношення у складі ДС), зокрема			на 20-й секунді розчинення	за повного розчинення	
1	5,5	35,0	1,8	Гліцерин – 63,2	80	1	27,2	54,3	
2	5,5	35,0	8,7	Етиленгліколь – 56,3	90	2	30,5	58,4	
3	5,5	35,0	22,0	Гліцерин+етиленгліколь (13:1) – 43,0	100	3	31,8	56,8	
4	5,5	45,0	2,4	Гліцерин+вода (7:1) – 52,6	90	2	32,8	58,7	
5	3,0	45,0	7,9	Гліцерин+етиленгліколь (7:1) – 47,1	90	1	26,2	55,9	
6	7,0	45,0	19,3	Гліцерин+вода (7:1) – 35,7	90	3	35,9	62,5	
7	5,5	60,0	3,2	Гліцерин+вода – 36,8	100	2	40,1	65,3	
8	5,5	60,0	6,7	Гліцерин+вода – 33,3	80	2	42,7	66,4	
9	5,5	35,0		Гліцерин – 65,0	–	–	15,5	39,9	[9]
10	5,5	35,0	–	Етиленгліколь – 65,0	–	–	17,8	46,2	–
11	5,5	35,0	–	Гліцерин+етиленгліколь (13:1) – 65,0	–	–	16,3	42,3	[10]
12	5,5	45,0	–	Гліцерин+вода (7:1) – 55,0	–	–	17,9	45,5	–
13	3,0	45,0	–	Етиленгліколь+гліцерин (1:7) – 55,0	–	–	14,1	41,2	–
14	7,0	45,0	–	Гліцерин+вода (7:1) – 55,0	–	–	21,3	47,9	–
15	5,5	60,0	–	Гліцерин+вода – 40,0	–	–	24,5	51,1	–

У цих формулах:  $\Delta p$  – перепад тиску на контрольній ділянці труби діаметром  $d$  і довжиною  $l$ ,  $u$  – середня швидкість руху полімерної суспензії по вимірювальній ділянці труби,  $\rho$  – густина полімерної суспензії.

Результати порівняльних випробувань реологічних властивостей відомої тонко дисперсної (30 %-ї за ПЕО) суспензії і висококонцентрованої суспензії з підвищеним вмістом (50 %-ваг. за ПЕО) наведено в табл. 2.

Таблиця 2

### Реологічні властивості суспензій ПЕО

Склад полімерної суспензії		Вміст ПЕО в суспензії, % ваг.	$\gamma$ , 1/с	$\tau$ , Па	Re	$\eta$ , Па·с
Дисперсна фаза	Дисперсійне середовище					
Тонкодисперсний порошок ПЕО з розміром полімерних часток до 200 мкм	Суміш гліцерину з водою густиною 1,22 г/см <sup>3</sup>	30,0	23,6	221,2	0,18	9,37
			37,4	242,0	0,41	6,47
			60,2	291,5	0,88	4,84
			60,9	317,5	0,83	5,21
Кульки діаметром 2 мм, отримані пресуванням суміші тонкодисперсних порошоків ПЕО і карбонату кальцію під тиском 90 кгс/см <sup>2</sup>	Суміш гліцерину з водою густиною 1,22 г/см <sup>3</sup>	50,0	17,4	135,6	0,16	7,84
			30,6	208,2	0,32	6,80
			48,1	275,9	0,60	5,73
			70,2	335,7	1,04	4,78
			101,1	374,7	1,94	3,71

З наведених у табл. 2 даних видно, що величина динамічної в'язкості суспензії з підвищеним вмістом полімеру менше в'язкості суспензії як дисперсної фази якої використовується тонкодисперсний полімерний порошок (30 % ваг. за ПЕО) з числами Рейнольдса рівних 0,16–0,88, а за подальшого збільшення числа Re величини в'язкості цих суспензій стають практично рівними.

**Висновки.** Порівняння результатів випробувань суспензії з підвищеним вмістом поліетиленоксиду (приклади 1–8) і суспензій, складі і способи приготування яких наведені в роботах [8–10] (приклади 9–15) (див. табл. 1). Експериментальні дані реологічних досліджень (див. табл. 2) дають змогу зробити такі висновки:

а) один із способів підвищення концентрації ПЕО в суспензії до 50 % ваг. і більше може бути реалізований за допомогою пресування суміші тонкодисперсного порошку цього полімеру з карбонатом кальцію (розмір часток до 50 мкм) з отриманням під тиском 80–100 кгс/см<sup>2</sup> кульок діаметром 1,0–3,0 мм і подальшим змішуванням цих кульок з дисперсійним середовищем – суміші гліцерину з водою, що має густину 1,22 г/см<sup>3</sup>;

б) значення ефекту зменшення гідродинамічного опору тертя (на 20-й секунді з початку розчинення) у водних розчинах висококонцентрованих суспензій вище в 1,6–2,0 раза порівняно з розчинами тонкодисперсних суспензій як наслідок зниження в'язкості суспензії і за рахунок цього збільшення швидкості її розчинення;

в) за повного розчинення висококонцентрованої суспензії значення ефекту зменшення гідродинамічного опору тертя в її водних розчинах більше в 1,3–1,4 раза порівняно з розчинами тонкодисперсних суспензій, за рахунок зменшення деструкції макромолекул ПЕО під час його розчинення у воді.

Розроблено доступні для реалізації в промислових масштабах склад, основи технології приготування і використання висококонцентрованої суспензії ПЕО в енергозбереженні й екології. Реологічними дослідженнями показано, що для приготування розчинів з висококонцентрованих суспензій ( $C_{\text{ПЕО}} = 50$  % ваг.) може застосовуватися теж саме обладнання, як і для традиційних тонкодисперсних суспензій з вмістом ПЕО 30,0 % ваг.

1. Singh R.P. Characteristics of so polymer – polymer, polymer – fibre combinations and grafted polymers as drag reducing agents and their industrial applications / R.P. Singh, P. Chang, G.V.Reddy, etc. // Drag Reduct. 3rd Int. Conf. Bristol, 1984. – P. D4/1 – D4/5. 2. Liberman M.W. Shear – induced

structure formation is solutions of drag reducing polymers / M.W. Liberanore, E.J. Pollauf, A.J.J. McHugh // *Non – Newton. Fluid Mech*, 2003. – Vol.113. – № 2 – 3. – P. 193–208. 3. Корнилов В.И. Проблемы снижения турбулентного трения активными и пассивными методами (обзор) / В.И. Корнилов // *Теплофизика и аэромеханика*. – 2005. – Т. 12, – № 2. С. 183–208. 4. Козлов Л.П. Гідродинамічний ефект Томса і його можливі технічні застосування / Л.П. Козлов // *Вісн. АН УРСР*. – 1987. – № 1. – С. 23–33. 5. Ступин А. Б. Гидродинамически - активные композиции в пожаротушении / Ступин А. Б., Симоненко А. П., Асланов П. В., Быковская Н.В. – Донецк : ДонГУ, 1999. – 240 с. 6. Ступин А. Б. Гидродинамически - активные композиции в энерго-сбережении и экологии / Ступин А. Б., Симоненко А. П., Асланов П. В. – Донецк : ДонГУ, 2001. – 173 с. 7. Проблемы экологии и техногенно - экологической безопасности: Монография / Под общ. ред. А.Б. Ступина – Донецк: ДонГУ, 2010. – 503 с. 8. Патент США № 3736288, кл. МКИ C08f51/34. Составы, уменьшающие гидродинамическое сопротивление. Оpubл. 29.05.73 г. 9. Гурари М.Л. Исследование кинетики растворения полиоксидэтилена в воде / М.Л. Гурари, Ю.Ф. Иванюта, И.И. Луциков, И.А. Неронова // *ИФЖ.-1977*. Т. 32, № 3. – С. 499–501. 10. United States Patent №3,843,589, Current International Class C08f 045/34, Wartman; Lloyd Henry STABLE PUMPABLE SLURRIES OF ETHYLENE OXIDE POLYMERS October 22, 1974.

УДК 691.328.4

Солодкий С.Й., Турба Ю.В.

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра автомобільних шляхів

## ТРИЩИНОСТІЙКІСТЬ БЕТОНІВ З МАЛИМ ВМІСТОМ ФІБРИ

© Солодкий С.Й., Турба Ю.В., 2012

Наведено результати дослідження тріщиностійкості бетонів, армованих фіброю на мінімально допустимому рівні. Встановлена можливість використання певних видів фібри в бетонах для дорожнього будівництва.

**Ключові слова:** дисперсно армований бетон, фібробетон, фібра, тріщиностійкість, механіка руйнувань, повністю рівноважні діаграми деформування бетону.

**This article provides the results of fracture toughness of concrete, fiber reinforced at the minimum acceptable level. The opportunity to use certain types of fibers in concrete for road construction.**

**Key words:** dispersed reinforced concrete, fiber-reinforced concrete, fiber, crack, mechanics of destruction, in whole equilibrium diagrams of deformation of concrete.

**Вступ.** Світова тенденція використання бетону та його різновидів як основного матеріалу за швидких та масштабних темпів сучасного будівництва постійно поглиблюється, що пов'язано з вирішенням економічних, екологічних і технічних проблем. Особливої актуальності набуває використання бетонів з покращеними властивостями.

Одним із перспективних конструкційних матеріалів, що дає змогу компенсувати такі недоліки бетону, як низька міцність під час розтягування та висока крихкість, є дисперсно армовані бетони – фібробетони. Наявність армуючих волокон у бетоні за умови їх оптимального вмісту підвищує щільність, однорідність та зменшує ризики тріщиноутворення, що дає змогу прогнозувати вищу витривалість і довговічність цементного бетону, підвищує його морозостійкість на 12 %, водонепроникність на 50–100 %, ударостійкість на 30 %, стирання зменшується на 40–44 % [1]. Крім оптимальної кількості