

Під час експлуатації автомобільної дороги водовідвідні споруди слід утримувати в робочому стані і не допускати переозволення земляного полотна й дорожнього одягу.

1. Ковалев Н.А. Горелые породы шахтных терриконов эффективный дорожно–строительный материал. – Ростов на Дону, 1976. 2. Книгина Г.И. Строительные материалы из горных пород. – М.: Изд-во литературы по строительству, 1966. 3. Фоменко Т.Г., Кондратьев А.Ф. Отходы флотации и их свойства. – М.: Недра, 1977. 4. Якунин В.П., Агроскин А.А. Использование отходов обогащения углей. – М.: Недра, 1978. 5. Абалмасов Ю.Д. и др. Земполотно из горелых пород // Автомобильные дороги. – 1987. – №7. 6. Боднар Ю.В. и др. Комплексное использование горелых пород // Строительные материалы и конструкции. – 1989. – № 2. 7. Евгеньев И.Е. и др. Насыпи из отходов углеобогащения // Автомобильные дороги. – 1987. – № 6. 8. Комаров В.В., Малиновский Ю.И. Использование отходов угольной промышленности // Автомобильные дороги. – 1987. – № 7. 9. Купраш Р.П. и др. Использование горелых пород для устройства земполотна // Автомобильные дороги. – 1979. – № 8. 10. Сасько Н.Ф. Особенности технологии строительства земполотна из углеотходов // Автошляховик України. – 1992. – № 1. 11. Жданюк В.К., Гнатів М.Я., Говоруха О.В., Бойко Є.М. Застосування відходів шахтного виробництва при благоустрої територій та будівництві автомобільних доріг. Применение пластмасс в строительстве и городском хозяйстве: мат. VIII Междунар. научн.-техн. интернет-конф. – Харьков: ХНАГХ, 2008. – 153 с.

УДК 69.07

А.Я. Мурин, Р.І. Канафоцький, Т.В. Приставський  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра мостів та будівельної механіки

## МОМЕНТ ТРІЩИНОУТВОРЕННЯ НОРМАЛЬНИХ ПЕРЕРІЗІВ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК, ПІДСИЛЕНИХ ЗОВНІШНЬОЮ КОМПОЗИТНОЮ АРМАТУРОЮ

© Мурин А.Я., Канафоцький Р.І., Приставський Т.В., 2011

Подано результати теоретично-експериментальних досліджень моменту тріщиноутворення нормальних перерізів залізобетонних балок, підсиленних зовнішньою композитною арматурою. Наведено графік та таблиці тріщиноутворення нормальних перерізів експериментальних балок.

Ключові слова: залізобетонна балка, підсилення, зовнішня композитна арматура, момент тріщиноутворення.

The results of theoretical and experimental investigations of reinforced-concrete beams, strengthened an external composite reinforcement are given. Parameters of crack-resistance of normal cuts of investigations beams are resulted.

Key words: reinforced-concrete beam, strengthening, external composite reinforcement, cracking moment.

**Постановка проблеми.** Для збільшення міцності, жорсткості та тріщиностійкості конструктивних балкових елементів сьогодні широко використовується практика підсилення залізобетонних конструкцій фіброармованими пластиками, які наклеюються в зонах максимального розтягу на поверхні конструкцій як додаткове зовнішнє армування [1–4].

Складність вивчення роботи підсиленних конструкцій полягає у тому, що у водній конструкції поєднуються три різні матеріали: бетон, внутрішня сталева та зовнішня композитна арматури. При цьому складові відрізняються як фізико-механічними показниками, так і їх взаємодією, що необхідно враховувати під час проектування підсилення.

Для згинаних елементів, підсилених наклеєними високоміцними композитними стрічками, закономірності і специфічні особливості роботи під навантаженням є суперечливі, а загалом проблема поведінки нормальних перерізів, в яких в розтягнутій зоні сумісно працює звичайна арматура з фізичною межею текучості і високоміцна стрічка практично без пластичного деформування досліджена недостатньо. Створення для таких перерізів розрахункових моделей під час розрахунку їх тріщиностійкості становить певні труднощі і невизначеності.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На даний час проводяться експериментальні дослідження залізобетонних балок, підсилених зовнішньою композитною арматурою, у багатьох країнах світу: США, Японії, Німеччині, Швейцарії, Польщі, Україні, Росії тощо [1...4].

Аналіз наявних публікацій показує, що здебільшого аналізуються параметри міцності та прогин, значно менше даних є по деформаціях та тріщиностійкості підсилених згинаних залізобетонних конструкцій внаслідок складного напружено-деформованого стану таких конструкцій.

Однією з останніх спроб описати тріщиностійкість залізобетонних балок, підсилених фіброармованими пластиками, є робота В. Глодковської та М. Сташевського [7], проведена на кафедрі бетонних конструкцій Кошалінської політехніки. Авторами проведені експериментальні дослідження двох серій залізобетонних балок, підсилених зовнішньою стрічкою на основі вуглецевих волокон, запропоновано розрахункову схему та емпіричні залежності для визначення параметрів тріщиностійкості.

**Мета та завдання дослідження.** Теоретично-експериментальне дослідження моменту тріщиноутворення нормальних перерізів залізобетонних балок за різних відсотків підсилення зовнішньою композитною арматурою та забезпечення надійного анкерування стрічки підсилення; порівняння отриманих теоретичних та експериментальних значень.

**Теоретичні обґрунтування.** За основу для даної роботи прийняті розрахункові залежності згідно чинних норм проектування залізобетонних конструкцій [5].

Розрахунок утворення тріщин, нормальних до подовжньої осі елемента, проводиться, згідно з такими положеннями:

- поперечні перерізи після деформації залишаються плоскими;
- найбільше відносне видовження крайнього розтягнутого волокна бетону дорівнює  $2R_{bt,ser}/E_b$ ;
- напруження в бетоні розтягнутої зони розподілені рівномірно і однакові по величині  $R_{bt,ser}$ .

Момент тріщиноутворення нормальних перерізів для балкових конструкцій без попереднього напруження визначається за формулою:

$$M_{crc} = R_{bt,ser} W_{pl} \quad (1)$$

Де  $R_{bt,ser}$  – міцність бетону на розтяг;  $W_{pl}$  – момент опору приведенного підсиленого перерізу для крайнього розтягнутого волокна (з урахуванням непружних деформацій розтягнутого бетону).

Момент опору приведенного перерізу для крайнього розтягнутого волокна (з врахуванням непружних деформацій розтягнутого бетону)  $W_{pl}$  визначається за формулою

$$W_{pl} = \frac{2(I_{b_0} + a_s I_{s_0} + a_f I_{f_0})}{h - x} + S_{b_0} \quad (2)$$

Де  $I_{b_0}$  – момент інерції площі перерізу бетону стосовно нульової лінії;  $a_s = \frac{E_s}{E_b}$  – коефіцієнт приведення внутрішньої сталеві арматури до бетону;  $I_{s_0}$  – момент інерції площі перерізу внутрішньої сталеві арматури стосовно нульової лінії;  $a_f = \frac{E_f}{E_b}$  – коефіцієнт приведення

зовнішньої композитної арматури до бетону;  $I_{f0}$  – момент інерції площі перерізу зовнішньої композитної арматури стосовно нульової лінії;  $S_{b0}$  – статичний момент інерції площі перерізу бетону стосовно нульової лінії.

Положення нульової лінії визначається з умови

$$S'_{b0} - a_s S_{s0} - a_f S_{f0} = \frac{(h-x)A_{br}}{2}. \quad (3)$$

**Експериментальні дослідження.** Для дослідження тріщиностійкості залізобетонних конструкцій, підсилених зовнішньою композитною арматурою, були виготовлені залізобетонні балки двох серій завдовжки 2100 мм, завширшки 120 мм і заввишки 220 мм. Міцність бетону зразків серії 1 становила 28,3 МПа, серії 2 – 34 МПа. Змінним параметром у межах кожної серії був відсоток армування зовнішньою композитною арматурою.

Прийняті такі умовні позначення: перша цифра вказує серію балок (1,2); Б – балка; П – підсилена; друга цифра – порядковий номер балки цієї серії (1...8); третя цифра вказує на ширину стрічки підсилення (у частці до базової стрічки завширшки 50 мм: 1 – 50 мм (1), 2 – 25 мм (1/2), 3 – 16,7 мм (1/3), 4 – 12,5 мм (1/4)). Характеристики експериментальних зразків подано у табл. 1.

Таблиця 1

Характеристики експериментальних зразків

№ з/п	Марка	Спосіб підсилення	Зовнішнє армування, мм (см <sup>2</sup> )
1	1Б-1	Непідсилена	–
2	1БП-2-1	Підсилена після виготовлення	50×1,2 мм ( $A_s=0,6$ см <sup>2</sup> )
3	1БП-3-1	Підсилена після розвантаження	50×1,2 мм ( $A_s=0,6$ см <sup>2</sup> )
4	1БП-4-1	Підсилена під навантаженням	50×1,2 мм ( $A_s=0,6$ см <sup>2</sup> )
5	1БП-5-2	Підсилена після виготовлення	25×1,2 мм ( $A_s=0,3$ см <sup>2</sup> )
6	1БП-6-2	Підсилена після виготовлення	25×1,2 мм ( $A_s=0,3$ см <sup>2</sup> )
7	1БП-7-3	Підсилена після виготовлення	16,7×1,2 мм ( $A_s=0,2$ см <sup>2</sup> )
8	1БП-8-4	Підсилена після виготовлення	12,5×1,2 мм ( $A_s=0,15$ см <sup>2</sup> )
9	2Б-1	Непідсилена	–
10	2БП-2-2	Підсилена після виготовлення	25×1,2 мм ( $A_s=0,3$ см <sup>2</sup> )
11	2БП-3-3	Підсилена після виготовлення	16,7×1,2 мм ( $A_s=0,2$ см <sup>2</sup> )
12	2БП-4-4	Підсилена після виготовлення	12,5×1,2 мм ( $A_s=0,15$ см <sup>2</sup> )

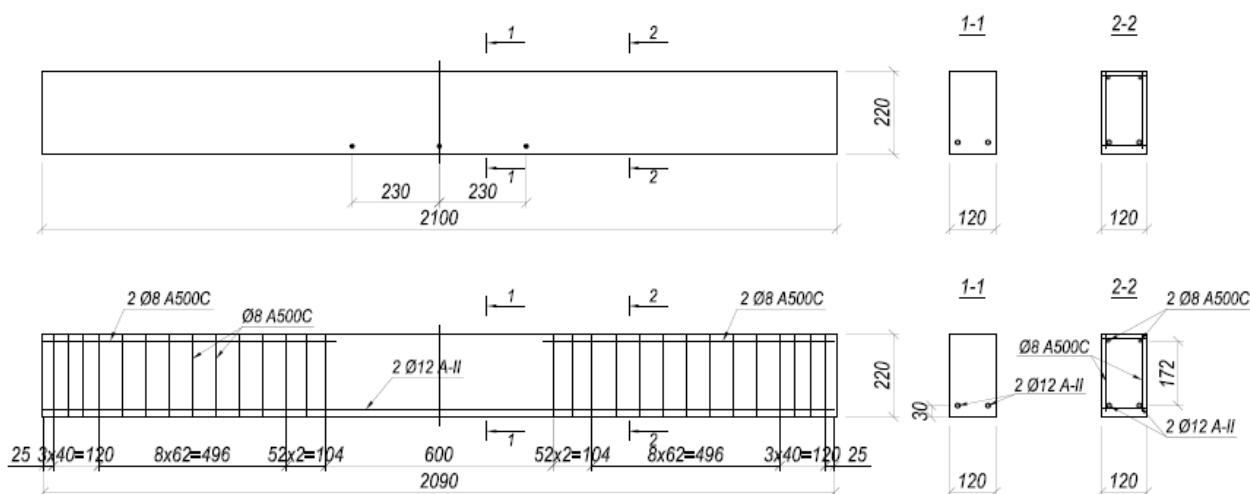


Рис. 1. Конструкція та армування дослідних зразків до підсилення

В усіх балках поздовжньою робочою внутрішньою арматурою була стрижнева арматура класу А-II з межею текучості 370 МПа ( $2\text{Ø}12$  з  $A_s = 2,26 \text{ см}^2$ ), а конструктивна і поперечна – класу А500С, крок стрижнів поперечної арматури становив 40...62 мм. З'єднання арматури у просторовому каркасі виконано ручним електродуговим зварюванням. Прийнятий бетон класу В20 ( $R_b = 28,3 \text{ МПа}$ ) для зразків 1 серії та В25 ( $R_b = 34 \text{ МПа}$ ) для зразків 2 серії. Загальний вигляд балок та конструкція арматурного каркаса показані на рис. 1. З кожної серії по одному зразку (1Б-1 та 2Б-1) були виготовлені та випробувані без підсилення (як контрольні). В інших зразках змінним параметром був процент армування зовнішньою композитною арматурою – стрічкою S512 різної ширини. Підсилення залізобетонних балок проводили наклеюванням на розтягнуту грань балки (нижню у робочому положенні).

Наклеювання стрічки проводили з використанням двокомпонентного клею CFK SikaDur 30. Для забезпечення анкерування на приопорних ділянках використано тканину SikaWrap завширшки 30 см, що була наклеєна двома шарами – нижній шар охоплював усю висоту балки, а верхній заходив на бічні грані на 7 см. Це було зроблено для запобігання відриванню стрічки з шаром бетону на рівні внутрішньої розтягнутої сталеві арматури (рис. 2).

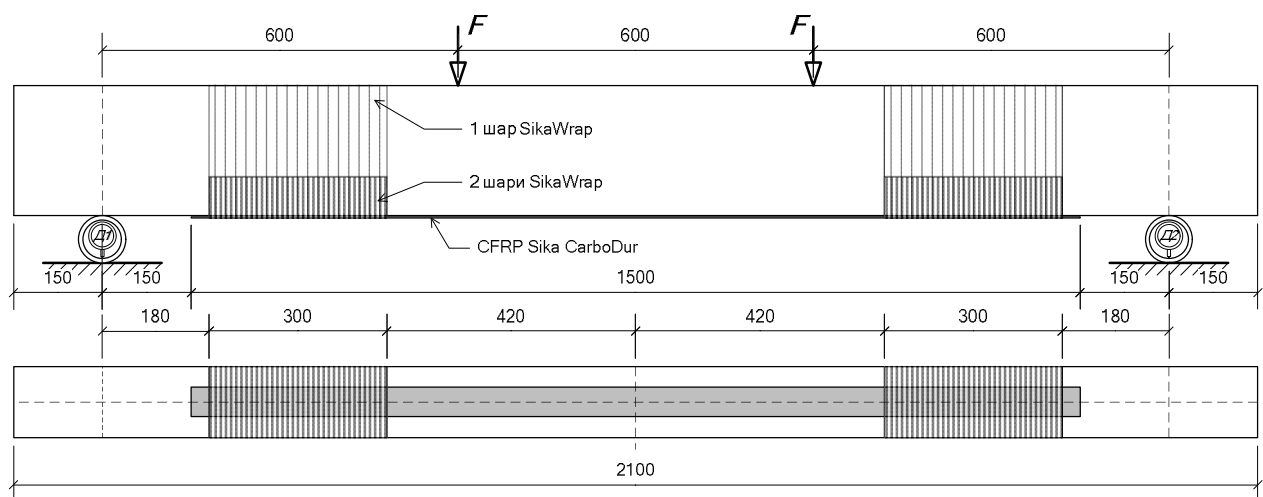


Рис. 2. Конструкція підсилення дослідних зразків

Внаслідок недостатності анкерування у зразках №2...6 руйнування відбувалося після проковзування кінців стрічки у системі анкерування Sika Wrap. Тому у зразках з індексами 3, 4 (зразки №№ 7, 8, 11, 12) було використано систему додаткового анкерування з частин стрічки CFRP CarboDur. Випробування зразків із застосуванням цієї системи показали високу ефективність такого способу анкерування.

Під час випробувань на кожному етапі завантаження фіксували появу нових тріщин візуально, характер тріщиноутворення, а також за допомогою мікроскопа МБП-3 вимірювали ширину розкриття тріщин.

**Результати експериментальних досліджень та їх аналіз.** Експериментальні параметри тріщиноутворення визначали візуально з врахуванням характерного переламу графіка навантаження-деформації внутрішньої сталеві арматури (рис. 3).

Динаміка тріщиноутворення і розвитку нормальних тріщин у непідсиленіх і підсиленіх балках принципово не відрізнялась і мала багато спільних ознак. Перші кілька тріщин утворились в зоні чистого згину з край нерівномірними відстанями між ними, які в кілька разів перевищували середню відстань на стадії завершення процесу тріщиноутворення. За збільшення навантаження між першими тріщинами утворювались нові в такий спосіб, що відстань між суміжними тріщинами ставала приблизно однаковою. У випробуваніх непідсиленіх і підсиленіх балках нормальні тріщини інтенсивно розвивались до руйнуючих навантажень.

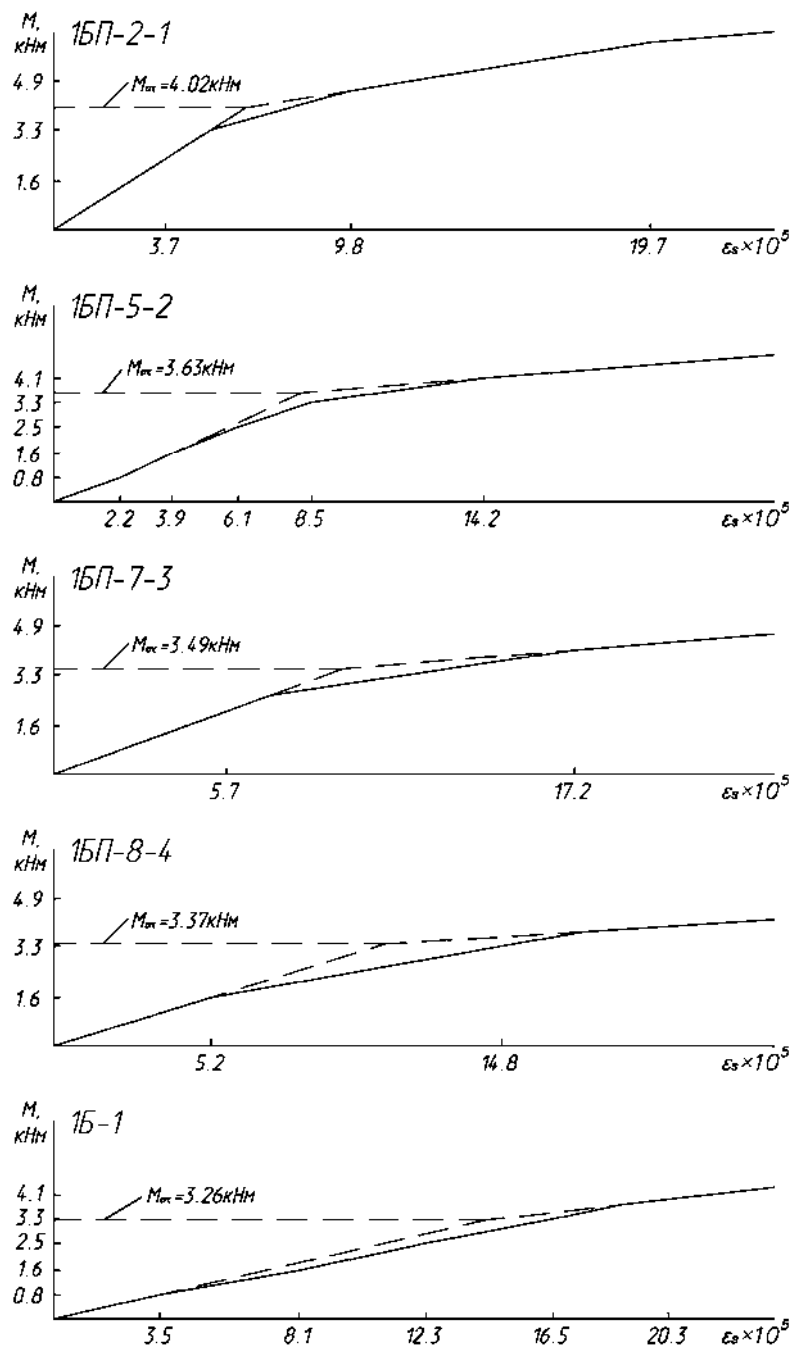


Рис. 3. Моменти тріщиноутворення експериментальних балок, визначені графічним методом

Похилі тріщини від дії поперечної сили на приопорних ділянках не утворювалися внаслідок переармування похилих перерізів для ефективного дослідження нормальних перерізів.

Момент тріщиноутворення експериментальних балок наведений в табл. 2. Для підсилених балок  $M_{кр}^{exp}$  перебував у межах  $0,14...0,24 M_{ULS}^{exp}$ . Як показують результати експериментальних досліджень, момент тріщиноутворення підсилених експериментальних зразків залежить від відсотка армування зовнішньою композитною арматурою: зі збільшенням кількості підсилюючої композитної стрічки підвищується тріщиностійкість. У табл. 2 також наведено розрахункові величини, різниця між експериментальними та теоретичними величинами моменту тріщиноутворення становить  $-9...+15\%$ .

У літературі описано мало даних щодо експериментальних значень ширини розкриття тріщин. Отримані в дослідях [7] значення добре узгоджуються із запропонованим розрахунковим апаратом (табл. 3).

## Момент тріщиноутворення експериментальних балок

Серія	Індекс балок	Розміри перерізу			Відсоток армування зовнішньою композитною арматурою, $\mu_f$ , %	Момент тріщиноутворення, кН·м		$\delta = \frac{M_{cr}^{exp} - M_{cr}^{th}}{M_{cr}^{exp}} \cdot 100\%$
		бетону $b \cdot h$ , см	внутрішньої сталеві арматури, мм	зовнішньої композитної арматури $b' \cdot t$ , мм		експериментальний $M_{cr}^{exp}$	запропонований розрахунковий апарат $M_{cr}^{th}$	
1	1	12×22	2 Ø 12	50×1,2	0,24	3,82	3,69	-3,5
	2	12×22	2 Ø 12	25×1,2	0,12	3,63	3,65	0,6
	3	12×22	2 Ø 12	16,7×1,2	0,08	3,49	3,64	4,2
	4	12×22	2 Ø 12	12,5×1,2	0,06	3,37	3,63	7,8
	0	12×22	2 Ø 12	-	-	3,26	3,61	10,8
2	2	12×22	2 Ø 12	25×1,2	0,12	3,97	3,95	-0,4
	3	12×22	2 Ø 12	16,7×1,2	0,08	4,31	3,94	-8,5
	4	12×22	2 Ø 12	12,5×1,2	0,06	4,28	3,94	-8,0
	0	12×22	2 Ø 12	-	-	4,15	3,92	-5,6

Таблиця 3

## Співставлення теоретичних та експериментальних значень (за даними інших авторів) моменту тріщиноутворення балок, підсилених зовнішньою композитною арматурою

Автор, джерело	Шифр балок	Відсоток армування зовнішньою композитною арматурою, $\mu_f$ , %	Момент тріщиноутворення $M_{cr}^{exp}$ , кНм		
			експеримент $M_{cr}^{exp}$	запропонований розрахунковий апарат $M_{cr}^{teor}$	відносна похибка обчислень, $d = \frac{M_{cr}^{teor} - M_{cr}^{exp}}{M_{cr}^{exp}} \cdot 100\%$
Głodkowska W., Staszewski M. [7]	W-1	0,23	5,85	5,5	-6,0
	W-2	0,36	6,53	6,3	-3,5

Порівняння моментів тріщиноутворення балок двох серій показує, що за підсилення залізобетонних балок зовнішньою композитною арматурою (індекси 2, 3, 4) тріщиностійкість конструкції зростає на 14 %, за шириною стрічки 50 мм (індекс 1) – на 72 %. Така значна різниця пояснюється тим, що стримульований ефект стрічки проявляється максимально поблизу композита, зі збільшенням віддалі він нівелюється. Тому для збільшення тріщиностійкості підсилених балок рекомендується застосовувати ширші (за сталої площі поперечного перерізу – тонкі) стрічки.

**Висновки:**

1. Тріщиностійкість нормальних перерізів залізобетонних балок, підсилених зовнішньою композитною арматурою, залежить від таких чинників, як надійність анкерування, якість виконання робіт з підсилення тощо.

2. За умови забезпечення надійного анкерування ширина розкриття нормальних тріщин залежить як від відсотка армування зовнішньою композитною арматурою, так і від ширини стрічки підсилення. Момент тріщиноутворення підсилених експериментальних зразків збільшився на 14...72 %.

3. Запропоновані розрахункові залежності для визначення моменту тріщиноутворення задовільно узгоджуються з експериментальними даними як автора, так і інших науковців.

1. Кваша В. Застосування композитів CFRP для підсилення залізобетонних мостів в Україні / В. Кваша, І. Мельник, Ю. Собко, А. Мурин, Р. Добрянський // 9th International Scientific Conference: Current issues of civil and environmental engineering. Rzeszow, 3–4 September, 2004. – С. 221–227. 2. Rybak M. Wzmacnianie mostów betonowych za pomocą przyklejanego zbrojenia zewnętrznego / M. Rybak, M. Łagoda // XVIII Konferencja Naukowo-Techniczna: Awarie Budowlane. Szczecin-Międzyzdroje. – 1997. – P.41–50. 3. Meier U. Strengthening of Structures with CFRP Laminates / U. Meier, K. Kaiser // Advanced Composite Materials in Civil Engineering Structures : Proceedings of the Specialty Conference (ASCE). Las Vegas, Nevada. – 1991. – P. 224–232. 4. Kaminska M. Badania zelbetowych belek z tasmami CFRP przyklejnymi na ich powierzchniach / M. Kaminska, R. Kotynia // XVI konferencja naukowo-techniczna: Beton i prefabrykacja. – Т. 2. – Jadwisin. 1998. – S. 479–484. 5. СНУП 2.03.01-84\*. Бетонные и железобетонные конструкции. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 80 с. 6. Мурин А. Я. Міцність нормальних перерізів залізобетонних балок, підсилених зовнішньою композитною арматурою / А.Я. Мурин // Вісник національного університету "Львівська політехніка" "Теорія і практика будівництва". – 2008. – № 627. – С. 155–158. 7. Głodkowska W. Zarysowanie belek zelbetowych wzmocnionych tasmami z włókien węglowych / W. Głodkowska, M. Staszewski // "Problemy naukowo-badawcze budownictwa". – Tom VI: Badawczo-projektowe zagadnienia w budownictwie. – Białystok: Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, 2008. – S. 171–178.

УДК 532.522.2:532.542.4:532.556.2

В.І. Орел

Національний університет "Львівська політехніка",  
кафедра гідравліки та сантехніки

## КОЕФІЦІЄНТ ЗМІНИ ГІДРАВЛІЧНОГО ОПОРУ ЗА РАПТОВОГО РОЗШИРЕННЯ ТРУБ

© Орел В.І., 2011

**Показано, що ступінчастий перехід в трубопроводі з раптовим розширенням потоку порівняно з різким зменшує гідравлічний опір. Одержано залежність коефіцієнта  $\beta$  у формулі (2) як функцію відносної довжини ділянки між двома раптовими розширеннями потоку.**

**Ключові слова:** раптове розширенням потоку, ступінчастий перехід.

**It is shown that a step transition in a pipeline with sudden expansion of flow, comparatively with abrupt, diminishes hydraulic resistance. The dependence of coefficient ( $\beta$ ) in the formula (2) as function of length of area between two sudden expansions of a flow, which are one from another approximately on limits of length of an initial area of a jet is offered.**

**Key words:** sudden expansion of a flow, step transition.

**Вступ.** У гідравлічній мережі відстані між окремими фасонними частинами, перешкодами, запірними або регулювальними пристроями тощо часто бувають малими (а інколи і зовсім відсутні), і наявні прямолінійні ділянки є недостатніми для стабілізації потоку. У цих випадках спостерігається взаємний вплив місцевих гідравлічних опорів.