7. *Государственный* водный кадастр. Ежегодные данные о качестве поверхностных вод суши. Ч. 1:Реки и каналы. Выпуск 3. Бассейн Северского Донца, рек Крыма и Приазовья /Гос. ком. Украины по гидрометеорологии. Центр. геофиз. обсерватория (1985-2012 гг.). – К.:УОП Укргидромета, 1986-2013.

8. *ТМС-84 Донецьк* /Гос. ком. Украины по гидрометеорологии. Центр. геофиз. обсерватория (1991-2010гг). – К.: УОП Укр ГМЦ,1992-2011.

Надійшло до редакції 04.03.2015

УДК 532.542

Ю.М. КОНСТАНТІНОВ, кандидат технічних наук
О.О. ГІЖА, кандидат технічних наук
Київський національний університет будівництва і архітектури

РОЗРАХУНКИ НАПІРНИХ ТРУБОПРОВОДІВ ЗА ШВИДКІСНИМИ ТА ВИТРАТНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Показано, що при розрахунках пропускної здатності напірних трубопроводів не можна автоматично застосовувати відому формулу швидкісної характеристики для відкритих русел. Наводяться рекомендації для розрахунку трубопроводів у квадратичній та перехідній областях опору, а також пропозиції по врахуванню місцевих опорів.

Ключові слова: Швидкісні та витратні характеристики напірних трубопроводів у перехідній та квадратичній областях опору.

Показано, что при расчете пропускной способности напорных трубопроводов нельзя автоматически применять известную формулу скоростной характеристики для открытых русел. Приводятся рекомендации для расчета трубопроводов в квадратичной и переходной областях сопротивления, а также предложения по учету местных сопротивлений.

Ключевые слова: Скоростные и расходные характеристики напорных трубопроводов в квадратичной и переходной областях сопротивления.

It is shown that in calculating the capacity of pipelines can't automatically apply the formula of velocity characteristics for open channels. Provides recommendations for the calculation of pipelines in quadratic and transitional areas of resistance, as well as considering the local resistance.

Keywords: velocity and consumables characteristics of pressure pipelines in transitional and quadratic areas of resistance.

© Ю.М. Константінов,
О.О. Гіжа, 2015

Загальні положення. В літературі з гідравліки та гідротехніки $[1,4]$ разом з розрахунками трубопроводів за питомими опорами S_0 наводяться також рекомендації для визначенні швидкості V і пропускної здатності труб Q за формулами:

$$V = W_{\text{тр}}\sqrt{i_p}\,, \tag{1}$$

$$Q = K_{\text{тр}}\sqrt{i_p}\,, \tag{2}$$

де i_p – п'єзометричний похил труби; $W_{\text{тр}}$ і $K_{\text{тр}}$ – відповідно швидкісна та витратна характеристики труби при гідравлічному радіусі $R_{\text{тр}} = D/4$, що визначаються за формулами:

$$W_{\text{тр}} = \frac{1}{n}R^z = \frac{1}{n}\left(\frac{D}{4}\right)^z, \tag{3}$$

$$K_{\text{тр}} = W_{\text{тр}}\omega = \frac{1}{n}\frac{\pi D^{2+z}}{4^{1+z}}. \tag{4}$$

Особливістю цих формул, і в той же час недоліком, є їх розмірний характер і не досить конкретні рекомендації відносно коефіцієнта шорсткості n і показника степені z. У гідравлічній літературі рекомендується приймати n в залежності від стану поверхні труби (з дещо нечіткими характеристиками, такими як «добрі», «нормальні», «трохи забруднені», «середні умови», «забруднені», тощо. Рекомендується також приймати для нових труб $n = 0{,}011$, а $z = 0{,}67$ (за Манінгом), або $z = 0{,}7$ (за Форхгеймером), або $z = 0{,}37 + 2{,}5\sqrt{n} - 0{,}75\sqrt{R}\left(\sqrt{n} - 0{,}1\right)$ (за М.М.Павловським).

Більшість з цих робіт було проведено для відкритих лотків і каналів, ширина потоку по верху у яких залишається сталою, або збільшується із зростанням глибини. В той же час у круглих трубах при певних глибинах ширина потоку по верху, а також гідравлічний радіус R можуть зменшуватися в залежності від зростання глибини. Ці обставини не можуть не впливати на визначення швидкісних і витратних характеристик.

Такі рекомендації не відповідають сучасним поглядам, за якими опори по довжині в трубах залежать від базових факторів, зокрема від гідравлічного коефіцієнта тертя $\lambda_{\text{кв}}$ у квадратичній області опору та відношення $\text{Re}/\text{Re}_{\text{кв}}$ (де $\text{Re}_{\text{кв}}$ відповідає початку цієї області) $[2,3]$.

Швидкісні і витратні характеристики труб у квадратичній області опору. Відмітимо, що особливості внутрішньої поверхні труб істотно впливають на гідравлічні опори, але в деяких довідниках для нових металевих (сталевих і чавунних) труб $[1,4]$, гладких металевих поверхонь, поверхонь зі штукатуркою цементним розчином наводяться однакові рекомендації для коефіцієнта шорсткості $n = 0{,}011$ і відповідно для показника степені z. Але аналіз чисельних експериментальних даних Ф.О.

Шевелєва $[5,6]$, проведений авторами у Київському національному університеті будівництва і архітектури $[2,3]$ показав, що гідравлічні коефіцієнти тертя у квадратичній області опорів $\lambda_{кв}$ для чавунних труб завжди більше, ніж для сталевих приблизно на 20…25%, і на 35…45% більше, ніж для труб азбестоцементних (тобто з гладким цементним покриттям) (рис.1). Ці значення $\lambda_{кв}$ характеризуються експериментальною формулою $[3]$

$$\lambda_{кв} = kD_{мм}^{-\tau}, \tag{5}$$

де коефіцієнти k і τ залежать від типу труб.

Гідравлічні коефіцієнти тертя λ і швидкісні характеристики труби $W_{тр}$ пов'язані умовою

$$W_{тр} = \frac{V}{\sqrt{i_p}} = \frac{V}{\sqrt{\frac{h_l}{l}}} = \frac{V}{\sqrt{\lambda \frac{lV^2}{2gD \cdot l}}} = \frac{\sqrt{2gD}}{\sqrt{\lambda}}, \tag{6}$$

або з врахуванням (3)

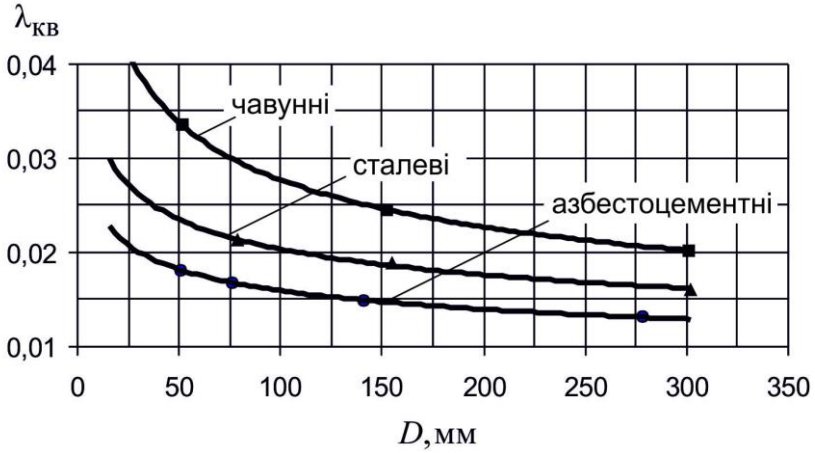


Рис.1. Експериментальні залежності гідравлічного коефіцієнта тертя від діаметра і матеріалу труби

$$\frac{1}{n}\frac{D^z}{4^z} = \frac{\sqrt{2gD}}{\sqrt{\lambda}}. \tag{7}$$

Для квадратичної області опору

$$W_{тр_{кв}} = \frac{1}{n}\frac{D^z}{4^z} = \frac{\sqrt{2gD}}{\sqrt{\lambda_{кв}}}, \tag{8}$$

або з врахуванням (5)

$$W_{тр_{кв}} = \frac{1}{n}\frac{D^z}{4^z} = \sqrt{\frac{2g \cdot 1000^{\tau} D^{1+\tau}}{\mathrm{k}}}. \tag{9}$$

Враховуючи, що n і k не залежать від діаметра труби, з (9)

$$z = 0{,}5(1+\tau). \tag{10}$$

З рівняння (9) при $D^z = \sqrt{D^{1+\tau}}$ отримаємо

$$n = \frac{1}{4^z}\sqrt{\frac{\mathrm{k}}{2g\cdot 1000^{\tau}}}. \tag{11}$$

Значення k, τ, що були визначені раніше [3], а також z (10) і n (11) наведені в таблиці 1 в залежності від типу труб.

Для практичних розрахунків зручно формулу (3) представити у вигляді

$$W_{\text{тр}_{\text{кв}}} = W'_{\text{кв}} D^z, \tag{12}$$

де

$$W'_{\text{кв}} = \frac{1}{4^z n}. \tag{13}$$

Значення W' також залежать від типу труб і наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Тип труб	k	τ	z	n	$W'_{\text{кв}}$	$K'_{\text{кв}}$
Сталеві електрозварні	0,053	0,2076	0,6038	0,011	39,42	31,07
Чавунні	0,1036	0,2864	0,6432	0,0111	36,93	29,01
Азбестоцементні	0,0384	0,191	0,5955	0,010	43,8	34,405

На рис. 2 показано залежності для швидкісної характеристики $W_{\text{тр}_{\text{кв}}}$ різних типів труб у квадратичній області опору.

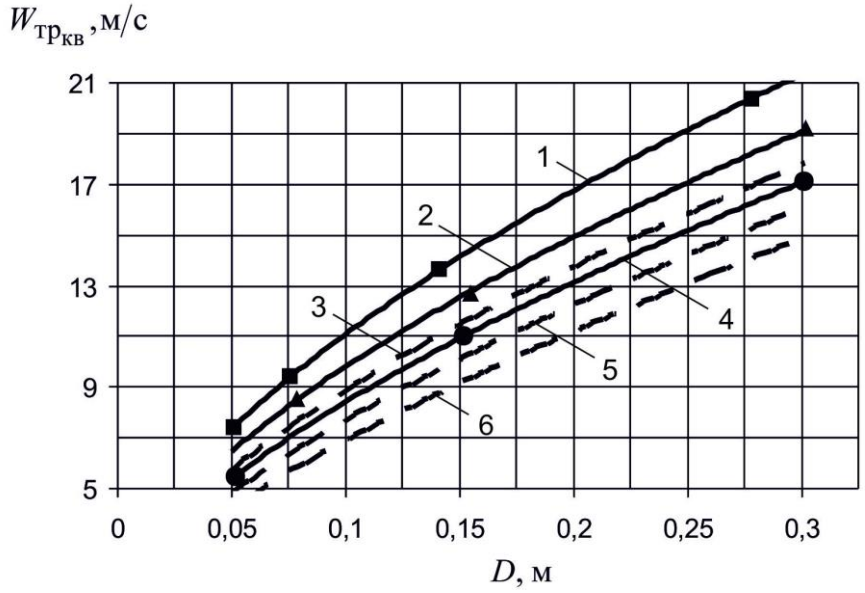


Рис. 2. Експериментальні залежності $W_{\text{тр}_{\text{кв}}} = f(D)$ для труб: азбестоцементних (1), сталевих (2), чавунних (4) і за формулами Павловського (3), Манінга (5), Форхгеймера (6)

З графіка бачимо, що експериментальні точки добре відповідають запропонованим теоретичним дослідженням. Для порівняння також наведені залежності $W_{\text{тр}_{\text{кв}}}$ при $n = 0{,}011$ за формулами Павловського, Манінга та Форхгеймера. Рекомендації Павловського призводять до дещо занижених значень (до 5%) швидкісних характеристик для чавунних труб і до суттєво занижених для сталевих і особливо для азбестоцементних труб (до 17%). Ще менші величини $W_{\text{тр}_{\text{кв}}}$ у порівнянні із експериментальними отримано за формулами Манінга та Форхгеймера. Це підкреслює те, що для напірних труб некоректно використовувати рекомендації для показника z, які були отримані для відкритих каналів.

З врахуванням викладеного формула (4) для витратної характеристики може бути представлена у вигляді:

$$K_{\text{тр}_{\text{кв}}} = \frac{1}{n} \cdot \frac{\pi D^{2+z}}{4^{1+z}} = K'_{\text{кв}} D^{2+z}, \tag{14}$$

де

$$K'_{\text{кв}} = \frac{\pi}{4^{1+z} \cdot n}. \tag{15}$$

У таблиці 1 також наведені значення $K'_{\text{кв}}$ для різних типів труб, а на рис. 3 показані залежності для $K_{\text{тр}_{\text{кв}}}$ у квадратичній області опору.

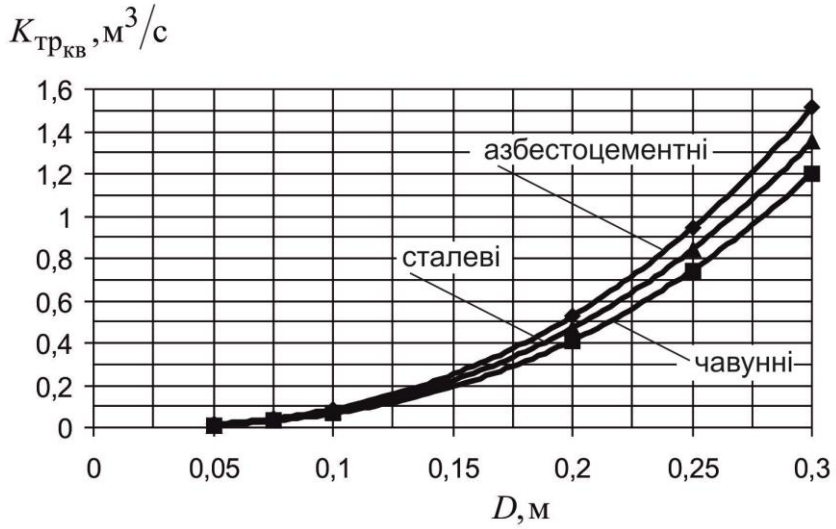


Рис. 3. Залежності $K_{\text{тр}_{\text{кв}}} = f(D)$ для труб з різних матеріалів

Все викладене вище стосується труб, що працюють у квадратичній області опору при $\text{Re} \geq \text{Re}_{\text{кв}}$. Число Рейнольдса $\text{Re}_{\text{кв}}$ визначається як

$$\text{Re}_{\text{кв}} = N D_{\text{мм}}^{\eta}, \tag{16}$$

де коефіцієнти: для сталевих електрозварних труб $N = 7315$, $\eta = 0{,}75$; для чавунних $N = 4782$, $\eta = 0{,}869$;для азбестоцементних $N = 11017$, $\eta = 0{,}876$ [3].

Швидкісні та витратні характеристики труб у перехідній області опору. Якщо число Рейнольдса $\mathrm{Re} = \dfrac{VD}{\nu} = \dfrac{W_{\mathrm{тр}_{\mathrm{кв}}}\sqrt{i_p}D}{\nu} < \mathrm{Re}_{\mathrm{кв}}$, то в трубі встановлюється перехідна область опору, при якій $\lambda = k_{\mathrm{П}}\lambda_{\mathrm{кв}}$, де коефіцієнт збільшення опору в перехідній області $k_{\mathrm{П}} > 1$ [3] і, згідно (6) швидкісна характеристика зменшується до $W_{\mathrm{тр}} = m_{\mathrm{П}}W_{\mathrm{тр}_{\mathrm{кв}}}$, а витратна характеристика – до $K_{\mathrm{тр}} = m_{\mathrm{П}}K_{\mathrm{тр}_{\mathrm{кв}}}$. Коефіцієнт зменшення пропускної здатності в перехідній області $m_{\mathrm{П}} = 1/\sqrt{k_{\mathrm{П}}}$ може бути визначений за формулою

$$m_{\mathrm{П}} = \left[A\left(\frac{\mathrm{Re}}{\mathrm{Re}_{\mathrm{кв}}}\right)^{B} \right]^{-0,5}, \qquad (17)$$

де коефіцієнти A і B приймаються за табл. 2. На рис. 4 показані графіки зміни коефіцієнта $m_{\mathrm{П}} = f\left(\mathrm{Re}/\mathrm{Re}_{\mathrm{кв}}\right)$ для труб з різних матеріалів.

Таблиця 2

Труби	$\mathrm{Re}/\mathrm{Re}_{\mathrm{кв}}$			
	1...0,375		0,375...0,1	
	A	B	A	B
Сталеві, азбестоцементні, залізобетонні	1	$-0,06$	0,918	$-0,137$
Чавунні	1	$-0,143$	0,926	$-0,223$

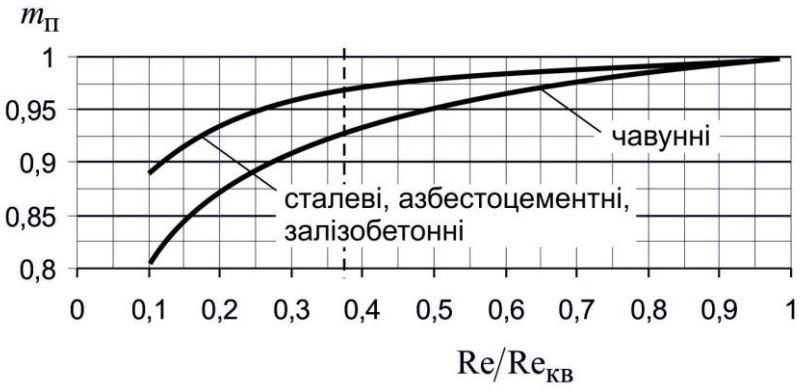


Рис. 4. Коефіцієнт зменшення швидкості і пропускної здатності труби $m_n = f\left(\mathrm{Re}/\mathrm{Re}_{\mathrm{кв}}\right)$ в перехідній області опору

Пропускна здатність трубопроводу з врахуванням місцевих опорів.

В цьому випадку сумарні втрати напору визначаються:

$$h_{\mathrm{вт}} = \frac{Q^2 l}{K_{\mathrm{тр}}^2} + \sum \zeta_{\mathrm{м}} БQ^2, \qquad (18)$$

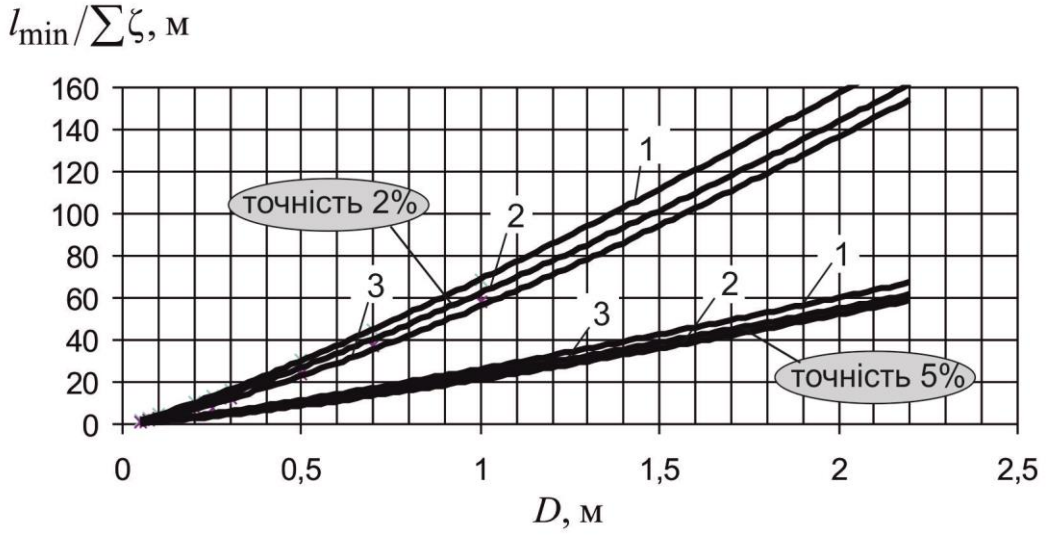
де $\sum\zeta_{\text{м}}$ – сума коефіцієнтів місцевих опорів; $Б = \dfrac{8}{g\pi^2 D^4}$ – параметр, що враховує діаметр труби після місцевого опору.

Враховуючі, що $h_{\text{вт}}/l = i_p$, отримаємо

$$Q = \frac{K_{\text{тр}}\sqrt{i_p}}{\sqrt{1 + БK_{\text{тр}}^2 \dfrac{\sum\zeta}{l}}}. \qquad (19)$$

Знаменник в цій формулі характеризує вплив питомих місцевих опорів $\sum\zeta/l$ на пропускну здатність водоводу Q.

Якщо при відомих матеріалі та діаметрі труби D задана певна точність розрахунку, то за графіком (рис. 5) визначається допустиме значення $\left(\sum\zeta/l\right)_{\max}$, при якому можна знехтувати місцевими опорами. Як приклад, показані такі графіки для різних типів і діаметрів труб при точності розрахунку 2% і 5%. Ця методика є більш обґрунтованою, ніж попередня, при якій труби розподіляли на довгі та короткі тільки в залежності від їхньої довжини $[1,4]$.



Труби: 1 - азбестоцементні, 2 - сталеві, 3 - чавунні

Рис. 5. Мінімальна довжина трубопроводу, при якій можна знехтувати місцевими опорами

Застосування отриманих рекомендацій у практичних розрахунках. Для розрахунку труб інших видів і матеріалів існують рекомендації $[7,8]$, які вказують на те, що характер опорів в них є подібним до опорів в азбестоцементних трубах з врахуванням коефіцієнта збільшення θ. Тоді в формули для швидкісних і витратних характеристик замість параметрів $W'_{\text{кв}}$ і

$K'_{\text{кв}}$ слід вводити параметри $\beta W'_{\text{кв}}$ і $\beta K'_{\text{кв}}$, де значення $\beta = 1/\theta^{0,5}$, і згідно [3] визначається за даними табл.3:

Таблиця 3

Труби	θ	β
Залізобетонні віброгідропресовані, металеві з внутрішнім полімерним покриттям, що нанесено методом набризгування із загладжуванням	1,43	0,836
Залізобетонні центрифуговані і металеві з внутрішнім цементнопіщаним покриттям, що нанесено методом центрифугування	1,26	0,891
Металеві труб з внутрішнім полімерним покриттям , що нанесено методом центрифугування	1,12	0,945

Слід також відмітити, що згідно [3,5, 8], у практичних розрахунках значення гідравлічного коефіцієнта тертя збільшують, помножаючи його на коефіцієнти $k_1 = 1{,}15$ (враховує якість прокладання труб у виробничих умовах) і $k_2 = 1{,}18$ (враховує вплив стиків у сталевих трубах). Тоді треба зменшувати значення швидкісних і витратних характеристик труби $W_{\text{тр}}$ і $K_{\text{тр}}$ шляхом помноження їх на коефіцієнт для всіх труб $k_3 = 1/\sqrt{k_1} = 0{,}93$ і додатково для сталевих труб, на $k_4 = 1/\sqrt{k_2} = 0{,}92$.

Список літератури

1. *Большаков В.А, Константинов Ю.М., Попов В.*Н. и др. Справочник по гидравлике (под редакцией В.А Большакова). – 2-е изд. – К.: «Вища школа», 1984. – 344 с.
2. *Константінов Ю.М., Гіжа О.О.* Сучасний підхід до визначення гідравлічних опорів в трубопроводах / Ю.М.Константінов, О.О. Гіжа // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. – К.: КНУБА, 2013. – Вип. 21. – С. 155-164.
3. *Константінов Ю.М., Гіжа О.О.* Особливості визначення втрат напору в перехідній і квадратичній областях опору / Ю.М.Константінов, О.О. Гіжа // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. – К.: КНУБА, 2013. – Вип. 22. – С. 140-148.
4. Справочник по гидравлическим расчетам / Под. ред. Киселева П.Г. – 4-е изд. – М.: Энергия, 1972. – 312 с.
5. *Шевелев Ф.А.* Исследование основных гидравлических закономерностей турбулентного движения в трубах. – М.: Госстройиздат, 1953. – 208 с.

6. *Шевелев Ф.А.* Гидравлический расчет асбестоцементных труб. – М.: Госстройиздат, 1954. – 68 с.

7. *Шевелев Ф.А, Шевелев А.А.*Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб. Справочное пособие. – М.: ООО «Бастет», 2007. – 350 с.

8. *Водопостачання*. Зовнішні мережі та споруди. ДБН В.2.5-74: 2013. – 2013.

Надійшло до редакції 03.03.2015

УДК 628.477

Г.М. КОЧЕТОВ, доктор технічних наук
Д.М. САМЧЕНКО, аспірант
Київський національний університет будівництва і архітектури
О.Ю. КОВАЛЬЧУК, кандидат технічних наук
А.В. ПАСЬКО, аспірант
Науково дослідний інститут в'яжучих речовин і матеріалів ім. В.Д. Глуховського

КОМПЛЕКСНА УТИЛІЗАЦІЯ ПРОМИСЛОВИХ ВІДХОДІВ, ЯКІ МІСТЯТЬ СПОЛУКИ ЗАЛІЗА, В ЛУЖНИХ ЦЕМЕНТАХ

Встановлено доцільність використання продуктів феритної очистки промислових стічних вод в складі лужних цементів загальнобудівельного призначення. Досліджено властивості бетонів на основі таких цементів.

Ключові слова: промислові стічні води, очистка води, феритизація, лужний цемент, бетон.

Установлена целесообразность использования продуктов ферритной очистки промышленных сточных вод в составе щелочных цементов общестроительного назначения. Исследованы свойства бетонов на основе таких цементов.

Ключевые слова: промышленные сточные воды, очистка воды, ферритизация, щелочной цемент, бетон.

The feasibility for using of residues after wastewater treatment by ferritization method in compositions of alkaline cements for general purposes is established. The properties of concrete based in these cements.

Key words: industrial wastewater, water treament, ferritization, alkaline cement, concrete.

© Г.М. Кочетов, Д.М. Самченко,
О.Ю. Ковальчук, А.В. Пасько, 2015