

**Висновки.** Виконані експериментальні дослідження показують, що за збільшення напружень сірка, яка заповнила пори, капіляри і дефекти структури бетону, ущільнюючись, все більше поглинає і релаксує енергію деформування і частково розтягує зусилля, про що свідчить відсутність поперечних деформацій. За подальшого росту напружень процес деформування ущільненої сірки зменшується і відбувається перерозподіл зусиль на матрицю, що призводить до процесу тріщиноутворення і збільшення коефіцієнта поперечної деформації.

1. Патуров В.В., Орловский Ю.И., Мандзий В.П. *Технология пропитки изделий раствором серы // Бетон и железобетон.* – 1983. – № 7. – С. 28–29. 2. Орловский Ю.И., Мандзий В.П. *Исследование свойств бетонов, пропитанных раствором серы // Строительство и архитектура.* – 1980. – № 1. С. 78–81. 3. Волчушев А.Н., Патуров В.В. *Применение серы для пропитки поровой структуры строительных материалов // Бетон и железобетон.* – 1976. – № 11. – С. 38–39. 4. Цібеленко П.П. *Перспективний будівельний матеріал // Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій.* – Львів, 2006. – № 8. – С. 106–107. 5. Мандзий В.П. *Разработка технологии и изучение свойств бетонных изделий, пропитанных раствором серы дисс. ... канд. техн. наук.* – М., 1983. 6. Цібеленко П.П., Шакуров Д.Д. *Міцність бетонних елементів, просочених сіркою // Вісник НУ "ЛП" "Теорія і практика будівництва".* – 2007. – № 600. – С. 318–322. 7. Цібеленко П.П. *Деформативність бетонних елементів, просочених сіркою // Вісник НУ "ЛП" "Теорія і практика будівництва".* – 2011. – № 697. С. 238–243.

УДК 628.113: 532.542:532.559.2

**В.В. Чернюк, М.П. Босак, О.Г. Гвоздецький,**  
Національний університет "Львівська політехніка",  
кафедра гідравліки та сантехніки

## **ГІДРАВЛІЧНІ РОЗРАХУНКИ ТРУБЧАСТИХ ВОДОЗАБІРНИХ ОГОЛОВКІВ З БІЧНИМИ ВОДОПРИЙМАЛЬНИМИ ВІКНАМИ**

© Чернюк В.В., Босак М.П., Гвоздецький О.Г., 2012

**Запропоновано спрощені, а також удосконалені теоретичні основи гідравлічних розрахунків трубчастих водозабірних оголовоків з бічними водоприймальними вікнами з урахуванням змінної витрати рідини по довжині оголовка.**

**Ключові слова:** трубчастий водозабірний оголовок з бічними водоприймальними вікнами, рух рідини змінної витрати.

**Simplified as well as improved theoretical bases of hydraulic calculations of a tubular water-intake head with lateral water-receiving apertures under the condition of variable flow rate along the pipeline are suggested.**

**Key words:** tubular water-intake head with lateral water-receiving apertures, variable flow rate fluid flow.

**Вступ.** Водоприймальні оголовки є складовими частинами водозабірних споруд річищного (рос. – руслового) типу. Вода від оголовоків самопливними чи сифонними трубопроводами поступає в береговий колодязь [1] або канал (рис. 1). Різновидом водоприймальних оголовоків є трубчасті оголовки з бічними водоприймальними вікнами (рис. 1, 2). У них утворюються напірні потоки зі змінною витратою води, які розраховують так само, як напірні трубопроводи-збирачі (ТЗ). Останні зустрічаються у таких технічних системах: водопостачання (оголовки річищних водозаборів, променеві водозабори, трубчасті горизонтальні водозбори [2], водопровідні очисні споруди);

водовідведення (водовідвідні мережі, каналізаційні очисні споруди); вентиляція (витяжні системи); гідромеліорація (дренаж) тощо. Розповсюдження напірних трубопроводів-збирачів у різних господарчих галузях свідчить про актуальність проблеми їх розрахунку. Розглядувані у цій роботі трубчасті оголовки з бічними водоприймальними вікнами застосовуються в системах технічного водопостачання теплових електростанцій.

**Мета роботи** – проаналізувати відомі методик гідравлічного розрахунку водозабірних трубчастих оголовок з бічними водоприймальними вікнами та розробити оптимальну методику розрахунку.

### 1. Аналітичні методи гідравлічного розрахунку трубчастих водозабірних оголовок.

Методик спеціальних гідравлічних розрахунків трубчастих оголовок з бічними водоприймальними вікнами у літературних джерелах ми не знайшли. Адже в системах технічного водопостачання водозабірними спорудами переважно є відкриті підвідні канали. Зокрема відома нова конструкція розгалуженого водозбору для оборотних систем технічного водопостачання [3], а також водозбори, в складі яких є два водозабірні канали, сполучені з відвідним каналом [4]. У трубчастих глибинних водозборах ТЕС і АЕС застосовують фронтальний водозбір (глибинну галерею).

Обчислення, подібні до розрахунків трубчастих оголовок, проводять під час проектування перфорованих трубопроводів променевих водозборів [5] та дірчастих водозбірних трубопроводів у фільтрах водопровідних очисних споруд [6, 7]. Гідравлічний розрахунок водозбірних трубопроводів потребує визначення притоку по їх довжині, гідравлічних втрат напору на подолання сил тертя по довжині трубопроводу і місцевих втрат напору у вузлах.

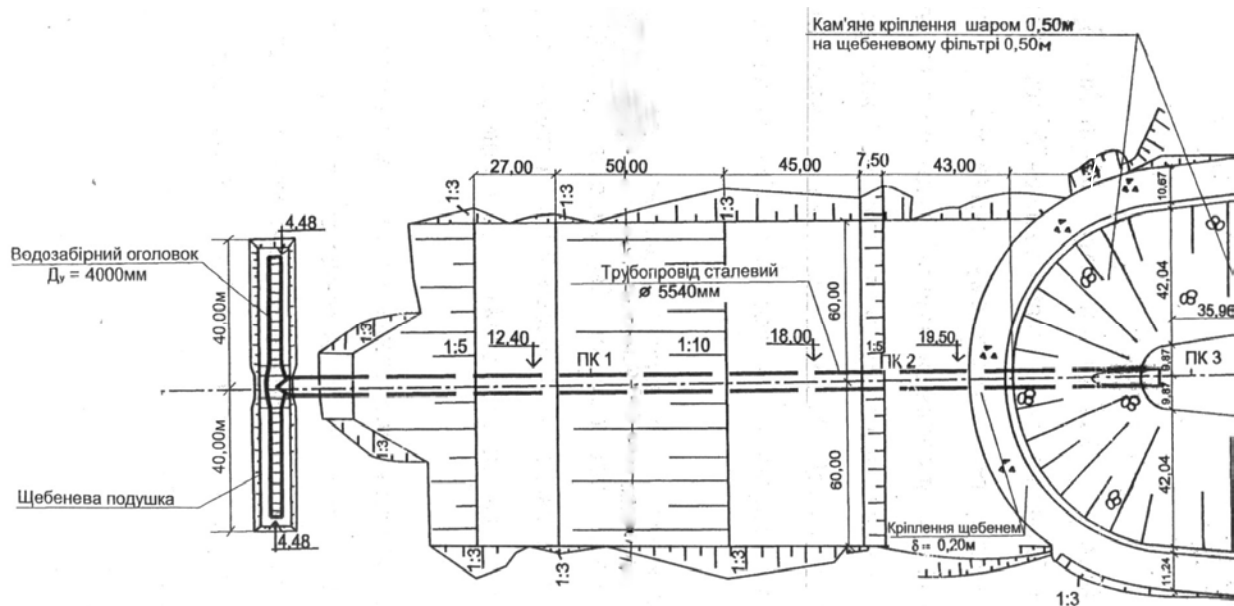


Рис. 1. План водозабірної споруди однієї з діючих ТЕС України

У [7] на основі експериментальних досліджень для водозбірних дірчастих труб з отворами з діаметрами 6...18 мм рекомендовано розрахункові формули для обчислення швидкості води по довжині, а в [8] наведені дослідні коефіцієнти  $m = f(Re^*)$  для так званих конструктивних параметрів  $S_j^* = d/d_0$ , але для малих отворів з діаметрами 2...7 см, а також подані значення  $m = f(Re^*)$  для поздовжніх щілин у стінці труби.

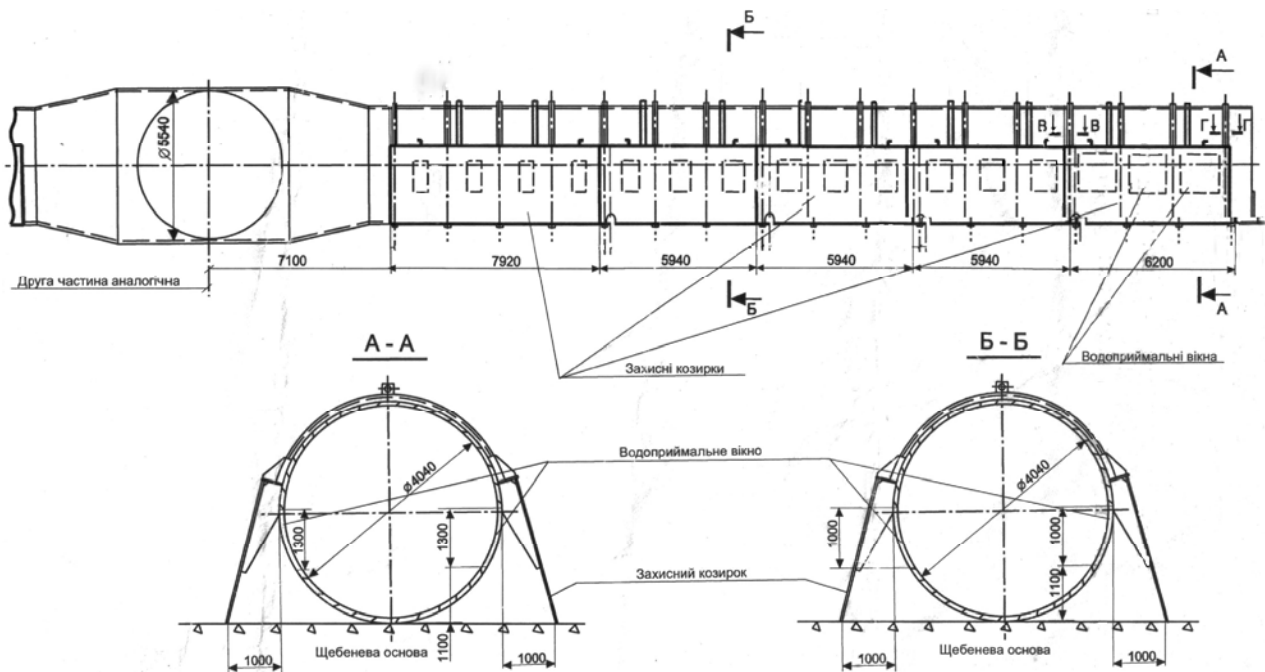


Рис. 2. Конструкція трубчастого оголовка (план оголовка див. на рис. 2)

У [5] подано методику розрахунку перфорованих труб, прокладених у напірних водонесних ґрунтах. Середню швидкість руху води у перфорованому трубопроводі-збирачі (ТЗ) орієнтовно приймають такою, що дорівнює половині швидкості, що в кінці ТЗ. Гідравлічний коефіцієнт тертя перфорованих труб з діаметрами 100...250 мм приймають постійним по довжині ТЗ і таким, що дорівнює 0,08...0,10. Ця методику розрахунку, на нашу думку, не забезпечить високої точності проектування трубчастих оголовків, оскільки специфіка роботи дренажних труб інша, ніж трубчастих оголовків.

За даними експериментальних досліджень Ю. М. Константінова та В.В. Смилова, шляховий притік рідини у ТЗ крізь отвори у його стінках нерівномірний. Він зростає з наближенням до гирла ТЗ. Причиною цього є зниження п'єзометричного напору всередині ТЗ, який витрачається на подолання гідравлічного опору ТЗ і на збільшення швидкісного напору уздовж потоку в ТЗ [9].

**2. Спрощений метод гідравлічного розрахунку трубчастих оголовків.** У водозабірній споруді з продуктивністю  $Q = 66 \text{ м}^3/\text{с}$  системи технічного водопостачання однієї з діючих ТЕС України застосовано трубчастий оголовок з двобічними (фронтальними та тилловими) водоприймальними вікнами (рис. 1, 2). Висота вікон 1,0...1,3 м, а їх загальна площа –  $Sw_i = 30 \text{ м}^2$ . Середня швидкість води в акваторії водосховища безпосередньо біля оголовка становить близько 0,4 м/с за умови, що відбір води проводиться через усі 32 вікна. Розміри вхідних вікон трубчастого оголовка переважно визначаються допустимими вхідними швидкостями ( $v \leq 0,1 \text{ м/с}$ ) з умов рибоохорони [10]. Трубчасті оголовки великих ТЕС розташовуються на глибині понад 8–10 м, де мальки риб не водяться. З цієї причини більші вхідні швидкості води не завдають шкоди малькам риб. До того ж маємо надмірну сумарну площу водоприймальних вікон  $Sw_i$  стосовно площі поперечного перерізу трубчастого оголовка  $W$ , тобто є надлишкова шпаруватість оголовка:  $f = Sw_i/W$ , де  $w_i$  – площа  $i$ -го водоприймального вікна;  $W$  – площа поперечного перерізу трубчастого оголовка. У середині останнього швидкість води істотно більша. Це призводить до зменшення вхідних швидкостей води, що добре з умов рибоохорони і, як наслідок, до зменшення надходження води у водоприймальні вікна на початку оголовка. Останньому запобігає збільшення площі водоприймальних вікон на початку оголовка (рис. 2).

Гідравлічні втрати напору у водоприймальних вікнах трубчастого водозабірної оголовка складаються із втрат напору на вхід водного струменя з витратою  $q$  та діаметром  $d$  і на поворот водного потоку у трубопроводі. При цьому місцеві втрати напору на вході в перше вікно трубчастого оголовка обчислюємо за формулою [11]:

$$\Delta h = \frac{\alpha r V^2}{2} = [0.707(1 - \frac{F_0}{F_1})^{0.375} + (1 - \frac{F_0}{F_2})]^2, \quad (1)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт місцевого опору на вхід у перше вікно;  $V$  – середня швидкість потоку у трубчастому оголовку,  $м/с$ .

Забір води крізь водоприймальні вікна оголовка визначається за формулою [11]:

$$Q = w m \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1 - p_2)}, \quad (2)$$

де  $w$  – площа поперечного перерізу вхідного вікна в  $м^2$ ;  $\rho$  – густина води в  $кг/м^3$ ;  $p_1$  – абсолютний тиск води перед входом у водоприймальні вікна оголовка (тиск зовні оголовка),  $Па$ ;  $p_2$  – те саме, після входу в оголовок (всередині оголовка);  $m$  – коефіцієнт витрати водоприймального вікна, який визначається дослідним шляхом, за  $Re = Re_{кр}$ ; коефіцієнт  $m = 0,6 \dots 0,8$  [11].

Для рівномірного відбору води по довжині трубчастого оголовка з бічними водоприймальними вікнами необхідно на його ділянках забезпечити рівні притоки води. Тобто, якщо розділити кожну з двох (праву та ліву) частин трубчастого оголовка на чотири ділянки (рис. 3), то притоки води на них мали б бути такими:  $Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_4 = 0,25 Q_p$ . В результаті виконаного в першому наближенні розрахунку отримано надто великі площі водоприймальних вікон початкової ділянки трубчастого оголовка. Тому у другому наближенні (таблиця) прийнято нерівномірний водовідбір по довжині трубчастого оголовка.

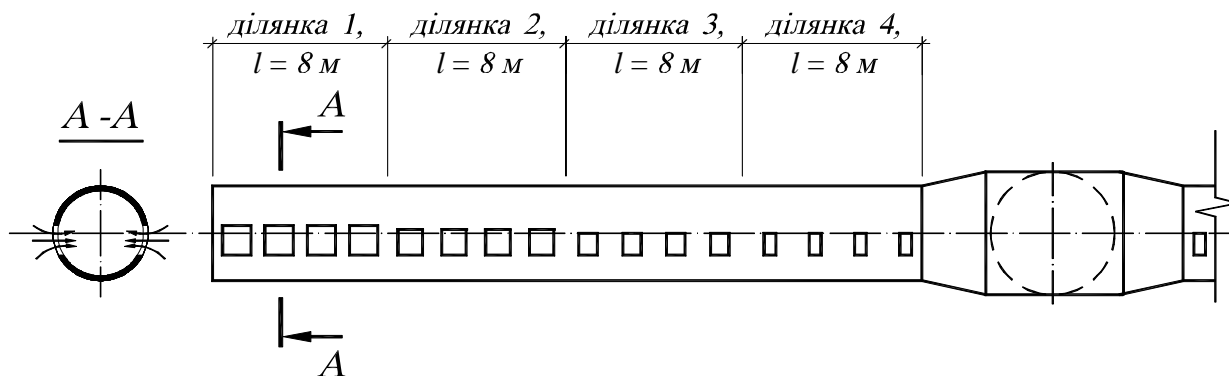


Рис. 3. Схема до гідравлічного розрахунку трубчастого водозабірної оголовка з бічними водоприймальними вікнами (напрямок руху води в оголовок зліва направо)

Оскільки діаметр трубчастого оголовка постійний (4 м), то для  $Q = 33 м^3/с$  (на одне крило оголовка швидкості води у ньому на межах розрахункових ділянок будуть змінюватись у межах від 0,33 до 2,62  $м/с$  (таблиця). Різниця напору  $Z$  між рівнем води зовні оголовка та лінією повного напору всередині оголовка спричиняє вхід води крізь водоприймальні вікна (рис. 4 та 5).

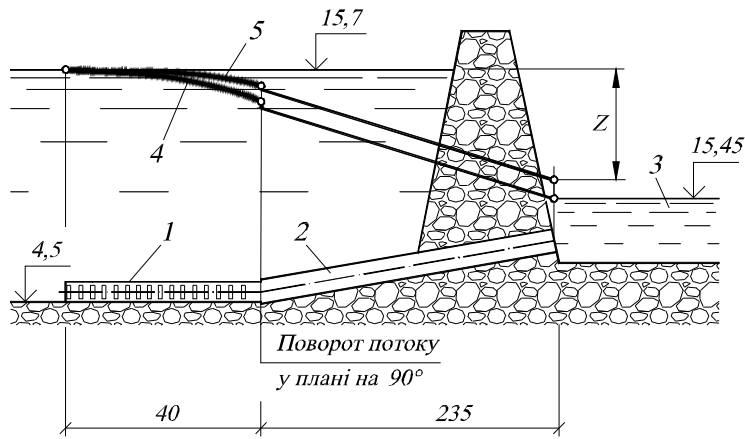


Рис. 4. Схема напірних ліній до гідравлічного розрахунку водозабору:  
 1 – трубчастий оголовок з бічними вікнами; 2 – самопливний водовід; 3 – підвідний канал до блочної насосної станції; 4 – лінія п'езометричного напору; 5 – лінія повного напору

У результаті нашого розрахунку отримано, що загальна площа водоприймальних вікон  $Sw_i = 28 \text{ м}^2$  у 2,23 раза перевищує площу поперечного перерізу трубчастого оголовка  $W$ . Це цілком прийнятно з умов надійності роботи водозабірної споруди. За вхідних швидкостей води у водоприймальних вікнах менших, ніж  $1,0 \text{ м/с}$ , формула (2) неприйнятна, оскільки за малих значень  $Dp = p_1 - p_2$  за цією формулою отримаємо надто великі значення площі водоприймального вікна  $w_i$  (ділянки № 1 і № 2, див. таблицю). Методика ґрунтується на залежності витрати (відбору) води та площі водоприймальних вікон від перепаду тиску  $Dp$  у водоприймальному вікні. Тому точність розрахунку буде вищою, якщо зниження тиску на вході у водоприймальне вікно буде таке саме, як зниження лінії повного напору на розрахунковій ділянці. Це досягається в результаті кількох розрахункових наближень. Контрольну умову для розрахункової ділянки трубчастого оголовка можна виразити формулою

$$h_{\dot{a}\dot{a}_i} = \frac{\alpha V_i^2}{2g} = z \frac{v_{midel}^2}{2g}, \quad (3)$$

де  $h_{\dot{a}\dot{a}_i}$  – втрати напору у водоприймальному вікні;  $V_i$  – швидкість течії води у кінці розрахункової ділянки  $i$  оголовка;  $v_{midel}$  – середня (на розрахунковій ділянці) швидкість води у водоприймальних вікнах. Також потрібно мати достовірні значення коефіцієнтів  $\zeta$  для таких порівняно великих вхідних бічних отворів у трубопроводі.

#### Розрахунок площ водоприймальних вікон трубчастого оголовка

з діаметром  $4,0 \text{ м}$  за  $Q = 33 \text{ м}^3/\text{с}$

Показники	Розрахункові формули	Ділянки одного крила трубчастого оголовка				
		I	II	III	IV	Разом
1	2	3	4	5	6	7
Довжина ділянки трубчастого оголовка, м		8,0	8,0	8,0	8,0	32
Відбір води, $\text{м}^3/\text{с}$		4,0	8,0	9,5	11,5	33
Швидкість води у кінці розрахункової ділянки трубчастого оголовка, $\text{м/с}$	$V_i = Q_i / W ;$ $W = \frac{\rho D^2}{4} =$ $= 12,56 \text{ м}^2$	0,33	0,96	1,71	2,62	-

Показники	Розрахункові формули	Ділянки одного крила трубчастого оголовка				
		I	II	III	IV	Разом
1	2	3	4	5	6	7
Перепад тиску $Dp$ на водоприймальних вікнах, $Па$	$Dp = r \frac{aV_i^2}{2}$	12,8	211,2	898	2354	2835 (середнє)
Втрати зовнішнього напору на вході у водоприймальні вікна, $м$	$h = z \frac{aV_i^2}{2g}$ ; $f(\bar{r})$ [11]	0,005 $\zeta=3,3$	0,07 $\zeta=3,2$	0,28 $\zeta=3,1$	0,72 $\zeta=3,0$	-
Розрахункова (конструктивна) площа водоприймальних вікон, $м^2$	$w_i = \frac{Q_i}{m \sqrt{\frac{2Dp}{r}}}$ $m \approx 0.7$	- (10)	17 (8)	10 (6)	7,6 (4)	28

*Примітка.*  $W$  – площа поперечного перерізу трубчастого оголовка.

У таблиці, а також на схемі (рис. 3) втрати напору по довжині оголовка не враховані як через незначну їх величину, так і через те, що крізь водоприймальні вікна на потік передається відновлювальна дія гідростатичного тиску, яка компенсує втрати напору по довжині. Втрати напору по довжині самопливного водоводу діаметром 5540 мм визначені за формулою  $h = 0,021d^{0,3}$ , становлять  $0,4i$ , що буде відповідати різниці рівнів води між водозабором та підвідним каналом (рис. 3). Якщо водоспоживання ТЕС збільшиться, то дещо знизиться рівень води у підвідному каналі до блочної насосної станції та збільшиться відбір води на трубчастому оголовку водозабірної споруди.

Усі водоприймальні вікна по довжині оголовка знаходяться під таким самим гідростатичним зовнішнім тиском, як і перше вікно. Перепад тиску води на водоприймальному вікні кінцевої ділянки № 4 трубчастого оголовка згідно з розрахунком вищий, ніж на початковій 1 і середній 2 його ділянках (рис. 3), тому на ній повинен бути більший водовідбір за однакової площі водоприймальних вікон. Проте сили інерції по довжині трубопроводу і закон нерозривності потоку води та більша площа водоприймальних вікон сприятимуть збільшенню частки відбору води на початкових ділянках (№1, № 2) оголовка. Адже за умови наповнення усього перерізу водозабірної оголовка з його початкових ділянок, через вхідні вікна ділянки № 4 вода надходитиме переважно внаслідок її підсмоктування, що ускладнює розрахунок. Ще однією особливістю гідравлічного розрахунку цього трубчастого водозабору є те, що швидкість течії води по його довжині є нерівномірною. При цьому  $w = const$ , відтак сили інерції потоку будуть забезпечувати плавність зміни швидкості  $V$  та витрати  $Q$  по довжині оголовка порівняно з розрахунком. Крім того, експериментально не вивчений гідростатичний взаємовплив густорозміщених вхідних вікон у трубчастому оголовку.

**3. Аналіз методів розрахунку, що ґрунтуються на теорії гідравліки змінної витрати.** Точний гідравлічний розрахунок трубопроводу-збирача (ТЗ), яким є трубчастий оголовок, можна зробити тільки за допомогою теорії гідравліки змінної витрати [12]. Творцем теорії руху тіл змінної маси є проф. І. В. Мещерський. На основі його рівнянь, отриманих для точки змінної маси, проф. І. В. Маккавеев у 1928 р. вперше вивів загальне диференціальне рівняння руху рідини змінної витрати. У 1937 р. проф. Я. Т. Ненько одержав рівняння для цілого потоку [13, с. 3–4]. Для циліндричного ТЗ проф. Г. А. Петров записує його так [13, с. 17]:

$$\frac{2a_0(V - n \cos b)dV}{g} + d \frac{p}{rg} + \sin y \cdot dx + dh_l = 0, \quad (4)$$

де  $V$  – середня швидкість потоку в ТЗ;  $v$  – середня швидкість струменя, що приєднується до потоку в ТЗ, крізь водоприймальне вікно;  $\gamma$  – кут нахилу осі ТЗ до обрію;  $dh_l$  – втрати напору по довжині ТЗ;  $b$  й  $j$  – кути між векторами швидкостей основного потоку  $\vec{V}$  і струменя  $\vec{v}$ , що приєднується.

Запропоновано багато підходів до інтегрування диференціального рівняння руху рідини змінної витрати [14–17]. Ю. М. Константінов і В. В. Смыслов [14], розглядаючи напірні ТЗ з дискретним приєднанням рідини, знехтували у рівнянні (4) доданками  $v \cos b$  і  $\sin \gamma \cdot dx$ , увівши допущення, що кут  $b$  приєднання струменів до основного потоку прямий ( $\cos 90^\circ = 0$ ), і також прийнявши, що циліндричний ТЗ є горизонтальним, тобто кут  $\gamma = 0^\circ$ , а  $\sin 0^\circ dx = 0$ . Місцеві втрати напору в ТЗ урахували поправковим коефіцієнтом  $t$ , який залежить від кількості отворів і їх розташування, та задались степеневим законом притоку рідини в ТЗ. Однак отримане розрахункове рівняння дійсне тільки для ТЗ, в яких відстань між отворами не перевищує десяти діаметрів ТЗ [14]. Такі умови задовольняють умовам роботи трубчастого оголовка водозабірної споруди ТЕС, розглянутої у пункті 2. Однак не завжди  $b = 90^\circ$  і  $\gamma = 0^\circ$ .

О.А. Василенко і В.В. Смыслов [15] розв’язували рівняння (4) разом з рівнянням (5), яке описує приплив рідини усередину ТЗ крізь отвір у стінці (водоприймальне вікно):

$$q = \frac{dQ}{dx} = ma \sqrt{2g(H-h)}, \quad (5)$$

де  $q$  – шляхове приєднання рідини на одиницю довжини ТЗ;  $m$  – середній по довжині ТЗ коефіцієнт витрати вхідних отворів;  $a = \frac{S_{w_i}}{l}$  – площа вхідних отворів, зарахована до одиниці довжини ТЗ;  $h$  – п’єзометричний напір усередині ТЗ;  $H$  – те саме, зовні ТЗ.

Підставивши (5) у рівняння (4), звели останнє до безрозмірної форми [15]. Закон приєднання маси прийняли за Datei Claudio [18].

А.М. Кравчук рекомендував фактично для усіх випадків роботи ТЗ брати в інженерних розрахунках коефіцієнт приєднуваної маси  $m = (v \cos b)/V$ , що дорівнює нулю, тобто  $b = 90^\circ$  [16]. До того ж А.М. Кравчук [17, с. 13–15] приймає гідравлічний коефіцієнт тертя  $z_{loc}$  сталим для усієї довжини ТЗ. Розв’язуючи безрозмірне рівняння О.А. Василенка і В.В. Смылова [15], А.М. Кравчук отримав такі залежності у безрозмірній формі для визначення відносних витрати і перепаду напорів в ТЗ [17]:

$$\bar{Q} = \frac{lsh(k\bar{x})}{k \cdot c(kf)}, \quad \bar{z} = \frac{ch(k\bar{x})}{sh(kf)}, \quad (6)$$

де  $Q = k \cdot shax$ . Коефіцієнт  $k$  знаходиться як дійсний додатний корінь з виразу:

$$k^3 - 2k - \frac{z_{l_{T3}}}{2f} th(k\bar{x}) = 0, \quad (7)$$

або за відповідним графіком [17, с. 12]. За методикою КНУБА (м. Київ) [14–17], під час розрахунку довгих ТЗ нехтують місцевими втратами напору, а для коротких ТЗ – втратами напору на тертя по довжині ТЗ. Також приймають:  $m = (v \cos b)/V = const$ .

В.А. Волощук і І.І. Науменко (УДУВГП, м. Рівне) [19, 20] увели у рівняння (4) еквівалентний гідравлічний коефіцієнт тертя, отриманий експериментально, значення якого залежать від відстаней між вхідними отворами. Розв’язок одержано лише для випадку ортогонального приєднання струменів.

Отже, усі розглянуті методики [14–20] придатні для розрахунку ТЗ за умов, що приєднання струменів ортогональне ( $b = 90^\circ$ ), гідравлічний коефіцієнт тертя  $I$  сталий по довжині ТЗ,

коефіцієнт  $m = (v \cos b) / V = \text{const}$ , кут  $\gamma$  нахилу осі ТЗ до обрію близький до нуля, або  $\gamma = 0^\circ$ . До того ж за методиками [14–20] не враховуються параметри потоку рідини, що омиває ТЗ зовні, як це трапляється під час роботи трубчастих водозабірних оголовків, влаштованих у річищі ріки. Наприклад, потік, який набігає на трубчастий оголовок з двосторонніми бічними водоприймальними вікнами (див. рис. 2), чинить на фронтальні вікна додаткову гідродинамічну силу, що проштовхує приєднаний струмінь усередину оголовка, а на тилові вікна діє така сама за значенням гідродинамічна сила, що відсмоктує приєднаний струмінь з оголовка назовні. Як бачимо, надійні методи проектування трубчастих оголовків з бічними водоприймальними вікнами, у яких бралися б до уваги усі кінематичні та динамічні характеристики зовнішнього та внутрішнього потоків і геометричні параметри оголовка, відсутні. Неповне врахування параметрів трубопроводу з отворами у стінці і гідродинамічних особливостей потоку рідини змінної витрати супроводжується серйозними прорахунками під час проектування [7, с. 3].

**4. Розрахунок трубчастих оголовків за методом В.В. Чернюка [21].** З метою урахування гідродинамічної дії зовнішнього потоку води на трубовід-збирач, яким є розглядуваний трубчастий водозабірний оголовок, В.В. Чернюк [21] увів у диференціальне рівняння руху рідини змінної витрати (4) додаткову складову, з урахуванням якої рівняння (4) набуло такого вигляду:

$$\frac{2a_0(V - n \cos b)dV}{g} + d \frac{p}{rg} + \frac{p_{out}}{rg} \frac{dV}{v} \cos b + \sin \gamma \cdot dx + dh_l = 0. \quad (8)$$

Рівняння (11) включає шість змінних:  $V$ ,  $dV$ ,  $v$ ,  $dp$ ,  $dh_l$ ,  $dx$ , одна з яких  $dx$  є незалежною. Їх виражено через повний напір  $Z_{(x)}$  та незалежну змінну відстань  $x$  (рис. 5). Отже, рівняння (11) зведено до двох змінних.

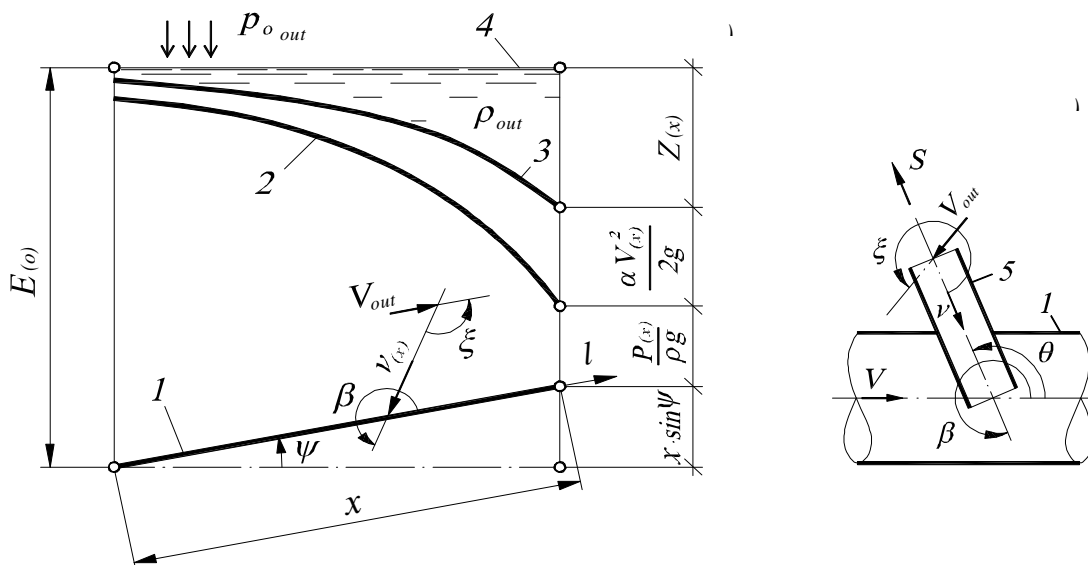


Рис. 5. Розрахункові схеми трубчастого оголовка: а – напори, що діють на оголовок; б – кути між напрямками швидкостей: 1 – трубчастий оголовок; 2 – н'єзометрична лінія для потоку води усередині оголовка; 3 – те саме, лінія повного напору; 4 – рівень води зовні оголовка; 5 – водоприймальне вікно у вигляді насадки; l – вісь оголовка;  $v$ ,  $V$ ,  $V_{out}$  – швидкості відповідно струменя, що приєднується, внутрішнього та зовнішнього потоків води

Розв'язком рівняння (8), отриманим В.В. Чернюком [21], є вираз (9). Він універсальний і справедливий для ламінарного й турбулентного режимів руху рідини. За формулою (9) обчислюють



сумарну витрату рідини  $\sum_{x_i}^{x_k} Q_{(x)}$ , що приєднується до основного потоку у трубчастому оголовку на розрахунковій ділянці завдовжки  $x_{(i-k)}$  (рис. 6):

$$b_{i-k} \int_{x_i}^{x_k} Z_{(x)}^{1/2} dx = b_{i-k} x_{i-k} \left\langle Z_{(x_i)}^{1/2} + \frac{b_{i-k} x_{i-k}}{4g\Omega_{(x_i)}} \left[ \left( 2a_o - a \frac{r}{r_{out}} \right) V_{(x_i)} - a_o v_{(x_i)} \cos b_{(x_i)} \right] + \right. \\ \left. + \frac{1}{4Z_{(x_i)}^{1/2}} \left\{ x_{i-k} \left[ \frac{l_{(x_i)} V_{(x_i)}^2}{D_{(x_i)} 2g} + \frac{r}{r_{out}} \sin \gamma_{(x_i)} \right] - f_{i-k} \left[ \frac{p_{o_{out}}}{rg} + \frac{r_{out}}{r} \left( E_{(x_i)} + \frac{aV_{out}^2}{2g} \cos x \right) \right] \cos b_{(x_i)} \right\} \right\rangle. \quad (9)$$

Залежність (10) для покрокового обчислення повного робочого напору  $Z_{(x_k)}$ , під дією якого струмільн проникає всередину трубчастого оголовка у перерізі  $k$ , отримано диференціюванням виразу (9) [21]. Розрахунок оголовка ведеться поступально, короткими ділянками, ходом за течією:

$$Z_{(x_k)} = \left\langle Z_{(x_i)}^{1/2} + \frac{k \cdot b_{i-k} x_{i-k}}{2g\Omega_{(x_i)}} \left[ \left( 2a_o - a \frac{r}{r_{out}} \right) V_{(x_i)} - a_o v_{(x_i)} \cos b_{(x_i)} \right] + \right. \\ \left. + \frac{k}{2Z_{(x_i)}^{1/2}} \left\{ x_{i-k} \left[ \frac{l_{(x_i)} V_{(x_i)}^2}{D_{(x_i)} 2g} + \frac{r}{r_{out}} \sin \gamma_{(x_i)} \right] - f_{i-k} \left[ \frac{p_{o_{out}}}{rg} + \frac{r_{out}}{r} \left( E_{(x_i)} + \frac{aV_{out}^2}{2g} \cos x \right) \right] \cos b_{(x_i)} \right\} \right\rangle^2. \quad (10)$$

У рівняннях (9) і (10)

$\left( 2a_o - a \frac{r}{r_{out}} \right) V_{(x_i)}$  – множник, який враховує напір основного потоку рідини змінної

витрати у трубчастому оголовку;

$a_o v_{(x_i)} \cos b_{(x_i)}$  – те саме, струменів, які входять крізь водоприймальні вікна в оголовок;

$x_{i-k} \frac{l_{(x_i)} V_{(x_i)}^2}{D_{(x_i)} 2g}$  – доданок який ураховує втрати напору основного потоку на тертя по

довжині розрахункових ділянок трубчастого оголовка;

$x_{i-k} \frac{r}{r_{out}} \sin \gamma_{(x_i)}$  – доданок, який враховує приріст або зменшення напору, викликані

нахилом поздовжньої осі трубчастого оголовка до обрїю під кутом  $\gamma$  (рис. 6);

$f_{i-k} \left[ \frac{p_{o_{out}}}{rg} + \frac{r_{out}}{r} \left( E_{(x_i)} + \frac{aV_{out}^2}{2g} \cos x \right) \right] \cos b_{(x_i)}$  – многочлен, який враховує гідродина-

мічний напір зовнішнього потоку рідини, що діє на потїк усередині оголовка;

$x_i$  – індекс при символах, який вказує на належність позначуваних ними величин до початку розрахункової ділянки  $i-k$ ;

$b_{i-k}$  – коефіцієнт, сталий на розрахунковій ділянці  $i-k$ ,  $b_{i-k} = (nmw\sqrt{2g})_{i-k} = const$ ,  $m^{1.5}/c$ ;

$n_{i-k}$  – кількість водоприймальних вікон, яка припадає на одиницю довжини оголовка,  $i^{-1}$ ;

$m_{i-k}$  – коефіцієнт витрати водоприймального вікна;

$w_{i-k}$  – площа водоприймального вікна;

- $W_{(x_i)}$  – площа поперечного перерізу трубчастого оголовка на розрахунковій ділянці  $i-k$  ;
- $V_{(x_i)}$  – середня швидкість основного потоку в оголовку,  $V_{(x_i)} = Q_{(x_i)} / \Omega_{(x_i)}$  ;
- $v_{(x_i)}$  – швидкість приєднуваного струменя,  $n_{(x_i)} = aZ_{(x_i)}^{1/2}$  ;
- $D_{(x_i)}$  – внутрішній діаметр трубчастого оголовка;
- $k$  – емпіричний коефіцієнт,  $k = 1,3 \dots 2,3$ ;
- $r$  і  $r_{out}$  – густини рідин відповідно всередині та зовні оголовка;
- $P_{o_{out}}$  – тиск повітря на поверхні потоку води, що омиває трубчастий оголовок зовні.

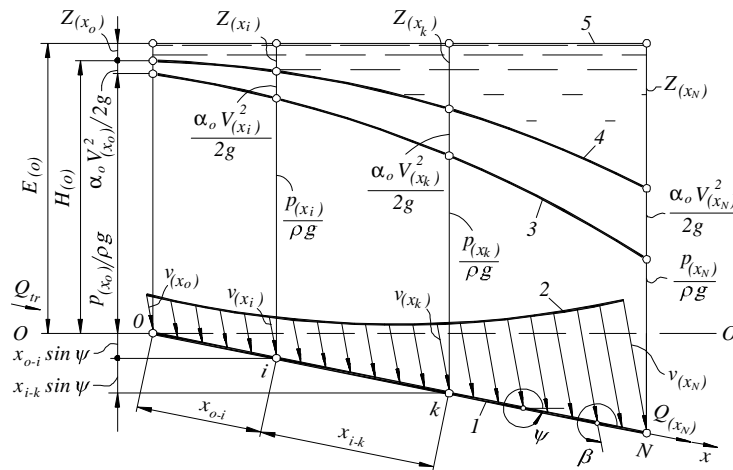


Рис. 6. Схема до методики розрахунку трубчастого оголовка: 1 – трубчастий оголовок; 2 – еюра швидкостей приєднаних струменів; 3 – п'єзометрична лінія для потоку всередині оголовка; 4 – те саме, лінія повного напору; 5 – рівень рідини зовні оголовка;  $x$  – поздовжня вісь оголовка [21, с. 16]

На розрахунковій ділянці  $x_{i-k}$  між двома сусідніми водоприймальними вікнами витрата основного потоку у трубчастому оголовку незмінна, отож, значення коефіцієнта Дарсі на цьому відрітку течії приймаємо сталим  $I_{i-k} = I_{(x_i)}$ , як за рівномірного руху води [22, с. 124]. Залежно від режиму течії рідини та ділянок гідравлічного опору  $I_{(x)}$  обчислюють за формулами:

за  $Re_{(x_i)} \leq 2320$  (ламінальний режим течії):

$$I_{(x_i)} = \frac{64}{Re_{(x_i)}}; \quad (11)$$

для  $Re_{(x_i)} \frac{D_{(x_i)}}{D_{(x_i)}} < 10$  (ділянка гідравлічно гладких труб зони турбулентного режиму руху рідини):

$$I_{(x_i)} = \frac{0,3164}{Re_{(x_i)}^{0,25}}; \quad (12)$$

для  $10 \leq Re_{(x_i)} \frac{D_{(x_i)}}{D_{(x_i)}} \leq 500$  (ділянка доквадратичного опору гідравлічно шорстких труб зони турбулентного режиму руху рідини):

$$I_{(x_i)} = 0,11 \left[ \frac{\Delta_{(x_i)}}{D_{(x_i)}} + \frac{68}{Re_{(x_i)}} \right]^{0,25}; \quad (13)$$

для  $Re_{(x_i)} \frac{D_{(x_i)}}{D_{(x_i)}} > 500$  (ділянка квадратичного опору гідравлічно шорстких труб зони турбулентного режиму руху рідини):

$$I_{(x_i)} = 0,11 \left( \frac{\Delta_{(x_i)}}{D_{(x_i)}} \right)^{0,25} \quad (14)$$

Значення критерію Рейнольдса встановлюють за формулою

$$Re_{(x_i)} = \frac{Q_{(x_i)} D_{(x_i)}}{W_{(x_i)} \nu_{(x_i)}} \quad (15)$$

За збільшення відстаней  $l_{hole}$  між водоприймальними вікнами вздовж оголовка значення коефіцієнта  $k$  зростає. Наприклад, за відносного кроку водоприймальних насадок  $l_{hole}/D = 4.32 \div 12.95$  і за відсутності транзитної витрати ( $Q_{tr} = 0$ ) значення коефіцієнта  $k = 1.65$ . Для  $l_{hole}/D = 12.95 \div 43.2$  та  $Q_{tr} = 0$  значення коефіцієнта  $k$  є вищими. З достовірністю апроксимації  $R^2 = 0.9684$  їх можна обчислити за лінійною залежністю (16) [21]:

$$k = 0.029 \frac{l_{hole}}{D} + 1.2797 \quad (16)$$

Коефіцієнт витрати водоприймального вікна:

$$m_{(x_i)} = f(Re_{or(x_i)}, l/d),$$

де  $l$  – довжина вхідної насадки у разі водоприймальних вікон, влаштованих у вигляді насадки;  $d$  – діаметр вхідної насадки;  $Re_{or(x_i)}$  – критерій Рейнольдса для струменя, який входить усередину оголовка крізь насадку, улаштований у перерізі  $x_i$ ,  $Re_{or(x_i)} = f(Z_{(x_i)})$ . Наприклад, для циліндричної вхідної насадки за  $Fr_{(x_i)} > 10$ ,  $We_{(x_i)} > 200$ , досконалого повного стиснення й гострих вхідних кромek значення коефіцієнта  $m_{(x_i)}$  можна обчислити за емпіричними формулами, отриманими за даними З. І. Геллера, Ю. А. Скобельцина [23, с. 68–71]. Одна з цих залежностей для співвідношень  $l/d = 1 \dots 1.5$ ,  $Re_{th(x_i)} = 10^3 \dots 10^5$ , або  $l/d = 2 \dots 5$ ,  $Re_{th(x_i)} = 50 \dots 15 \cdot 10^4$  або  $l/d = 10 \dots 50$ ,  $Re_{th(x_i)} = 80 \dots 15 \cdot 10^4$  має такий вигляд [23, с. 69]:

$$m_{(x_i)} = \frac{1}{1.23 + \frac{58 \cdot l}{Re_{th(x_i)} d}} \quad (17)$$

де  $Re_{th(x_i)} = \left( \sqrt{2gZ_{(x_i)}} \cdot d \right) / \nu$  – критерій Рейнольдса для приєднуваного струменя за теоретичної швидкості  $\sqrt{2gZ_{(x_i)}}$  його течії крізь водоприймальне вікно [23, с. 61].

Для обчислення коефіцієнта витрати водоприймального вікна, влаштованого у вигляді великого отвору у стінці трубчастого оголовка (див. рис. 2) у його розрахунковому перерізі  $x_i$  (див. рис. 6), можна рекомендувати формулу [23, с. 63]:

$$m_{(x_i)} = \frac{e_{(x_i)}}{\sqrt{2e_{(x_i)}^2 m_{(x_i)}^2 - 2e_{(x_i)} m_{(x_i)} + 1 + x_{0(x_i)}}} \quad (18)$$

де  $e_{(x_i)} = w_{\dot{\theta}_{(x_i)}} / w_{(x_i)}$  – коефіцієнт стиснення струменя;  $w_{\dot{\theta}_{(x_i)}}$  – площа у стисненому перерізі на виході струменя з водоприймального вікна;  $w_{(x_i)}$  – площа вихідного перерізу водоприймального вікна;  $m_{(x_i)} = w_{(x_i)} / w_{c2(x_i)}$  – ступінь розширення струменя;  $w_{c2(x_i)}$  – площа живого перерізу струменя після стисненого перерізу;  $z_0$  – коефіцієнт опору незатопленого отвору водоприймального вікна.

На першому водоприймальному вікні у перерізі оголовка  $x=0$  (рис. 6) повний робочий напір, під дією якого струмінь проникає усередину оголовка, дорівнює  $Z_{(x_0)}$ . Якщо транзитна витрата рідини відсутня ( $Q_{tr}=0$ ), то значенням повного робочого напору  $Z_{(x_0)}$  на першому водоприймальному вікні у перерізі оголовка  $x=0$  необхідно задатись, наприклад,  $Z_{(x_0)}=10^{-3} \cdot E_{(0)}$ . Повний робочий напір потоку всередині оголовка у перерізі  $x=0$  дорівнює  $H_{(x_0)}=H_{(0)}=E_{(0)}-Z_{(x_0)}$ , де  $E_{(0)}$  – глибина занурення осі оголовка під рівень води у перерізі  $x=0$ . Витрату рідини у перерізі  $x_i$  обчислюють за формулою (9). Після цього за формулою (10) знаходять робочий напір  $Z_{(x_i)}$  у кінці розрахункової ділянки  $0-i$ . Ідуть уздовж потоку по усіх проміжних ділянках до перерізу з номером  $N$ . Для кожної ділянки знаходять значення  $Q_{(x_i)}$  і  $Z_{(x_i)}$ . Довжини розрахункових ділянок оголовка  $x_{(i-k)}$  (рис. 6) доцільно брати такими, що дорівнюють відстаням між сусідніми водоприймальними вікнами.

Зменшити нерівномірність притоку води у трубчастий оголовок, що бачимо з рівнянь (9) і (10), можна зміною геометричних параметрів оголовка (зменшити на одних ділянках і збільшити на інших): площі  $w_{(x_i)}$  водоприймальних вікон; діаметра  $D$  оголовка; його шпаруватості  $f_{i-k}$ ; кута  $b_{(x_i)}$  між поздовжньою віссю оголовка і напрямком руху приєднуваного струменя; кута  $\chi_{(x_i)}$  між напрямками руху приєднуваного струменя та зовнішнього потоку; кута  $\gamma_{(x_i)}$  нахилу поздовжньої осі оголовка до обрїю.

**Висновок.** Методика [21] розрахунку трубчастих водозабірних оголовків з бічними водоприймальними вікнами, що ґрунтується на диференціальному рівнянні руху рідини змінної витрати, має такі переваги, порівняно з іншими відомими методиками. Вона враховує поздовжній нахил осі трубчастого оголовка, кути приєднання струменів, гідродинамічний тиск зовнішнього потоку рідини, фізичні властивості води, що всередині та зовні трубчастого оголовка, зміни уздовж оголовка законів гідравлічного опору та значень гідравлічного коефіцієнта тертя і коефіцієнта витрати водоприймальних вікон.

1. Тугай А. М. Водоснабжение. Водозаборные сооружения / А. М. Тугай. – К.: Вища шк., 1984. – 200 с.
2. Разумов Г. А. Проектирование и строительство горизонтальных водозаборов и дренажей / Г. А. Разумов. – М.: Стройиздат, 1988. – 240 с.
3. Декларац. пат. 62504 Україна, МПК Е 02В 9/00. Водозабірна споруда / В. В. Чернюк, М. П. Босак, В. М. Каращенко (Україна); Нац. ун-т “Львівська політехніка”. – № 2003042946; Заявлено 03.04.2003; Опубл. 15.12.2003, Бюл. № 12. – 2 с.
4. Гідротехнічні споруди: навч. посіб. / під ред. А.Ф. Дмитрієва. – Рівне: РДТУ, 1999. – 328 с.
5. Бондар Ф. М. Специальные водозаборные сооружения / Ф.М. Бондар, Н.В. Ереснов, С.И. Семенов, И.Е. Суров. – М.: Госстройиздат, 1963. – 368 с.
6. Мартиненко В.В. Расчет водовыпусков со щелями постоянной высоты / В.В. Мартиненко, В.Н. Усик // Гидравлика и гидротехника: науч.-техн. сб. – Вып. 40. – К.: Техніка, 1983. – С. 35–39.
7. Егоров А.И. Гидравлика напорных трубчатых систем в водопроводных очистных сооружениях / А.И. Егоров. – М.: Стройиздат, 1984. – 95 с.
8. Навоян Х.А. Примеры гидравлических расчётов водопропускных сооружений / Х.А. Навоян. – К.: Будівельник, 1975. – 148 с.
9. Константинов Ю.М. К расчету дырчатых труб с присоединением расхода вдоль пути / Ю.М. Константинов, В.В. Смыслов // Гидравлика и гидротехника: науч.-техн. сб. – Вып. 4. – К.: Техніка, 1966. – С. 118–127.
10. СНиП 2.04.02-84. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. – М.: Стройиздат, 1985. – 136 с.
11. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик / под ред. М.О. Штейнберга. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
12. Навоян Х.А. Примеры гидравлических расчётов водопропускных сооружений / Х.А. Навоян. – К.: Будівельник, 1975. – 148 с.
13. Петров Г. А. Гидравлика переменной массы (Движение жидкости с изменением расхода вдоль пути). – Харьков:

ХГУ, 1964. – 224 с. 14. Константинов Ю.М. К расчету дырчатых труб с присоединением расхода вдоль пути / Ю. М. Константинов, В. В. Смыслов // Гидравлика и гидротехника: науч.-техн. сб. – Вып. 4. – К.: Техніка, 1966.– С. 118–127. 15. Василенко А. А. Анализ уравнения движения жидкости в горизонтальном цилиндрическом трубопроводе с присоединением расхода вдоль пути / А.А. Василенко, В.В. Смыслов // Гидравлика и гидротехника: науч.-техн. сб. – Вып. 17.– К.: Техніка 1973. – С. 19–24. 16. Кравчук А.М. Определение коэффициента присоединяемой массы в перфорированных сборных трубопроводах / А.М. Кравчук // Гидравлика и гидротехника: науч.-техн. сб. – Вып. 46. – К.: Техніка, 1988. – С. 7–9. 17. Кравчук А. М. Гідравліка змінної маси напірних трубопроводів технічних систем: автореф. дис. ... докт. техн. наук: спец. 05.23.16 “Гідравліка і інженерна гідрологія” / А.М. Кравчук. – К., 2004. – 35 с. 18. Claudio D. Icondotti emungenti da un serbatoio. Atti e men. Accad. patav. sci lettere ed arti / Claudio D.– 1961–1962. – 74, Parte 2. 19. Волощук В.А. Дослідження гідравлічних опорів і гідравлічні розрахунки трубопроводів з дискретно змінними витратами уздовж потоку: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.23.16 “Гідравліка і інженерна гідрологія” / В.А. Волощук. – Рівне: Рівненськ. держ. техн. ун-т, 2001. – 20 с. 20. Волощук В. А. Дослідження гідравлічних опорів і гідравлічні розрахунки трубопроводів з дискретно змінними витратами уздовж потоку: дис... канд. техн. наук: 05.23.16 / Волощук Володимир Андрійович. – Рівне: Рівненськ. держ. техн. ун-т, 2001. – 217 с. 21. Чернюк В.В. Регулювання інтегральних параметрів напірних потоків рідин гідродинамічно активними додатками: автореф. дис. ... докт. техн. наук: спец. 05.23.16 “Гідравліка і інженерна гідрологія” / В.В. Чернюк. – К., 2010. – 36 с. 22. Константинов Ю.М. Гидравлика: учебник / Ю.М. Константинов. – К.: Вища шк., 1988. – 398 с. 23. Степанов М. П. Справочник по гидравлике для мелиораторов / М. П. Степанов, И. Х. Овчаренко, Ю. А. Скобельцын. – М.: Колос, 1984. – 207 с.