

Список

А К А Д Е М І Я Н А У К У Р С Р
П РА Ц І І Н С Т И Т У Т У Г І Д Р О Л О Г І І

Інж. І. В. ЖУРАВЕЛЬ

кандидат технічних наук

532
ЖЕ-91

**КРИТЕРІЙ ЗАТОПЛЕНОСТІ
ПРИ
ГІДРАВЛІЧНИХ РОЗРАХУНКАХ
СПОРУД**

— 2379 —

011

В И Д А В Н И Ц Т В О А К А Д Е М І І Н А У К У Р С Р
К И Ї В — 1 9 4 1



1838

RECEIVED OF THE
TREASURY DEPARTMENT
WASHINGTON
D.C.

7379

А К А Д Е М І Я Н А У К У Р С Р
П РАЦІ ІНСТІТУТУ ГІДРОЛОГІЇ

Інж. І. В. ЖУРАВЕЛЬ
кандидат технічних наук

у 532
Ж-91

КРИТЕРІЙ ЗАТОПЛЕНОСТІ
ПРИ
ГІДРАВЛІЧНИХ РОЗРАХУНКАХ
СПОРУД

Інститут Гідро-Меліорації
ІНСТІТУТ ГІДРОЛОГІЇ
БІБЛІОТЕКА
№ 7379

проектно
1966 г.

ср
✓

ВИДАВНИЦТВО АКАДЕМІЇ НАУК УРСР
КИЇВ—1941

Відповідальний редактор
член-кор. АН УРСР *Г. Й. Сухомел*

Вступ

Рух рідини в затоплених спорудах в більшій чи меншій мірі відрізняється від умов протікання в таких же спорудах, але незатоплених. Раніше ніж перейти до розгляду питання про вплив затопленості на умови протікання рідини в спорудах на відкритих водотоках, з'ясуємо, які можливі підходи до встановлення самого поняття критерію затопленості. Будівання того чи іншого типу споруди на відкритому водотоці в загальному випадку спричиняє певні відхилення в режимі руху потоку від побутових характеристик. На деяких ділянках водотоку в зв'язку з збудуванням споруд можуть при заданій витраті Q встановитись глибини більші, ніж у побутовому (природному) стані, на інших же, навпаки, глибини можуть зменшитись, порівнюючи з глибинами водотоку в природному стані. Особливо великі відхилення в глибинах можуть бути перед спорудами в бік збільшення, порівнюючи з побутовими, в сфері підпору. Навпаки, за спорудами можуть бути відхилення, при яких глибини значно зменшуються, порівнюючи з глибинами водотоку в природному його стані, бо за спорудою звичайно відбувається гашення запасеної перед спорудою енергії водотоку. В тому випадку, коли гашення енергії в нижньому б'єфі відбувається в спокійному чи бурхливому водотоці при утворенні на певній ділянці за спорудою кривої підпору в 3-й зоні, умови руху в нижньому б'єфі не впливають на протікання рідини в споруді. Встановлення побутової глибини в спокійному водотоці безпосередньо за спорудою вже в деяких випадках може відбитись і на умовах протікання в самій споруді. Утворення в нижньому б'єфі затопленого стрибка може при певних умовах вплинути на рух потоку в споруді.

З другого боку, гашення запасеної перед спорудою енергії водотоку в нижньому б'єфі може відбуватись головним чином або в наслідок значного збільшення тертя (утворюються криві підпору в 3-й зоні бурхливого чи спокійного водотоку), або ж в наслідок великих місцевих втрат енергії в затопленому стрибку безпосередньо за спорудою. Коли мова йде про стрибок у нижньому б'єфі, то звичайно мають на увазі спокійний водотік або ділянку його, де при побутовому режимі течія звичайно спокійна. Але і в бурхливому водотоці нижче споруди може також при певних умовах (наприклад, при наявності водобійного колодязя) утворитися стрибок.

І в тому випадку, коли рух рідини в нижньому б'єфі впливає на умови протікання в споруді, і в тому випадку, коли розсіювання (гашення) енергії нижче споруди супроводиться утворенням стрибка безпосередньо за спорудою, спостережані явища відбуваються в умовах затоплення. Правда, в першому випадку мова йде про затоплену споруду, а в другому — про затоплений стрибок в нижньому б'єфі.

Не зважаючи на те, що для багатьох типів споруд затопленість їх залежить від утворення з низової сторони стрибка, ми все таки надалі розглядатимемо головним чином питання про врахування затоплення споруд, а не стрибка, і при тому, зважаючи на складність явища, для найпростіших випадків.

Розв'язання поставленого завдання навіть при вказаному обмеженні має велике практичне значення.

Якщо для споруди рівень у нижньому б'єфі впливає на режим протікання в самій споруді, то звідси, при заданій витраті Q , може встановитись і такий режим, якого для даних конкретних умов не можна допустити. Так, наприклад, велике підтоплення з низової сторони може, очевидно, збільшити глибини як у споруді, так і перед нею. Коли з тих чи інших міркувань не можна припустити збільшення глибини, то в цьому випадку доводиться шукати шляхів до зменшення їх. Часто шлях до зменшення глибин є єдиним — збільшення розмірів споруди (звичайно ширини), що в свою чергу обумовлює збільшення її вартості. Можливе і зворотнє явище — з збільшенням глибини як у споруді, так і перед нею швидкості течії зменшуються настільки, що створюються умови до випадання і відкладання наносів. І в цьому випадку доводиться намічати ті чи інші заходи або до усунення умов, які спричиняють відкладання наносів, або до очистки від наносів, коли не можна уникнути відкладання їх. Нарешті, умови руху в споруді і в нижньому б'єфі настільки тісно зв'язані між собою, що не можна визначити характеру протікання нижче споруди раніше, ніж буде з'ясована картина руху в споруді. Тим часом розв'язання задачі щодо форми супрягання б'єфів доводиться давати в переважній більшості гідравлічних розрахунків споруд. Точність розв'язання задачі по визначенню форми супрягання б'єфів, очевидно, залежить в значній мірі від надійності вихідних даних, до числа яких належить і з'ясування умов протікання в споруді.

Наведені приклади з достатньою повнотою ілюструють важливість і актуальність розв'язання задачі по встановленню критерію затопленості споруд. Особливо велике значення має висвітлення питання щодо затопленості для таких типів споруд, які або зовсім не дають донного стиснення водотоку, а тільки бічне (мости, труби), або порівнюючи невелике стиснення знизу (руслові греблі). Розв'язання задачі про вплив затопленості на умови протікання в споруді має велике практичне значення і при розгляді умов руху потоку при витіканні спід щита, незалежно від того, будемо ми мати стиснення поперечного перерізу порогом чи ні.

У дальшому викладі обмежимося розглядом умов затопленості вказаних типів споруд і при тому, як уже сказано, для найпростішого випадку — русла прямокутного перерізу.

§ 1. Витікання спід щита. Загальні зауваження

Рух рідини в спорудах на відкритих водотоках за типом витікання спід щита в практиці трапляється дуже часто (у водоспусках при неповному відкриванні затворів, в регуляційних спорудах на осушних і зрошувальних системах, а також при підведенні води до гідроелектричних станцій); тому, природно, з'ясування умов руху для даного випадку має велике практичне значення. Тим часом розв'язання цієї задачі висвітлене дуже мало як теоретично, так і експериментально.

Инж. А. Ф. Бурков¹⁾ на основі натурних спостережень приходигь до висновку, що розрахункова формула вигляду (рис. 1):

$$Q = \mu_1 \omega \sqrt{2gz_0} \quad (1)$$

„невірна, тому що тиск у безпосередній близькості до щитового отвору в нижньому б'єфі менше тиску нижнього б'єфу“.

¹⁾ Инж. А. Ф. Бурков, Результаты некоторых гидравлических исследований головного узла Малокабардинской оросительной системы в натуре, „Известия НИИГ“, т. V, 1932.

Далі, інж. Бурков вважає, що в розрахункову залежність при затопленні отвору необхідно вводити не z_0 , як різницю рівнів у верхньому і нижньому б'єфах, а якусь величину $z'_0 > z_0$, висуваючи як завдання для дальшого дослідження встановлення зв'язку між z'_0 і z_0 . Цікаво відзначити таку обставину, зачеплену в розгляданій роботі. Не зважаючи на те, що на основі обробки матеріалів натурних спостережень значення коефіцієнта та витрати μ для затопленого отвору одержані значно вищі ($\mu = 0,73 - 0,91$), ніж для отвору при вільному витіканні, інж. Бурков все таки вважає, що в дійсності величина коефіцієнта „ μ навряд чи може істотно збільшитись“ [визначення μ при обробці матеріалів проведено було за формулою (1)], гадаючи, таким чином, що при затопленому отворі μ все таки може бути трохи більше, ніж при незатопленому.

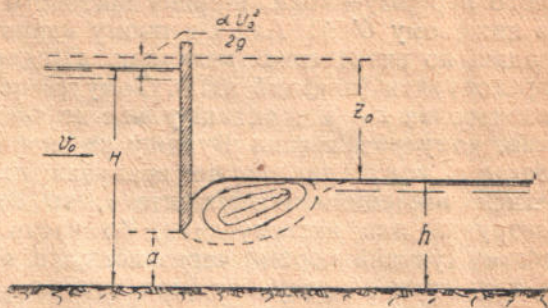


Рис. 1.

Проф., І. І. Леві¹⁾ для розрахунку затоплених отворів при витіканні спід щита²⁾ дає формулу в такому вигляді (рис. 2):

$$Q = \mu b_c h_m \sqrt{2g z'_0}$$

де:

- h_m — відкриття щита;
- $z'_0 = z_0 + a$ — перевищення рівня у верхньому над рівнем нижнього б'єфа в безпосередній близькості до площини щита;
- b_c — ефективна ширина отвору.

Для визначення ж величини a — зниження рівня коло площини щита, порівнюючи з побутовою глибиною у нижньому б'єфі, проф. І. І. Леві дає таку залежність (для прямокутного перерізу при $b = \text{const}$):

$$\frac{2q}{g} \left[\alpha_1 \varphi \sqrt{2g(H_0 - h_2 + a)} - \frac{\alpha_2 q}{h_2} \right] = a(2h_2 - a) \quad (3)$$

Значення нових величин, які входять в рівняння (3), ясні з рис. 2. α_1 і α_2 — коефіцієнти, які враховують нерівномірність розподілу швидкостей в перерізах I—I і II—II.

На основі дослідних даних, одержаних І. І. Леві в 1928 р., він дає значення коефіцієнта витрати $\mu = 0,65 \div 0,68$ для випадку витікання спід щита при затопленому отворі.

¹⁾ Доц. І. І. Леві, Новый метод расчета затопленных сооружений, „Известия НИИГ“, т. VI, 1932.

²⁾ Проф. І. І. Леві, як і інж. А. Ф. Бурков, розглядає витікання спід щита з гострою нижньою кромкою.

В роботах інж. Бундшу (Bundschu¹⁾, інж. Ейнвахтера (J. Einwachter²), Петрковського (J. Pietrkowsky³) при розгляді витікання спід щита висвітлюється і той випадок, коли отвір є затопленим. Найповніше це питання розглядається у Бундшу і для більш загального випадку русла прямокутного перерізу—коли ширина щитового отвору не дорівнює ширині русла в нижньому б'єфі. Але і в цьому найповнішому розгляді дано розв'язання задачі по визначенню величини z'_0 для випадку, коли стиску можна не враховувати (плавний вхід). Тому рівняння, що його дав Бундшу для визначення z'_0 , в практиці у нас не знаходить застосування. Одна з причин, чому розв'язання Бундшу не знайшло практичного застосування, полягає в тому, що він не врахував стиску. Але навіть коли врахувати стиск введенням коефіцієнта ϵ , то запропонована Бундшу залежність незручна для застосування, бо часто приводить до неможливого розв'язку (уявний корінь) через помилки в підрахунках, практично невлітими в технічних розрахунках (при точності до третьої значущої цифри)⁴.

Інж. Ейнвахтер і Петрковський, розглядаючи витікання спід щита, дають для випадку затопленого отвору рівняння для визначення глибини за щитом залежно від глибини в нижньому б'єфі і відкриття щита, чи, точніше, глибини в стиснутому перерізі.

В роботі проф Г. Й. Сухомела і автора⁵) дано розв'язання задачі для визначення величини z'_0 для прямокутного русла при ширині отвору, яка не дорівнює ширині водотоку в нижньому б'єфі. Одержана залежність вигляду:

$$z'_0 = H_0 - \sqrt{h_2^2 - \frac{2\alpha Q^2}{g b} \left(\frac{bh_2 - \epsilon\omega_0}{\epsilon\omega_0 bh_2} \right)} \quad (4)$$

добре погоджується з дослідними даними.

В рівнянні (4):

ϵ — коефіцієнт стиску;

ω_0 — площа отвору.

Значення решти величини ті самі, що і в залежностях (1—3).

Таким чином, в розглянутих роботах зачеплено тільки питання про визначення величини z'_0 , що дає змогу уточнити розрахункову формулу для встановлення пропускної здатності затопленого отвору.

Щождо критерію затоплення отвору, то це питання зовсім не висвітлене у вказаних роботах.

Розгляд питання щодо затоплення отворів при витіканні спід щита тісно зв'язаний з розв'язанням задачі по визначенню форми супрягання б'єфів. Тому в ряді робіт, які стосуються до з'ясування умов супрягання б'єфів, розглядається також питання про затоплення отворів при витіканні спід щита.

Доц. А. І Шварц⁶) розв'язує задачу щодо умов супрягання б'єфів для споруд прямокутного перерізу (в тому числі і для витікання спід щита) при $b = \text{const}$, вводячи як критерій, що визначає ті чи інші умови

¹) Dr. Jng. Bundschu, Das Wasserauflaufen, „Der Bauingenieur“, Н. 27, 1928.

²) Dr. Jng. J. Einwachter, Der Wechselsprung mit gestauter Deckwalze, „Wasserkraft und Wasserwirtschaft“, Н. 17, 1933.

³) J. Pietrkowsky, Beitrag zur Kenntnis des Wechselsprungs, „Die Wasserwirtschaft“, № 25—28, 1932.

⁴) Докладніше про це див., наприклад, Проф. Г. Й. Сухомел і І. В. Журавель, Втрата енергії при витіканні спід щита, Праці Інституту водного господарства, вип. 9, 1937.

⁵) Див. цитовану вище роботу.

⁶) Доц. А. И. Шварц, О новых зависимостях в области расчетов сопряжения бьефов и некоторых их приложениях, „Известия НИИГ“, т. XI, 1934.

руху нижче споруди, граничну одиничну витрату $q_{пр.}$, величина якої дорівнює:

$$q_{пр.} = \sqrt{\frac{g}{\alpha} \left[h_1 t \cdot \frac{h_1 + t}{2} \right]} = f_2(t, T_0) \quad (5)$$

В рівнянні (5):

h_1 — глибина в стиснутому перерізі;

t — глибина (побутова) в нижньому б'єфі;

T_0 — питома енергія перерізу перед спорудою;

α — коефіцієнт, який враховує нерівномірний розподіл швидкостей по перерізу потоку.

При рівності $q_{пр.}$ і q нижче споруди матиме місце критична форма супрягання б'єфів або утворюється стрибок, насунутий над стиснутий переріз.

При $q_{пр.} > q$ супрягання б'єфів з затопленим стрибком; при $q > q_{пр.}$ — в нижньому б'єфі відгін стрибка.

Звідси за допомогою величини $q_{пр.}$ можна встановити ті умови витікання спід щита, при яких рівень з низової сторони не впливатиме на них.

Очевидно, що рівень з низової сторони не впливатиме на умови витікання спід щита в тому випадку, коли $q_{пр.} > q$ (затоплений стрибок) тільки при наявності порога, висота якого більша, ніж глибина в нижньому б'єфі t .

Коли ж глибина $t > p_1$ (рис. 3), то рівень з низової сторони не впливатиме на витікання спід щита тільки при $q \gg q_{пр.}$ (критична форма супрягання б'єфів, або відгін стрибка).

При умові ж, що $q_{пр.} > q$ і $t > p_1$, рівень з низової сторони вже може впливати на умови витікання спід щита. Але врахувати цей вплив за допомогою рівняння (5) немає змоги. Слід, крім того, відзначити, що розв'язання рівняння (5) має і деякі технічні труднощі в практиці розрахунків внаслідок складності залежності.

Складність розрахунку, обмеження сфери застосування (визначення $q_{пр.}$, але без повного розрахунку по визначенню форми супрягання б'єфів, включаючи і розрахунок глибини колодезя і висоти водобійної стінки), відсутність допоміжних таблиць і графіків — всі ці обставини, взяті разом, примушують шукати інших шляхів розв'язання поставленої задачі.

Акад. Н. Н. Павловський¹⁾ до розв'язання задачі щодо критерію затопленості стрибка в нижньому б'єфі в умовах витікання спід щита підійшов інакше.

За вихідну залежність прийнято загальновідоме так зване характеристичне рівняння супрягання б'єфів:

$$\xi_a = \frac{\xi_c}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{8}{\xi_c^3}} - 1 \right] = F(\xi_0), \quad (6)$$

¹⁾ Акад. Н. Н. Павловський, О принципах маневрування затворами плотин для доведення размывов до мінімуму, „Известия НИИГ“, т. XVI, 1935.

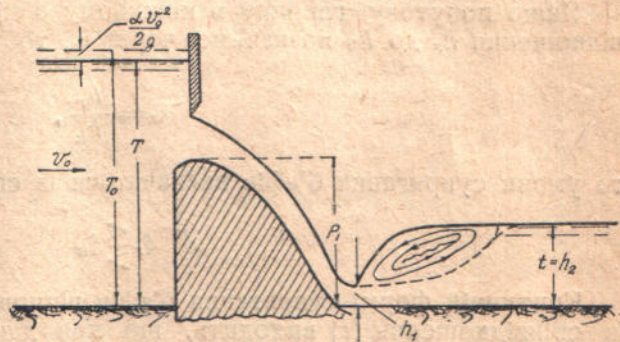


Рис. 3.

або

$$\xi_0 = f(\xi_a),$$

де:

$$\xi_a = \frac{h_a}{h_k};$$

$$\xi_0 = \frac{T_0}{h_k};$$

$$\xi_c = \frac{h_c}{h_k};$$

h_c — глибина в стиснутому перерізі;

h_a — глибина взаємна з h_c .

Решта позначень ясні з попереднього.

Якщо побутову глибину в нижньому б'єфі вважатимемо рівною h_r , а відношення h_r до h_k позначимо через ξ_r , тобто

$$\xi_r = \frac{h_r}{h_k},$$

то умови супрягання б'єфів визначаються із співвідношення:

$$\xi_r \leq \xi_a \tag{7}$$

Критичній формі супрягання б'єфів відповідає рівність величин ξ_r і ξ_a . Із співвідношення (7) виходить, що при даних значеннях T_0 і h_r форма супрягання б'єфів визначається питомою витратою q . Вводячи співвідношення:

$$\frac{\xi_0}{\xi_a} = \frac{T_0 h_k}{h_k h_a} = \frac{T_0}{h_a} = \frac{1}{\xi_a} f(\xi_a) = \psi(\xi_a) \tag{8}$$

для критичної форми супрягання б'єфів рівняння (8) запишемо:

$$\frac{T_0}{h_r} = \psi(\xi_a) \tag{9}$$

Звідси, користуючись кривою графічного розв'язання рівняння (9), легко визначити ξ_a , а далі і $h_k = \frac{h_r}{\xi_a}$, тобто ту величину, за якою далі вже легко визначити і питому витрату q_a , яка відповідає критичній формі супрягання б'єфів при заданих T_0 і h_r .

Таким чином, розв'язання задачі, запропоноване акад. Н. Н. Павловським, є більш загальним теоретично, зручнішим і гнучкішим з практичного погляду. Але й розглядане розв'язання не дає змоги встановити вплив затоплення на умови витікання слід щита в тому випадку, коли $h_r > p_1$ і супрягання б'єфів відбувається з затопленням стрибка нижче споруди.

Проф. А. А. Угінчус¹⁾ додатково до розробленого ним методу розрахунку супрягання б'єфів²⁾ дає і розв'язання задачі по розрахунку гранично

¹⁾ Инж. А. А. Угінчус, Методы гидравлических расчетов для составления схемы маневрирования затворами гидротехнических сооружений при пропуске паводков, „Москва-волгострой“, № 1—2, 1937.

²⁾ Инж. А. А. Угінчус, К вопросу о расчете водобойных колодцев, Известия научно-мелиоративного института, вып. XIX, 1929; також А. А. Угінчус, Гидравлика нижнего бьефа гидротехнических сооружений, ГОНТИ, 1938.

допустимої одиничної витрати (скидного модуля — за термінологією акад. Н. Н. Павловського) і гранично допустимих відкриттів щитів.

Величина гранично допустимої одиничної витрати визначається через h_k .

Щодо значення h_k , то, маючи величину $\frac{z}{H}$ за кривою

$$\frac{z}{H} = f\left(\frac{h_2}{h_k}\right), \quad (10)$$

легко визначити відношення $a = \frac{h_2}{h_k}$, а далі вже і критичну глибину:

$$h_{kp} = \frac{h_2}{a} = \frac{t_2}{a} \quad (11)$$

В залежностях (10) і (11):

h_2 — глибина, взаємна з h_c ;

t_2 — побутова глибина в нижньому б'єфі;

z — різниця рівнів перед і за спорудою;

H — повний напір, або питома енергія перерізу перед спорудою.

Для визначення граничного відкриття h щита проф. Угінчус дає залежність вигляду:

$$\frac{H_{щ}}{h_k \sqrt[3]{\frac{1}{\mu^2}}} = \frac{1}{\sqrt[3]{2 \frac{h^2}{H^2_{щ}} - \frac{h^3}{H^3_{щ}}}}$$

або

$$\beta \frac{H_{щ}}{h_k} = f\left(\frac{h}{H_{щ}}\right), \quad (12)$$

де

$$\beta = \frac{1}{\sqrt[3]{\frac{1}{\mu^2}}}$$

$H_{щ}$ — глибина перед щитом (напір над порогом).

Розв'язуючи рівняння (12), можна встановити висоту відкриття щита.

Дуже цікаві зауваження інж. Угінчуса щодо підтоплення отворів з низової сторони. Рівність $h_2 = t_2$ відповідає критичній формі супрягання б'єфів. Коли ж $t_2 > h_2$, то отвір працюватиме як затоплений (при висоті порога $p_1 = 0$), і рівень з низової сторони вже впливатиме на умови витікання. При сталому H з підтопленням отвору витрата зменшується, що може спричинити з'явлення відігнутого стрибка. Звідси, підтоплення з боку нижнього б'єфу може спричинити неусталений рух чи, інакше, форма супрягання б'єфів буде періодично змінюватись (критична форма, затоплений і відігнаний стрибок). Зауваження щодо розгляданого способу розрахунку критерію затопленості стрибка в нижньому б'єфі будуть ті самі, що й до розв'язання, запропонованих акад. Н. Н. Павловським і доц. А. І. Шварц. Слід тільки додатково відзначити, що інж. Угінчус розрахункову формулу для затопленого отвору дає в такому вигляді (вважаючи значення μ рівним коефіцієнту витрати при незатопленому отворі):

$$q = \mu h \sqrt{2gz_0} = \mu h \sqrt{2g(H - t_2)}, \quad (13)$$

що, безперечно, є помилкою. Безпосередньо за щитом спостерігається значне зниження рівня навіть при великих ступенях затоплення; тому у величині z_0 треба врахувати і це зниження за щитом.

Необхідно, нарешті, відзначити і ту обставину, що в розглянутих розв'язаннях прийнято загальне припущення — рівень вище споруди має сталу позначку. Таке припущення звужує до певної міри сферу застосування запропонованих розв'язань, примушує шукати методів розрахунку і для тих випадків, коли рівень вище споруди, як і в нижньому б'єфі, змінюється в зв'язку з зміною витрати.

Розгляд питання почнемо з з'ясування тих умов протікання рідини через щитовий отвір, при яких рівень у нижньому б'єфі почне впливати на витікання спід щита, тобто з'ясування критерію затопленості отвору. Обмежимося надалі розв'язанням поставленої задачі для двох випадків витікання спід щита у прямокутному руслі: а) при відсутності порога (рис. 4) і б) коли щит установлений на порозі (рис. 5).

§ 2. Витікання спід щита без порога

При вільному витіканні спід щита, встановленого без порога (рис. 4), величина витрати при заданому відкритті і ширині щитового отвору b визначається рівнянням:

$$Q = \mu \cdot ba \sqrt{2g(H_0 - \varepsilon a)} \quad (14)$$

Залежність (14) легко одержати з рівності величини питомої енергії перерізів $I-I$ і $c-c$ (рис. 4). Ясно, що при відгоні стрибка, який би малий не був відгін, рівень з низової сторони не впливатиме на умови витікання спід щита, бо при цьому безпосередньо за щитом встановлюється глибина $h_c = \varepsilon a$. Граничне положення стрибка, при якому рівень з низової сторони не впливатиме на умови витікання спід щита, відповідає критичній формі супрягання б'єфів (стрибок утворюється над стиснутим перерізом). Дальше збільшення глибини в нижньому б'єфі спричиняє затоплення стрибка. Якщо при цьому зберігається сталість витрати, то напір перед щитом почне збільшуватись. І, навпаки, при зберіганні постійної глибини перед щитом витрата через щитовий отвір буде зменшуватись.

Для визначення залежності, яка дозволяє розрахунком встановити те граничне положення стрибка нижче щита, при якому можна ще розглядати витікання з щитового отвору як вільне, скористуємося законом кількостей руху.

Вихідне рівняння для прямокутного русла при цьому, для випадку, коли $b \neq B$, але струмина за щитом при глибині h заповнює переріз водотоку по ширині B , запишемо (рис. 4):

$$\frac{\alpha_1 \omega v^2 \gamma}{g} - \frac{\alpha_2 v^2 c \omega_c \gamma}{g} = \frac{h^2 c b \gamma}{2} - \frac{h^2 B \gamma}{2} + \frac{h^2 c}{2} (B - b) \gamma, \quad (15')$$

або, після скорочень і заміни швидкостей через витрату Q і площі живих перерізів (вважаючи $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$):

$$\frac{2\alpha Q^2}{g} \left(\frac{1}{\omega} - \frac{1}{\omega_c} \right) = B(h^2 c - h^2) \quad (15)$$

В рівнянні (15') $\frac{h^2 c}{2} (B - b) \gamma$ — проекція горизонтальної складової тиску в напрямі осі потоку на стінки $A-A_1$ (рис. 4а). При рівності B і b останній член в залежності (15') перетворюється на нуль.

Вважаючи, що $B = b$, рівняння (15) запишемо:

$$\frac{2\alpha Q^2}{gB^2} \left(\frac{h_c - h}{hh_c} \right) = h_c^2 - h^2 \quad (16)^1$$

Хід розв'язання залежності (16) в кожному окремому випадку залежить від поставлення задачі. З практичної точки зору найбільший інтерес має розв'язання таких задач:

1. Визначення відкриття a щита (глибини h_c в стиснутому перерізі) при заданих величинах Q , H_0 і h .
2. Визначення глибини в нижньому б'єфі h при заданих Q , H_0 і h_c .

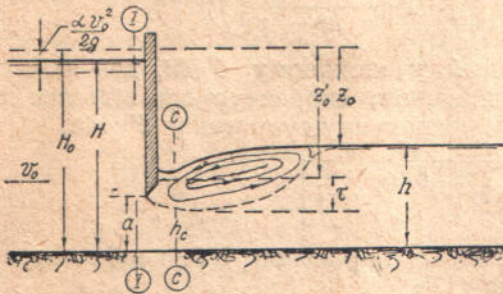


Рис. 4.

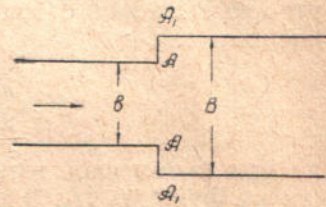


Рис. 4а.

3. Визначення напору H_0 перед щитом при заданих величинах Q , h і відкритті щита a (або h_c).
4. Визначення витрати через щитовий отвір при відомих H_0 , a і h .

Така схема розв'язання залежності (16) при заданому значенні b . Дуже часто при розгляді питання про супрягання б'єфів можливе і таке поставлення задачі—визначити ширину отвору b (при паралельній роботі кількох щитів), якій відповідає критична форма супрягання б'єфів при заданих Q , H_0 і h .

З поставлених задач найпростіше розв'язується питання про визначення величини витрати Q :

$$Q = \varphi b a \sqrt{2g(H_0 - h_c)} = \varphi h b c \sqrt{2gz'_0} \quad (17)$$

Звідси ж легко визначити і величину напору H_0 перед щитом, розв'язавши рівняння (17) щодо H_0 .

Трохи складніше розв'язання задачі по визначенню h_c і h .

Для визначення глибини h_c в стиснутому перерізі (чи відкриття щита a) скористуємось рівнянням (17), замінивши h_c її виразом, як глибини взаємної з побутовою глибиною в нижньому б'єфі.

Для прямокутного русла при критичній формі супрягання б'єфів маємо:

$$h_c = \frac{h}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{8h^3_k}{h^3}} - 1 \right] \quad (18)$$

Підставляючи значення h_c за залежністю (18), з рівняння (17) одержимо:

$$Q = \varphi b h c \sqrt{2g \left[H_0 - \frac{h}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{8h^3_k}{h^3}} - 1 \right) \right]}$$

¹⁾ Залежність (16) є не що інше, як рівняння взаємних глибин у стрибку.

Звідки глибина в стиснутому перерізі:

$$h_c = \frac{Q}{\varphi b \sqrt{2g \left[H_0 - \frac{h}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{8h^3_k}{h^3}} - 1 \right) \right]}} \quad (19)$$

Вводячи в розрахунок одиничну витрату $q = \frac{Q}{b}$, рівняння (19) можемо переписати:

$$h_c = \frac{q}{\varphi \sqrt{2g \left[H_0 - \frac{h}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{8h^3_k}{h^3}} - 1 \right) \right]}} \quad (20)$$

Для визначення глибини h у нижньому б'єфі, при якій стрибок утворюється над стиснутим перерізом, скористуємось відомим співвідношенням для розв'язання задачі розрахунку супрягання б'єфів:

$$h = \frac{h_c}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{8h^3_k}{h^3_c}} - 1 \right] \quad (21)$$

Але при цьому слід пам'ятати, що h_c в рівнянні (21) необхідно представити як функцію H_0 . З рівняння (17):

$$\frac{Q}{2g\varphi^2 b^2} = h^2_c (H_0 - h_c) \quad (22)$$

Таким чином, відшукування величин h_c чи h , які відповідають критичній формі супрягання б'єфів (рівень з низової сторони не впливає на умови витікання спід щита), становить певні технічні труднощі, тому що аналітичне розв'язання рівнянь виходить досить складне.

Раніше ніж перейти до розгляду можливих спрощень при розв'язанні поставленої задачі, відзначимо, що критерії незатопленості щитового отвору безпосередньо впливають з самого визначення, про яке вже згадувалось.

На витікання спід щита рівень з низової сторони не впливатиме при наявності одної з таких умов:

1. Глибина в стиснутому перерізі $h_c = \varepsilon a$ (відкриття a щита) більше (або дорівнює) глибини h_{c0} , яка визначається за рівняннями (19) чи (20).

2. Дійсна побутова глибина h в нижньому б'єфі менше (або дорівнює) глибині h_0 за залежністю (21).

3. Витрата водотоку Q більше (або дорівнює) величини Q_0 за рівнянням (17).

4. Повний напір H_0 перед щитом більше (або дорівнює) напору H_{01} , який визначається тією ж залежністю (17).

Але коли кожна з нерівностей (чи рівностей):

$$h_c > h_{c0}$$

$$h < h_0$$

$$Q > Q_0$$

$$H_0 > H_{01}$$

відповідає тому випадкові витікання спід щита без порога, при якому рівень у нижньому б'єфі не впливає на умови протікання в отворі, то при супротивних знаках нерівності отвір уже працюватиме як затоплений,

тобто глибина в нижньому б'єфі буде впливати на умови витікання спідшта. У цьому випадку для визначення витрати в розрахункову формулу (17) необхідно вводити z'_0 , яке визначається за залежністю (4), де z'_0 виражене через Q .

Для спрощення розрахунків по визначенню затопленості отвору можна, очевидно, застосувати графічні способи розв'язання одержаних залежностей.

Вважаємо доцільним використати наявні вже розв'язання з деякими, можливо, доповненнями. Найзручнішим, як здається, для цієї мети є спосіб акад. Н. Н. Павловського¹⁾ і проф. М. Д. Чертоусова²⁾, які до того ж мають і найбільше поширення в практиці.

З рівняння (22), після ділення правої і лівої його частин на h^3_k , маємо:

$$1 = 2\varphi^2 \frac{h^2_c}{h^2_k} \left(\frac{E_0}{h_k} - \frac{h_c}{h_k} \right)$$

або

$$1 = 2\varphi^2 \eta^2_c (\eta_E - \eta_c), \quad (23)$$

де

$$\eta_c = \frac{h_c}{h_k};$$

$$\eta_E = \frac{E_0}{h_k} = \frac{H_0}{h_k}.$$

З рівняння (23) видно, що

$$\eta_c = f(\eta_E) \quad (24)$$

Крім того, за залежністю (21), взявши на увагу, що

$$h = E_0 - z_0,$$

маємо:

$$E_0 - z_0 = \frac{h_c}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{8h^3_k}{h^3_c}} - 1 \right], \quad (25)$$

що після ділення на h_k запишемо:

$$(\eta_z)_0 = \eta_E - \frac{\eta_c}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{8}{\eta^3_c}} - 1 \right] = f(\eta_E, \eta_c) = F(\eta_E) \quad (26)$$

В залежності (26) величина $(\eta_z)_0$, яка відповідає критичній формі су-прягання б'єфів, визначається як функція заданої величини

$$\eta_E = \frac{E_0}{h_k}$$

Побудувавши графік

$$(\eta_z)_0 = F(\eta_E)$$

за рівнянням (26), можемо розв'язувати задачі таких типів:

¹⁾ Див. цитовану вище роботу акад. Н. Н. Павловського і його ж Гидравлический справочник, ОНТИ, 1937.

²⁾ Инж. М. Д. Чертоусов, О сопряжении бьефов и о расчете водобойных колодцев, „Известия НИИГ“, т. XIII, 1934; його ж, Специальный курс гидравлики, ОНТИ, 1937.

1. За заданими Q , E_0 і h визначити форму супрягання б'єфів, отже, і умови витікання спід щита (затоплений отвір чи незатоплений).

2. При тих же заданих величинах визначити глибину колодязя, при якій устанеться критична форма супрягання б'єфів (чи затоплений стрибок).

На інші питання рівняння (26) відповіді не дає, зокрема за рівнянням (26), точніше — графічним його розв'язанням у вигляді

$$(\eta_2)_0 = F(\eta_E),$$

не можна відразу визначити величину h_c , h і Q .

Щоб спростити розв'язання задачі по визначенню глибини в нижньому б'єфі, при якій утворюється насунутий стрибок (стрибок над стиснутим перерізом), представимо вихідні рівняння в трохи іншому вигляді.

З рівняння (25), після заміни $E_0 - z_0$ його значенням h , або безпосередньо з рівняння (21) маємо:

$$h = \frac{h_c}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{8h_k^3}{h_c^3}} - 1 \right] \quad (27)$$

Останню залежність, після ділення правої і лівої частини її на h_k , запишемо:

$$\eta_0 = \frac{\eta_c}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{8}{\eta_c^3}} - 1 \right] = f(\eta_c) = F_1(\eta_E), \quad (28)$$

де: η_0 — відносна глибина, яка відповідає критичній формі супрягання б'єфів. Залежність (28) і дає можливість відразу при заданих E_0 і h_k визначити η_0 , а далі і побутову глибину $h_0 = \eta_0 h_k$, при якій стрибок утворюється над стиснутим перерізом, а рівень з низової сторони ще не впливатиме на витікання спід щита.

Щодо визначення глибини h_c в стиснутому перерізі чи висоти відкриття щита, а також встановлення величини витрати Q , то спрощене графічне розв'язання поставлених задач можна одержати деякими перетвореннями того ж вихідного рівняння (22).

Введемо позначення:

$$\frac{h_k}{E_0} = \zeta_k$$

$$\frac{h_c}{E_0} = \zeta_c$$

Після ділення рівняння (22) на E_0^3 запишемо його:

$$\zeta_k^3 = 2\varphi^2 \zeta_c^2 (1 - \zeta_c), \quad (29)$$

звідки

$$\zeta_c = f_1(\zeta_k), \quad (30)$$

Критична форма супрягання б'єфів, після ділення правої і лівої частин залежності (25) на E_0 , визначається за рівнянням:

$$(\zeta_2)_0 = 1 - \frac{\zeta_c}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{8\zeta_k^3}{\zeta_c^3}} - 1 \right] = f_2(\zeta_c, \zeta_k) = F(\zeta_k) \quad (31)$$

Розв'язуючи рівняння (29) щодо ζ_k , можемо написати таку залежність:

$$\zeta_k = f(\zeta_c) \quad (32)$$

Тоді рівняння (31) представимо у вигляді:

$$(\zeta_z)_0 = f_3(\zeta_c, \zeta_k) = F(\zeta_c) \quad (33)$$

Величина $(\zeta_z)_0$, яка визначається за рівняннями (31) і (33), відповідає критичній формі супрягання б'єфів. Витікання спід щита в цьому випадку відбуватиметься як через незатоплений отвір.

Побудувавши графіки функціонального зв'язку між розрахунковими величинами за рівняннями (31) і (33), можемо за ними розв'язувати такі задачі:

1. Визначати величину h_k для обчислення одиначної скидної витрати при заданих E_0 і h .

2. Визначати висоту відкриття щита при тих же заданих величинах, що і в першій задачі.

3. Якщо задані величини E_0 , а також q або відкриття щита, то можна визначити величину z_0 , а далі вже і глибину h_0 .

Крім того, що глибину h_0 можна визначити за рівнянням (28) при відомих величинах E_0 і Q , дуже часто можливе і таке поставлення задачі, при якому глибину h_0 в нижньому б'єфі необхідно встановити при заданому відкритті a щита (чи глибині h_c в стиснутому перерізі) і E_0 . Зрозуміло, що і при такому поставленні задачі будемо визначати глибину h_0 в нижньому б'єфі, при якій стрибок утворюється над стиснутим перерізом. Дуже часто в практиці можливе і таке поставлення задачі, коли необхідно визначити глибину h_0 при заданих E_0 і q .

З рівняння (25), після ділення на E_0 , також матимемо:

$$\zeta_0 = \frac{\zeta_c}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{8\zeta_k^3}{\zeta_c^3}} - 1 \right] = f(\zeta_c, \zeta_k) = F_1(\zeta_k) = F_1(\zeta_c), \quad (34)$$

де

$$\zeta_0 = \frac{h_0}{E_0}$$

— відносна глибина, при якій в нижньому б'єфі утворюється насунутий стрибок.

Побудувавши криві (графіки I—VI):

$(\eta_z)_0 = F(\eta_E)$	за рівнянням (26) — графік I
$\eta_0 = F_1(\eta_E)$	за рівнянням (28) — графік II
$(\zeta_z)_0 = F(\zeta_k)$	за рівнянням (31) — графік III
$(\zeta_z)_0 = F(\zeta_c)$	за рівнянням (33) — графік IV
$\zeta_0 = F_1(\zeta_c)$	за рівнянням (34) — графік V
$\zeta_0 = F_1(\zeta_k)$	за рівнянням (34) — графік VI,

можемо користуватись ними для розв'язання сформульованих вище задач.

Так, при відомих h , Q і висоті відкриття щита a (або величині E_0) можемо встановити, користуючись кривою

$$(\eta_z)_0 = F(\eta_E),$$

умови руху в нижньому б'єфі. Порядок розрахунку при цьому можна, очевидно дати в такому вигляді:

$$1. z_0 = E_0 - h$$

$$2. \eta_z = \frac{z_0}{h_k}$$

$$3. \eta_E = \frac{E_0}{h_k}$$

$$4. (\eta_z)_0 = F(\eta_E) \quad \text{за кривою (графік I).}$$

При $(\eta_z)_0 < \eta_z$ — стрибок відігнаний.

При $(\eta_z)_0 = \eta_z$ — критична форма супрягання б'єфів.

Як у першому, так і в другому випадку рівень з низової сторони не впливає на умови витікання спід щита.

При

$$(\eta_z)_0 > \eta_z$$

стрибок затоплений і рівень у нижньому б'єфі вже впливає на витікання з щитового отвору. Для того, щоб у випадку відгону стрибка, при заданих вихідних умовах, добитись критичної форми супрягання б'єфів, необхідно, очевидно, створити великі побутові глибини за щитом шляхом влаштування або водобійного колодезя, або водобійної стінки.

У першому випадку глибина колодезя d_1 визначиться співвідношенням:

$$d_1 = h_k \eta_{E_1} - E_0, \quad (35)$$

де

$$\eta_{E_1} = \frac{E_0 + d_1}{h_k},$$

величину якої знаходимо за значенням

$$(\eta_z)'_0 = \eta_z,$$

тому що і z_0 і h_k лишаються сталими.

При гашенні енергії за допомогою водобійної стінки висоту її c_1 знайдемо з рівняння:

$$c_1 = E_0 - H_c - (\eta_z)_0 h_k, \quad (36)$$

тому що при

$$E_0 = \text{const}$$

і величина

$$(\eta_z)_0 = \text{const};$$

зведений же перепад змінюється до значення

$$z'_0 = E_0 - H_c - c_1.$$

При заданих величинах E_0 і Q , користуючись графіком

$$\eta_0 = F_1(\eta_E),$$

можна визначати глибину h_0 в нижньому б'єфі, яка відповідає критичній формі супрягання б'єфів. Розрахунок при цих умовах можна провадити в такій послідовності:

1. $\eta_E = \frac{E_0}{h_k}$
2. $\eta_0 = F(\eta_E)$ за графіком II
3. $h_0 = \eta_0 h_k$

Очевидно, що: при $h < h_0$ — в нижньому б'єфі відгін стрибка; при $h = h_0$ — критична форма супрягання б'єфів.

Рівень нижнього б'єфу при $h \leq h_0$ не впливає на умови витікання спід щита.

При $h > h_0$ — в нижньому б'єфі затоплений стрибок, і рівень з низової сторони вже впливає на умови витікання спід щита.

Зрозуміло, що користуючись тим же графіком

$$\eta_0 = F_1(\eta_E),$$

можна визначати і величину E_0 — питому енергію перерізу перед щитом (якщо вона взагалі може змінюватись), отже, і відкриття щита α , при якому встановиться якась певна форма супрягання б'єфів при відомих Q і h .

Визначити висоту відкриття щита і величину скидної одиничної витрати (гранично припустимої), яка забезпечує критичну форму супрягання б'єфів, найзручніше і найпростіше, користуючись рівнянням (31) або графічним його розв'язанням:

$$(\zeta_z)_0 = F_1(\zeta_k),$$

Заданими величинами вважатимемо сумарну скидну витрату Q , глибину h в нижньому б'єфі і величину E_0 .

Схема розрахунку може бути прийнята така:

1. $z_0 = E_0 - h$
2. $\zeta_z = \frac{z_0}{E_0}$
3. $(\zeta_k)_0 = F_1(\zeta_z)$ за кривою $(\zeta_z)_0 = F(\zeta_k)$ — графік III
4. $h_k = (\zeta_k)_0 E_0$

За відомою глибиною h_k можна вже встановити і питому гранично допустиму витрату q_0

$$q_0 = \sqrt{\frac{h_k^3 g}{\alpha}} \quad (37)$$

при $\alpha = 1,1$:

$$q_0 = 2,986 \sqrt{h_k^3};$$

при $\alpha = 1,0$:

$$q_0 = 3,132 \sqrt{h_k^3}$$

При заданій величині витрати Q можна встановити і дійсну питому витрату

$$q_1 = \frac{Q}{b}.$$



Очевидно, що при $q_1 > q_0$ — в нижньому б'єфі відгін стрибка; при $q_1 = q_0$ — критична форма супрягання б'єфів. І при $q_1 > q_0$, і при $q_1 = q_0$ рівень з низової сторони не впливає на умови витікання спід щита. Тільки при

$$q_0 > q_1,$$

коли в нижньому б'єфі встановлюється затоплений стрибок, рівень з низової сторони буде впливати на витікання через щитовий отвір.

Зрозуміло, що розв'язання рівняння (31) дає також відповідь на питання, яка повинна бути довжина зливного фронту l , при якій у нижньому б'єфі стрибок утворюється над стиснутим перерізом при заданих E_0 , Q і h .

Очевидно, довжина зливного фронту може бути виражена залежністю:

$$l = \frac{Q}{q_0} \quad (38)$$

За тим же рівнянням (31) можна також установити і глибину в нижньому б'єфі, яка відповідає критичній формі супрягання б'єфів при заданих E_0 , Q і l . Розрахунок при цьому буде зведений до послідовного визначення таких величин:

1. $\zeta_k = \frac{h_k}{E_0}$
2. $(\zeta_z)_0 = F(\zeta_k)$ за кривою [графік (III)]
3. $z_0 = (\zeta_z)_0 E_0$
4. $h_0 = E_0 - z_0$

Природно, що за відомою величиною E_0 , q і h можна визначити і висоту відкриття щита a_0 шляхом порівнюючи нескладних обчислень.

Простіше можна визначити висоту відкриття щита, якщо скористуватися графіком розв'язання рівняння (33), а саме

$$(\zeta_z)_0 = F(\zeta_c).$$

При заданих E_0 , Q і h розрахунок по визначенню висоти відкриття щитів можна провадити в такому порядку:

1. $z_0 = E_0 - h$
2. $\zeta_z = \frac{z_0}{E_0}$
3. $(\zeta_c)_0 = f(\zeta_z)$ за графіком $(\zeta_z)_0 = F(\zeta_c)$
4. $h_c = (\zeta_c)_0 \cdot E_0$
5. $a_0 = \frac{h_c}{\varepsilon}$, де ε — коефіцієнт стиску струмнини.

За висотою відкриття щита можна також з'ясувати умови руху нижче щита. При дійсному відкритті щита $a > a_0$ — нижче щита відгін стрибка; при $a = a_0$ — критична форма супрягання б'єфів. Як у першому, так

і в другому випадку рівень з низової сторони не впливає на умови витікання спід щита. Тільки при $a < a_0$, коли за щитом утворюється затоплений стрибок, рівень з низової сторони впливатиме на умови витікання спід щита.

Щоб за висотою відкриття щита визначити питому витрату q_0 , необхідно скористуватись графіком розв'язання рівняння (31), тобто кривою

$$(\zeta_z)_0 = F(\zeta_k),$$

тому що при заданих E_0 і h величина $(\zeta_z)_0$ і в першому, і в другому випадку лишається незмінною. Розв'язання рівняння (31) при заданих h_c і E_0 дає змогу визначити глибину h в нижньому б'єфі через знаходження z_0 .

Глибину в нижньому б'єфі, при якій положення рівня з низової сторони не впливатиме на умови витікання спід щита, можна також за заданою величиною h_c і E_0 визначити за рівнянням (34). Це ж рівняння дає змогу визначити і величину q_0 при тих же вихідних умовах.

У першому випадку розрахунок сходиться до знаходження:

1. $\zeta_c = \frac{h_c}{E_0}$
2. $\zeta_0 = F_1(\zeta_c)$ за графіком $\zeta_0 = F_1(\zeta_c)$
3. $h_0 = \zeta_0 E_0$

Якщо необхідно встановити q_0 , то порядок розрахунку відповідно буде:

1. $\zeta = \frac{h}{E_0}$
2. $(\zeta_k)_0 = F(\zeta)$ за графіком $\zeta_0 = F_1(\zeta_k)$
3. $h_k = (\zeta_k)_0 E_0$
4. $q_0 = \sqrt{\frac{h_k^3 g}{\alpha}}$

За заданими q і h , а також E_0 , користуючись тими ж графіками, легко встановити відкриття щита. Умови руху нижче щита, як з'ясовано вже раніше, визначаються співвідношенням між h і h_0 або між q_0 і q .

Таким чином, наведені рівняння дають змогу з'ясувати умови руху в нижньому б'єфі, отже, і розв'язати питання, чи впливатиме рівень з низової сторони на витікання спід щита, чи ні при всяких заданих вихідних умовах. При тих же умовах можна розв'язати задачу по складанню схеми маневрування щитами. Але оскільки висвітлення цього питання не має прямого відношення до теми, викладу розрахунків по маневруванню щитами ми тут не наводимо.

При затопленому отворі (завдяки підвищенню рівня з низової сторони) буде або зменшуватись витрата (при сталому відкритті щита і напорі H_0), або при сталому q (і незмінному відкритті щита) буде збільшуватись напір H_0 . Якщо в першому випадку зменшення витрати спричиняється до зниження побутового рівня нижче щита, то в другому випадку величина h , як побутова глибина в нижньому б'єфі, лишається сталою.

Нагадаємо, що при критичній формі супрягання б'єфів і $h_c = \text{const.}$ за рівнянням (17) напір H_0 , а для затопленого щитового отвору величина z_0 змінюються пропорціонально квадрату витрати; висота ж втрат у стрибку за щитом змінюється за залежністю:

$$h_w = \frac{(h - h_c)^3}{4hh_c}$$

Звідси при сталих величинах відкриття щита a і витраті q збільшення напору перед щитом може бути спричинене тільки збільшенням ступеня затоплення.

З другого боку, при незмінному рівні перед щитом і відкритті його, підтоплення з низової сторони приводить до зменшення витрати Q . Зменшення витрати спричиняє також і зниження глибини h у нижньому б'єфі. При сталому відкритті щита з зменшенням глибини h кількість розсіюваної енергії в стрибку теж зменшується. Але оскільки при цьому зменшення висоти енергії h_w , яка розсіюється в стрибку, відбувається більш інтенсивно, ніж зменшення глибини h , то нижче щита після переходу через критичну форму супрягання б'єфів при зниженні рівня з'явиться відгін стрибка. Щоб запобігти відгону стрибка, необхідно, очевидно, при заданій сумарній витраті Q і сталому напорі H_0 збільшити фронт скиду, щоб при зменшенні питомої витрати сумарний скид, отже, і глибина h в нижньому б'єфі лишались сталими.

З рівняння стрибкової функції ясно видно, що при заданому значенні h_c взаємна з нею глибина зменшується з зменшенням питомої витрати q . Величину скидного фронту при цьому легко визначити за залежністю (38), якщо відома витрата Q . Щодо витрати q_0 , то остання, як уже відзначалось, визначається через h_k . Отже, є змога визначити вже і глибину безпосередньо за щитом в умовах певного (заданого чи прийнятого) затоплення.

Вводячи в рівняння (15') при припущенні, що тиск у перерізі $c-c$ в умовах певного затоплення змінюється за законом гідростатики, замість величини h_c глибину за щитом $h_c + \tau$ (рис. 4) у виразі тиску і проекції на стінки $A-A_1$ горизонтальної складової в напрямі осі потоку, одержимо після перетворень і скорочень:

$$\frac{2\alpha Q^2}{gB} \left(\frac{1}{\omega} - \frac{1}{\omega_c} \right) = (\tau + h_c)^2 - h^2, \quad (39)$$

звідки:

$$\tau + h_c = \sqrt{h^2 + \frac{2\alpha Q^2}{gB} \left(\frac{1}{\omega} - \frac{1}{\omega_c} \right)} \quad (40)$$

або при рівності ширини отвору і водотоку нижче щита:

$$\tau + h_c = \sqrt{h^2 + \frac{2\alpha q^2}{g} \left(\frac{1}{h} - \frac{1}{h_c} \right)} \quad (41)$$

Якщо у правій частині рівняння (41) одержується уявний корінь, то це показує, що затоплення немає і відбувається вільне витікання спід щита. Можна також, користуючись тим же рівнянням (39) як вихідним, визначити і витрату Q при заданих глибинах h , h_c і певному затопленні, яке характеризується висотою $\tau + h_c$ за щитом, більшою за h_c . Навряд чи слід давати графіки розв'язання рівняння (41), бо воно просто розв'язується і аналітично.

§ 3. Витікання спід щита з порогом

Розглядаючи витікання спід щита, встановленого над порогом, до розв'язання задачі по з'ясуванню умов затопленості можна підійти так само,

як і для випадку встановлення щита без порога. При побутовій глибині h в нижньому б'єфі меншій, ніж висота p , порога, незалежно від того, який буде стрибок у нижньому б'єфі — відігнаний чи затоплений, рівень нижче щита не впливатиме на умови витікання і, отже, отвір необхідно розглядати як незатоплений¹⁾.

Коли глибина h_1 в нижньому б'єфі, у безпосередній близькості до площини щита, встановлюється вище порога, то, очевидно, в цьому випадку рівень з низової сторони починає впливати на умови витікання з отвору.

При дослідженні витікання спід щита з порогом необхідно відрізнити два моменти затоплення; початок затоплення струмини або, точніше, початок утворення вальця над струминою, хоч би у вигляді окремих гребенів на струмині, на ділянці підйому її, і початок затоплення отвору, яке виявляється у збільшенні напору перед щитом при сталих витраті Q і висоті отвору. Така картина руху струмини при витіканні з отвору спостерігалась у дослідах, проведених інж. Рельтовим²⁾. При цьому слід

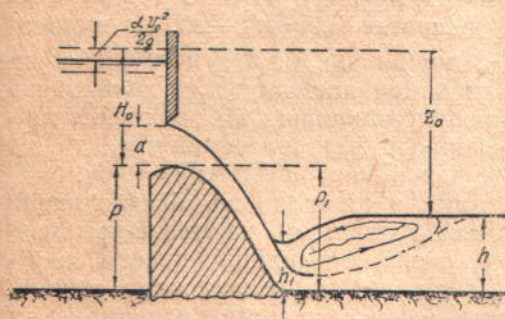


Рис. 5.

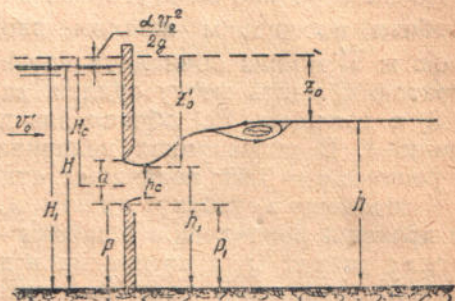


Рис. 6.

відзначити, що в дослідах зафіксоване значне відставання у збільшенні напору порівнюючи з перевищенням рівня з низової сторони над порогом отвору в усіх без винятку дослідах до того часу, поки струмина не затоплена. З затопленням струмини (над струминою починається утворення вальця), навпаки, напір перед щитом збільшується більш інтенсивно, ніж глибина в нижньому б'єфі.

Умови руху рідини в нижньому б'єфі при витіканні спід щита з порогом можна розглядати як стрибок з донним вальцем в тому випадку, коли рівень з низової сторони досягає позначки порога (рис. 5). Струмина, що витікає з отвору, утвореного порогом і нижньою кромкою щита, під впливом тиску рідини з боку нижнього б'єфу відхиляється спочатку вгору, а далі падає, занурюючись у рідину. Оскільки в стиснутому перерізі відхилення від паралельності струмин невелике, то можна прийняти розподіл тиску за законом гідростатики. Припустивши далі, що і під струминою розподіл тиску відбувається за законом гідростатики, для встановлення зв'язку між глибинами: h (у нижньому б'єфі) і h_1 (безпосередньо за щитом)

¹⁾ Тут розглядаємо той випадок, коли до простору між витікаючою струминою і стінкою порога є вільний доступ повітря (рис. 7).

²⁾ Инж. В. Ф. Рельтов, К вопросу об истечении через полузатопленное отверстие в тонкой стенке, „Известия НМИ“, вып. XX, 1930.

можемо застосувати закон кількостей руху. Для русла прямокутного перерізу з сталою шириною b при цьому одержимо (рис. 6):

$$\frac{\alpha_1 v^3 h \gamma}{g} - \frac{\alpha_2 v_c^2 h_c \gamma}{g} = \frac{h_1^2 \gamma}{2} - \frac{h^2 \gamma}{2}, \quad (42)$$

або після перетворень (при $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$):

$$h_1 = \sqrt{h^2 - \frac{2\alpha q^2}{g} \left(\frac{h - h_c}{hh_c} \right)} \quad (43)$$

На умови витікання спід щита з порогом впливає глибина h_1 , яку і необхідно визначити. Слід при цьому відмітити, що коли над струминою коло щита утворюється і поверхневий валець, то у величину h_1 входить також і товщина його τ при припущенні, що тиск у вальці підлягає закону гідростатики. Для перевірки рівняння (43) скористуємось дослідними даними інж. Б. Ф. Рельтова¹⁾. Але через відсутність вимірних глибин h_1 безпосередньо за щитом за дослідними даними, перевірку доводиться робити посереднім шляхом, вводючи величину $z'_0 = H_1 - h_1$. За величиною ж z'_0 можна обчислити витрату Q_1 , порівняння якої з вимірною витратою Q дасть змогу судити, наскільки добре погоджується залежність (43) з дослідом. Всі обчислення по перевірці рівняння (43) зводимо в таблицю 1. В розрахунках величина коефіцієнта витрати прийнята сталою і рівною: $\mu = 0,65$; коефіцієнт стиску теж прийнято сталим: $\epsilon = 0,65$.

Наведені в таблиці дані підтверджують можливість застосування в практиці розрахунків рівняння (43). Розходження між величинами обчислених витрат Q_1 і вимірних в досліді Q слід, очевидно, віднести за рахунок відхилень у розподілі тиску в потоці від гідростатичного закону, які спричиняються завихореннями, викривленнями струмин, захопленням повітря та іншими факторами, вплив яких не піддається врахуванню. Дослідні дані теж підтверджують помилковість твердження, що для затоплених отворів збільшується коефіцієнт витрати. При розрахунку затоплених отворів у дійсності має місце не збільшення коефіцієнта витрати, а зміна напору, і саме збільшення його до значення:

$$z'_0 > H_1 - h,$$

де H_1 — глибина перед щитом, виправлена на висоту швидкості підходу (повний напір).

Дійсний напір для затоплених отворів дорівнює різниці z'_0 рівнів до і після стінки, в якій є отвір, з урахуванням зниження рівня коло стінки порівнюючи з побутовою глибиною h в нижньому б'єфі. Врахування цього зниження і можна провадити з достатньою точністю за рівнянням (43).

З урахуванням зниження рівня нижче щита порівнюючи з побутовою глибиною h змінюється і звичайний критерій затопленості отвору при витіканні спід щита з порогом. Звичайно прийнято вважати такий отвір затопленим в тому випадку, коли побутова глибина h більше висоти порога p_1 . В дійсності це далеко не так. В дійсності отвір слід розглядати як затоплений тільки тоді, коли глибина h_1 більше p_1 . Останнє положення нібито не погоджується з дослідними даними. Коливання рівня перед щитом (величини напору, під яким відбувається витікання) спостерігається не тільки в тому випадку, коли $h_1 > p_1$, але й при глибинах h_1 , менших,

¹⁾ Див. цитовану вище роботу інж. Б. Ф. Рельтова.

ніж величина p_1 , і навіть при побутових глибинах h , менших, ніж висота порога p_1 . І все такі спостережані коливання напору (рівня перед щитом) при значеннях $h_1 < p_1$ немає підстав розглядати як вплив підтоплення отвору з низової сторони. Коливання напору перед щитом, як уже відзначалось, спостерігаються навіть тоді, коли $p_1 > h$, тобто при глибинах у нижньому б'єфі менших, ніж висота порога p_1 . Як показують досліди, коливання напору в цьому випадку зв'язані з формою і величиною вальця під струминою. При ширині отвору, утвореного порогом і щитом, яка дорівнює ширині лотоку, під струминою при $p_1 > h$ утворюється валець, висота τ якого більше h . Між нижньою поверхнею струмини і вальцем лишається спочатку вільний простір, заповнений повітрям (рис. 7). Якщо в цей простір повітря надходить з боків (що можливе тоді, коли ширина водотоку B більше ширини отвору b) або підводиться через струмину тоненькою скляною трубкою, то об'єм вальця під струминою весь час лишається сталим (в досліді зміни його об'єму не виявлено). Напір перед щитом при цьому зберігає також сталу величину.

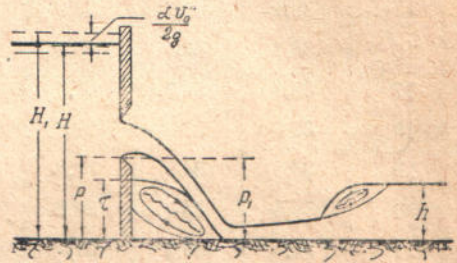


Рис. 7.

В тому випадку, коли немає припливу повітря під струмину, що витікає з отвору, валець під струминою, поступово збільшуючись, заповнює весь простір, обмежений площиною дна і нижньою поверхнею струмини. І в той момент, коли під струминою зникає повітря (увесь простір заповнюється водою), струмина притискається до вальця під нею, а напір перед щитом різко спадає.

Досить підвести повітря під струмину (скляною трубкою чи навіть проткнути товщу струмини голкою шпиген-масштаба), як вона відривається від вальця; між струминою і вальцем з'являється повітряний мішок, а напір перед щитом одразу ж збільшується із з'явленням під струминою (з низової сторони) повітря. Але коли при наявності повітря під струминою підвищення рівня в нижньому б'єфі зовсім не впливає на величину напору перед щитом, поки глибина h менше висоти порога p_1 , то при відсутності повітряного мішка між струминою і вальцем підвищення рівня з низової сторони спричиняє збільшення напору перед щитом навіть тоді, коли глибина h менше висоти порога p_1 .

І все таки, не зважаючи на підвищення напору перед щитом, при відсутності повітря під струминою величина його не досягає початкової H_1 , яку ми спостерігаємо при наявності повітря під струминою до того часу, поки h_1 не стане більше p_1 . Для ілюстрації викладених міркувань наводимо нижче дані за дослідями, проведеними в гідравлічній лабораторії Київського гідромеліоративного інституту в лотоці шириною $b = 232$ мм. Слід відзначити, що в табл. 2 виміри по +1 шкалі (на відстані 10 см нижче площини щита і порога)—по суті не глибини, а величини, які характеризують далекість падання струмини. В усіх без винятку дослідах ясно видно, що відсутність повітря під струминою спричиняє зменшення далекості падання струмини, тобто струмина ніби притискається до порога (під струминою вакуум). Очевидно, і коливання напору перед щитом при відсутності під струминою повітря залежать не від затоплення, а від величини вакууму в просторі, зайнятому вальцем (табл. 2).

Як уже відзначено, отвір слід вважати затопленим в тому випадку, коли глибина h_1 за щитом стає вище порога, тобто при $h_1 > p_1$. Але, як показують дослідні дані, вплив затоплення в тих випадках, коли h_1 більше p_1 ,

Таблиця 1¹⁾

№№ дослідів	Виміряні величини			Обчислені величини			Примітка
	Q л/сек	H_1 см	h см	h_1 см	z'_0 см	Q_1 л/сек	
Висота порога $p_1 = 18,2$ см; відкриття щита $a=10,0$ см							
11	39,4	37,6	31,3	28,5	8,1	41,1	
12	39,4	38,0	32,1	29,3	8,7	42,4	
13	39,4	38,4	32,7	30,0	8,4	41,7	
14	39,4	39,7	34,5	31,4	8,3	41,5	
15	39,4	41,7	35,9	33,4	8,3	41,5	
16	39,4	46,4	40,2	37,9	8,5	42,0	
17	38,6	53,3	46,3	44,4	8,9	42,9	
18	36,6	33,9	29,8	26,7	7,2	38,6	
19	36,6	34,6	30,3	27,8	6,8	37,6	
20	36,6	35,0	30,8	28,3	6,7	37,3	
21	36,6	35,4	31,2	28,8	6,6	37,0	
22	36,6	37,4	32,6	30,3	7,1	38,4	
Висота порога $p_1 = 18,4$ см; відкриття щита $a=5,0$ см							
39	20,0	29,1	11,1	—	—	20,6	
40	20,0	29,1	16,9	—	—	20,6	
41	20,0	30,3	20,9	18,55	—	22,1	
42	20,0	31,9	23,5	21,3	10,6	23,4	
43	20,0	32,1	24,7	22,7	9,4	22,1	
44	20,0	34,5	28,0	26,2	8,3	20,7	
45	20,0	35,7	28,7	26,9	8,8	21,4	
46	19,7	46,2	38,1	36,8	9,4	22,1	
Висота порога $p_1 = 18,4$ см; відкриття щита $a=3,0$ см							
47	20,0	39,3	18,5	—	—	19,0	
48	20,0	40,2	20,7	16,2	—	19,4	
49	20,0	40,8	22,1	17,8	—	19,7	
50	20,0	42,0	24,3	20,5	21,5	20,0	
51	20,0	46,0	28,7	25,5	20,5	19,6	
52	20,0	47,3	30,0	27,0	20,3	19,5	
53	20,0	48,4	30,5	27,5	20,9	19,8	
54	20,0	55,9	36,3	33,8	22,1	20,3	
55	19,7	63,2	43,2	41,2	22,0	20,3	

№№ дослідів	Виміряні величини			Обчислені величини			Примітка
	Q л/сек	H_1 см	h см	h_1 см	z'_0 см	Q_1 л/сек	
Висота порога $p_1 = 12$ см; відкриття щита $a = 5,0$ см							
76	25,6	27,4	11,8	—	—	25,9	
77	25,6	27,4	12,6	4,97	—	25,9	
78	25,6	28,0	13,9	7,38	—	26,4	
79	25,6	28,3	15,2	9,44	—	26,7	
80	25,6	29,4	17,9	13,1	—	27,8	
81	25,6	30,1	19,3	14,9	15,2	28,1	
82	25,6	30,7	20,3	16,1	14,6	27,5	
83	25,6	32,1	22,3	18,6	13,5	26,4	
84	25,6	32,5	23,0	19,3	13,2	26,2	
85	25,6	33,8	24,3	20,8	13,8	26,7	
86	25,6	36,2	25,7	22,4	13,8	26,7	
87	25,6	38,8	28,1	25,1	13,7	26,6	
88	25,6	40,9	30,0	27,2	13,7	26,6	
89	20,8	22,4	9,0	—	—	20,2	
90	20,8	22,7	12,0	—	—	20,6	
91	20,8	23,3	14,0	10,2	—	21,3	
92	20,6	24,5	16,9	13,9	—	22,7	
93	20,6	25,0	17,9	15,1	9,9	22,7	
94	20,6	26,4	20,2	17,7	8,7	21,3	
95	20,6	27,7	21,7	19,3	8,4	20,8	
96	20,6	31,4	24,5	22,4	9,0	21,6	
97	20,6	33,2	26,2	24,2	9,0	21,6	
98	20,6	36,0	28,6	26,8	9,2	21,8	
99	20,6	42,1	24,5	33,0	9,1	21,7	
100	20,6	44,7	37,0	35,6	9,1	21,7	
Висота порога $p_1 = 12$ см; відкриття щита $a = 3,0$ см							
103	24,0	44,2	11,2	—	—	23,9	
104	24,0	44,2	13,4	—	—	23,9	
105	24,0	44,2	14,6	—	—	23,9	
106	24,0	44,3	15,4	—	—	24,0	
107	23,6	44,6	17,4	8,7	—	24,1	
108	23,6	45,2	19,0	11,5	—	24,3	
109	23,6	46,8	21,5	15,1	31,7	24,3	
110	23,6	49,2	24,1	18,6	30,6	23,9	
111	23,6	51,2	26,1	21,1	30,1	23,7	
112	23,6	58,0	30,5	26,3	31,7	24,3	
113	23,4	59,4	31,0	26,9	32,5	24,6	
114	23,2	63,7	34,7	30,0	33,7	25,1	

¹⁾ Примітка 1. В дослідях, для яких не дано значень z'_0 , величину витрати обчислено, як для отвору незатопленого, за формулою:

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH_c}$$

ω — H_c — напір над центром отвору.

Примітка 2. В розрахунках прийнято $\alpha = 1,1$.

№№ дослідів	Витрата Q , л/сек	Відкриття шта a см	Висота порога p_1 см	Глибини перед щитом в см		Г л и б и н и						
				H_{60}	H_{10}	h_{10}	h_{20}	h_{30}	h_{40}	h_{50}		
1—I	9,3	5,2	12,1	21,7	21,6			1,95		2,15		
1—II				21,1	21,0			1,95		2,15		
1—III				21,7	21,6					6,55	10,0	10,5
1—IV				21,5	21,45				7,8	9,65	10,85	11,9
1—V				22,0	22,0				11,15	11,70	12,5	13,15
1—VI				26,5	26,4			19,85	23,15	18,9	17,3	21,5
1—VII				29,1	29,1			21,2	24,6	23,6	21,1	22,9
2—I	9,9	5,2	12,1	22,28	22,23	12,6				2,38		
2—II				23,18	23,15	14,25						
2—III				22,65	22,55	13,5	8,5	9,75	11,0	12,5		
2—IV				23,10	23,20	14,45	—	9,30	10,5	11,5		
2—V				23,05	23,0	14,05	10,43	10,93	12,2	12,7		
2—VI				25,25	23,2	14,3	10,25	10,65	11,7	12,7		
2—VII				23,85	23,85	15,05	12,95	13,65	14,35	15,0		
2—VIII				26,95	26,6	18,3	20,55	19,38	17,25	18,2		
2—IX				27,75	27,8	20,05	23,68	20,6	20,3	21,0		
3—I	9,35	—	12,1	21,75	21,7	11,8	2,3	2,4	2,45			
3—II				22,65	22,5	14,0	4,35					
3—III				22,15	22,1	13,2	7,8	9,5	11,0	11,6		
3—IV				22,75	22,6	13,85	7,4	8,6	10,5	11,3		
3—V				22,75	22,6	14,0	11,3	11,15	12,3	13,3		
3—VI				24,00	23,9	15,7	13,5	13,7	16,5	16,1		
3—VII				24,95	24,9	16,8	17,0	16,8	16,4	17,3		
3—VIII				26,85	26,75	19,5	22,85	19,4	16,8	21,25		
3—IX				28,95	28,9	21,2	24,2	22,0	20,4	22,55		
4—I	7,45	—	12,1	22,15	22,1	9,75	1,7	1,7				
4—II				23,35	23,3	12,8	2,3					
4—III				22,65	22,6	11,3	6,65	8,8	9,9	10,4		
4—IV				23,35	23,3	13,2	7,6	8,35	9,3	10,2		
4—VI				24,65	24,6	15,0	14,0	14,15	14,9	14,85		
4—VI				27,15	27,10	19,3	21,7	17,9	19,2	19,8		
4—VII				34,3	34,2	23,5	27,45	27,25	24,8	25,55		

Таблиця 2

ж ч е ш и т а в с м						П р и м і т к а
h_{60}	h_{80}	h_{90}	h_{100}	h_{110}	h_{150}	
10,6	11,05	11,05				Стрибок відігнаний; під струминою повітря і валець висотою $\tau = 8,4$ см. }
12,0	12,8	12,8				Стрибок відігнаний, під струминою суцільний валець.
13,70	14,05	14,10	14,15	14,15		Стрибок затоплений; під струминою повітря і валець.
20,7	21,0					Під струминою суцільний валець.
23,25	23,4	22,9	23,4			Під струминою суцільний валець.
						Стрибок відігнаний; під струминою суцільний валець.
12,5	12,95	12,95				Стрибок відігнаний; під струминою повітря і валець вис. $\tau = 7,8$ см.
11,95	12,95	12,95				Стрибок затоплений, під струминою суц. валець
13,3	14,00	14,00				Під струминою повітря і валець вис. $\tau = 9,35$ см.
13,0	14,0	14,0				Під струминою суцільний валець.
15,45	15,9	16,05	16,05			Під струминою повітря і валець.
20,7	—	19,3	—	—	20,8	Глибина за щитом $h = 16,85$ см.
21,05	21,55	21,6	21,9	—	22,10	Глибина за щитом $h = 16,85$ см. Струмина затоплена.
						Стрибок відігнаний; під струминою суціль. валець
12,1	12,8	12,95	—	12,95		Стрибок відігнаний; під струминою повітря і валець висотою $\tau = 8,3$ см.
11,9	12,95	12,95				Стрибок затоплений; під струминою суцільний валець
13,4	13,4	14,4	14,5	14,5		Під струминою повітря і валець висотою 9,4 см. Під струминою суцільний валець; повітря під струмину не засмоктує
15,85	17,3	17,3	17,3	—	17,3	Поверхня струмини зовсім гладка на довжині 28—30,0 см.
17,6	18,45	—	18,9			Стрибок відігнаний; під струминою суц. валець.
21,5	21,45					Стрибок відігнаний; під струминою повітря і валець.
22,7	23,05					Стрибок затоплений; під струминою суц. валець
	1,9					Стрибок затоплений; під струминою повітря і валець висотою 9,5 см.
11,0	11,9	11,95	—	—	11,95	Стрибок затоплений; під струминою повітря і валець висотою 9,5 см.
11,05	11,95	11,95	—	—	11,90	Поверхня струмини на протязі 29,0—31,0 см зовсім гладка.
15,5	16,0	16,6	16,95	—	17,0	Струмина з гладкою поверхнею підіймається вгору.
20,0	20,4	—	20,6		20,65	
25,8	26,7	—	26,7		20,75	Поверхня струмини за щитом хвиляста.

але менше (або дорівнює) $p_1 + \frac{a}{2}$, дуже незначний (див. табл. 1). Тому в практиці розрахунків вплив затоплення можна не враховувати при глибині $h_1 \leq p_1 + \frac{a}{2}$, вводячи в розрахунок напір над центром щитового отвору. В тому випадку, коли $h_1 > p_1 + \frac{a}{2}$ вплив затоплення в значній мірі відбивається на умовах витікання, і розрахунок отвору вже необхідно провадити за залежністю (2) з урахуванням зниження рівня за щитом порівнюючи з побутовою глибиною h нижче споруди.

Вихідному рівнянню (43) для визначення глибини h_1 за щитом залежно від заданих вихідних умов можна надати і іншого вигляду, розв'язавши його щодо z'_0 , q або H_1 .

Так, наприклад, розв'язавши рівняння (43) щодо H_1 , одержимо:

$$H_1 = \frac{q^2}{\mu^2 a^2 2g} + \sqrt{h^2 - \frac{2aq^2}{g} \left(\frac{h - \varepsilon a}{\varepsilon ha} \right)} \quad (44)$$

Слід відзначити, що за залежністю (44) одержуємо дійсне значення повного напору перед щитом тільки в тому випадку, коли щитовий отвір є затопленим, тобто при умові, що глибина h_1 більше $p_1 + \frac{a}{2}$. В тому ви-

падку, коли отвір є незатопленим, вираз $\frac{q^2}{\mu^2 a^2 2g}$ дає величину H_c над центром щитового отвору. За величиною, яку дає підкорінний вираз залежності (44), легко встановити, який буде отвір—затоплений чи незатоплений.

З порівняння залежностей (43) і (44) видно, що підкорінний вираз є не що інше, як глибина h_1 в нижньому б'єфі в безпосередній близькості до щита.

Для визначення величини z'_0 залежність (43) зручніше представити у вигляді:

$$z'_0 = H_1 - \sqrt{h^2 - \frac{2aq^2}{g} \left(\frac{h - \varepsilon a}{\varepsilon ah} \right)} \quad (45)$$

Безпосередньо з рівняння (44) виходить, що величину z'_0 можна також визначити за залежністю:

$$z'_0 = \frac{q^2}{\mu^2 a^2 2g} \quad (46)$$

З рівняння (46), розв'язавши його щодо q , можна визначити величину витрати.

Трохи складніша задача по визначенню висоти a відкриття щита, тому що пряме розв'язання рівняння (43) приводить до складної аналітичної залежності. При заданій витраті q побутова глибина h в нижньому б'єфі теж відома. Коли заданий при цьому напір (глибина) H_1 перед щитом, то звідси можна, прийнявши якесь значення z'_0 більше, ніж $H_1 - h$, залежність для визначення відкриття щита представити в такому вигляді:

$$\eta_c = \frac{2\eta}{2 + \eta^3 - \eta(\eta_E - \eta_z)} \quad (47)$$

В рівнянні (47):

$$\eta = \frac{h}{h_k}$$

$$\eta_E = \frac{H_1}{h_k}$$

$$\eta_z = \frac{z'_0}{h_k}$$

$$\eta_c = \frac{h_c}{h_k} = \frac{\varepsilon a}{h_k}$$

Знаючи величину η_c , можна вже визначити і висоту відкриття щита:

$$a = \frac{\eta_c h_k}{\varepsilon} \quad (48)$$

Щодо розв'язання рівняння (47) необхідно зробити зауваження, висловлені для залежності (44), а саме співвідношення (47) дає змогу визначити відкриття щита тільки при умові, що щитовий отвір є затопленим. Очевидно, що для затопленого отвору величина z'_0 може бути в границях:

$$(H_1 - h) < z'_0 \leq \left(H_1 - p_1 - \frac{a}{2} \right)$$

Щодо з'ясування умов руху за спорудою (визначення форми супрягання б'єфів), то задачу можна розв'язувати за залежностями, наведеними для щита без порога. Не можна тільки за вказаними залежностями при наявності порога визначити висоту a відкриття щита; таким чином, відпадає потреба користуватись рівняннями (графічним розв'язанням їх):

$$(\zeta_z)_0 = F(\zeta_c) \text{ і } \zeta_0 = F(\zeta_c)$$

Тут тільки слід підкреслити, що при відгоні стрибка нижче споруди щитовий отвір буде незатоплений, незалежно від співвідношення величин висоти порога p_1 і побутової глибини h .

§ 4. Рух через споруди, які стискають водотік з боків

До споруд, які стискають водотік з боків, належать мости, труби, прокладені в насипах і дамбах, перемички, шлюзи — регулятори на осушних і зрошувальних системах в умовах повного відкриття щитів та ін. При відсутності порога вплив нижнього б'єфу при незначних стисненнях відбивається на умовах протікання в границях стисненої ділянки вже при самих малих глибинах за спорудою (мають на увазі спокійний водотік). При великих стисненнях глибина в нижньому б'єфі може зовсім не впливати на умови протікання в межах ділянки, де відбувається бічний стиск. Наявність впливу рівня з низової сторони на умови протікання в споруді звичайно враховується трохи довільно, а саме, прийнято вважати, що в межах затопленої ділянки водотоку з бічним стиском устанавлюється глибина, яка дорівнює побутової глибині потоку. Нетрудно довести помилковість такого припущення. Розглядатимемо водотік з руслом пря-

мокутного перерізу. При певній витраті Q і ширині B в природному (нестисненому) стані питома витрата:

$$q = \frac{Q}{B}.$$

Для стисненої ділянки того ж водотоку, при ширині b , питома витрата:

$$q_1 = \frac{Q}{b}.$$

Звідси критичні глибини:

$$h_k = \sqrt[3]{\frac{\alpha q^2}{g}}; \quad h_{k_1} = \sqrt[3]{\frac{\alpha q_1^2}{g}}.$$

Або, після заміни q_1 його значенням через q і співвідношенням B/b , одержимо:

$$h_{k_1} = \sqrt[3]{\frac{\alpha q^2 B^2}{g b^2}} = h_k \sqrt[3]{\frac{B^2}{b^2}}. \quad (49)$$

З побудови графіків Eh (рис. 8) для перерізів при ширині B (крива 1—1) і b (крива 2—2) для якоїсь певної витрати Q маємо, що певному значенню енергії E на стисненій ділянці водотоку в спокійній течії відповідає менша глибина, ніж на ділянці нестисненої при тій же витраті Q . Звідси, при бічному стисканні поперечного перерізу спокійного водотоку в межах стисненої ділянки встановлюється певне зниження рівня. Правда, це зниження буде спостерігатись до того часу, поки глибина h_1 не досягне величини h_{k_1} , після чого далі стиснення вже не спричинятиме зменшення глибини в стисненій ділянці. Навпаки, з дальшим стиском критична глибина h_{k_1} збільшується, а, звідси — в кінці стиснутої ділянки буде встановлюватись глибина $h_1 = h_{k_1}$. Остання ж може бути і більше побутової глибини. Рівень з низової сторони впливатиме на умови протікання в стисненій ділянці, поки в ній не встановиться критична глибина h_{k_1} .

Для встановлення критерію затопленості в умовах бічного стиснення русла прямокутного перерізу застосуємо закон кількостей руху, розглядаючи перерізи 1—1 і 2—2 (рис. 9). Нехтуючи імпульсом сили тертя на ділянці між розглядаєними перерізами і імпульсом сили ваги рідини в об'ємі між тими ж перерізами, вихідне рівняння кількостей руху запишемо (при $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$)¹⁾:

$$\frac{\alpha \omega v^2 \gamma}{g} - \frac{\alpha \omega_1 v_1^2 \gamma}{g} = \frac{b h_1^2 \gamma}{2} - \frac{B h_2^2 \gamma}{2} + \frac{(B-b) h_1^2 \gamma}{2} \quad (50)$$

В рівнянні (50) величина $\frac{B-b}{2} h_1^2 \gamma = P_2$ не що інше, як проекція горизонтальної складової тиску в напрямі осі потоку на стінки 1—1 (рис. 9). Аналітичний вираз для величини P_2 складено при таких припущеннях: а) тиск на стінки 1—1 розподіляється за гідростатичним законом; б) зміна вільної поверхні між перерізами 1—1 і 2—2 відбувається за прямою.

¹⁾ Тут і далі розглядається різка зміна перерізу при переході від звуженої ділянки до розширеної (рис. 9), але з розтіканням струмин по всій ширині водотоку. Розв'язання задачі по з'ясуванню умов протікання рідини при плавному розширенні див. проф. Г. Й. Сухомел, Розмови русла при стисненні його з боків, Доповіді АН УРСР, № 4, 1939, і його ж, Розмови русла при стисненні його з боків (попередні міркування) — рукопис.

Крім того, для спрощення аналітичного виразу P_2 прийняті значення і площі перерізу і глибини центра ваги її z_c , що входять у формулу P_2 за глибиною h_1 , а не за середнім значенням між h_1 і h .

З рівняння (50) після зведення подібних членів одержимо:

$$\frac{2\alpha Q^2}{gB\omega} - \frac{2\alpha Q^2}{gB\omega_1} = h_1^2 - h^2 \quad (51)$$

При бічному стисканні в отворі рівень знижується порівнюючи з побутовою глибиною h , при чому глибина h_1 в стисненій ділянці водотоку

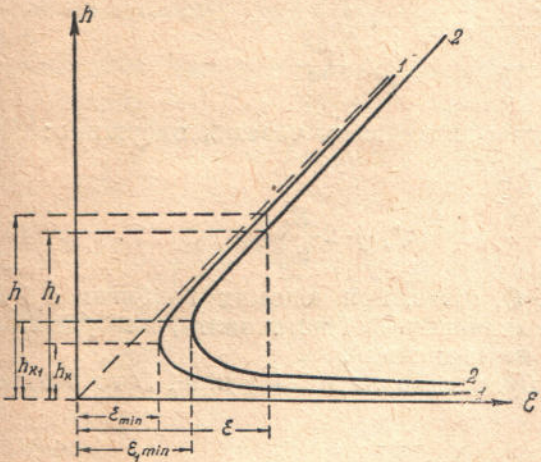


Рис. 8.

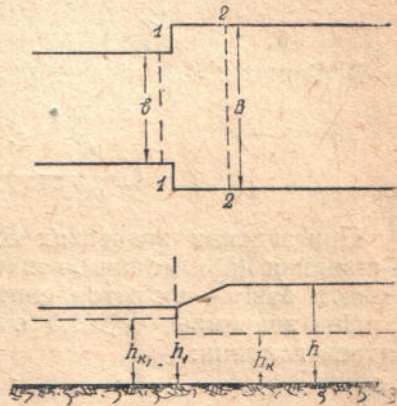


Рис. 9.

не може встановитись менша, ніж h_k . „Критична форма протікання“ у звуженій ділянці водотоку (надалі для скорочення називатимемо стиснену ділянку отвором) відповідає рівності $h_1 = h_k$.

Відношення h_1 до h_k позначимо через ζ_1 . Очевидно, що при критичній формі протікання в отворі $\zeta_1 = 1,0$; при $\zeta_1 > 1,0$ в отворі встановлюється глибина h_1 , більша, ніж h_k , але нижча побутової глибини h , тобто $h_k < h_1 < h$. Звідси при $\zeta_1 > 1,0$ рівень з низової сторони впливатиме на умови протікання в отворі. Тому, якщо перетворити вихідне рівняння і ввести туди значення ζ_1 , то новою залежністю можна скористуватись для встановлення критерію затопленості через величину ζ_1 .

З рівняння (51) маємо:

$$\frac{2\alpha q^2}{gh} + h^2 = \frac{2\alpha q^2 B}{gbh_1} + h_1^2$$

Поділимо праву і ліву частини одержаної залежності на h_k^2 , вводячи позначення:

$$\frac{h_1}{h_k} = \eta_1; \quad \frac{h}{h_k} = \eta$$

Після відповідних підставлень запишемо це рівняння у вигляді:

$$\frac{2}{\eta} + \eta^2 = \frac{2B}{b\eta_1} + \eta_1^2$$

або:

$$\eta_1^3 - \frac{\eta_1}{\eta} (2 + \eta^3) + \frac{2B}{b} = 0 \quad (52)$$

Але $\zeta_1 = \frac{h_1}{h_{k1}}$, а за залежністю (49):

$$h_{k1} = h_k \sqrt[3]{\frac{B^2}{b^2}}$$

Тому

$$\zeta_1 = \frac{h_1}{h_k \sqrt[3]{\frac{B^2}{b^2}}} = \eta_1 \frac{1}{\sqrt[3]{\frac{B^2}{b^2}}}$$

З рівняння (52) після підставлення значення η_1 через ζ_1 одержимо:

$$\zeta_1^3 \frac{B^2}{b^2} - \frac{\zeta_1 \sqrt[3]{\frac{B^2}{b^2}}}{\eta} (2 + \eta^3) + 2 \frac{B}{b} = 0 \quad (53)$$

При заданих значеннях B , b і Q , отже, при відомих глибинах h і h_k з рівняння (53) можна визначити величину ζ_1 і встановити, як буде працювати отвір — як затоплений чи незатоплений.

При значеннях $\zeta_1 > 1,0$ отвір буде затоплений і в кінці його встановиться глибина:

$$h_1 = \zeta_1 h_{k1} = \zeta_1 \sqrt[3]{\frac{B^2}{b^2}} h_k$$

При $\zeta_1 = 1,0$ — „критична форма“ протікання в отворі, а глибина в кінці

$$h_1 = h_{k1} = h_k \sqrt[3]{\frac{B^2}{b^2}}$$

Розв'язання рівняння (53) з значенням $\zeta_1 < 1,0$ відпадає, тому що в отворі не може встановитись глибина h_1 менша, ніж критична h_{k1} .

Зважаючи на складність прямого розв'язання рівняння (53), наводимо і графічне його розв'язання (графік VII).

При цьому величина ζ_1 за залежністю (53) визначається як функція від η і $\frac{B}{b}$, тобто:

$$\zeta_1 = f\left(\eta, \frac{B}{b}\right) \quad (54)$$

З рівняння (54) за величиною ζ_1 можна для даної витрати Q і співвідношення B до b встановити умови протікання в отворі (чи працюватиме він як затоплений чи незатоплений) і визначити глибину води в кінці стисненої частини потоку. Як уже відзначалось, при $\zeta_1 \leq 1,0$ в кінці отвору встановиться глибина $h_1 = h_{k1}$.

При $\zeta_1 > 1,0$ в кінці стисненої ділянки водотоку встановиться глибина $h_1 > h_{k1}$, але менша, ніж побутова глибина h , отже, при $\zeta_1 > 1,0$, глибина в кінці отвору буде в границях, які визначаються співвідношенням:

$$h_{k1} < h_1 < h$$

Величину ж h_1 при $\zeta_1 > 1,0$ знаходимо за залежністю

$$h_1 = \zeta_1 h_{k1} \quad (55)$$

Щодо величини ζ_1 , то її визначаємо за графіком або таблицями:

$$\zeta_1 = f\left(\eta, \frac{B}{b}\right)$$

Дуже часто в практичному застосуванні доводиться розв'язувати питання про затоплення отвору і при трохи іншому поставленні задачі.

Одною з таких задач може бути визначення співвідношення між B і b , якому відповідає „критична форма“ протікання в споруді при певних Q , h і h_k .

Оскільки при критичних умовах протікання в отворі встановлюється $h_1 = h_{k1}$, то, отже, величина $\zeta_1 = 1,0$, і з рівняння (53) одержимо таку залежність для визначення співвідношення між B і b , при якому в кінці стиснутої ділянки встановиться критична глибина h_{k1} :

$$\frac{B^2}{b^2} - \frac{\sqrt[3]{\frac{B^2}{b^2}}}{\eta} (2 + \eta^3) + 2 \frac{B}{b} = 0 \quad (56)$$

З рівняння (56) при відомих величинах h і h_k можна визначити відношення $\left(\frac{B}{b}\right)_k$ як функцію від $\eta = \frac{h}{h_k}$, яке і відповідатиме критичним умовам протікання в отворі. Залежність (56) коротше запишемо:

$$\left(\frac{B}{b}\right)_k = f_1(\eta) \quad (57)$$

З рівняння (57) виходить, що і при більш інтенсивному стисненні русла рівень з низової сторони не впливатиме на умови руху рідини на ділянці з бічним стиском. Навпаки, при меншому ступені стиснення отвір слід розглядати як затоплений, тому що побутовий рівень з низової сторони впливатиме на умови протікання в споруді.

Таким чином, умови протікання в отворі будуть характеризуватись такими співвідношеннями:

$$\frac{B}{b} = \left(\frac{B}{b}\right)_k = f_1(\eta)$$

— критична форма протікання, в кінці стисненої ділянки потоку встановиться критична глибина h_{k1} ; $\frac{B}{b} < \left(\frac{B}{b}\right)_k$ — отвір затоплений і в кінці звуженої частини встановиться глибина h_1 , яка визначається за залежністю (55):

$$h_1 = \zeta_1 h_{k1}$$

$\frac{B}{b} > \left(\frac{B}{b}\right)_k$ — отвір незатоплений, і в кінці отвору, як і при критичній формі, встановиться критична глибина h_{k1} .

Але коли залежність (57) дає змогу одразу визначити співвідношення між B і b , при якому в споруді встановиться „критична форма“ протікання,

то аналітичне розв'язання її має певні технічні труднощі — її доводиться розв'язувати доборою; тому нижче наводимо графічне (графік VII при $\zeta = 1,0$) розв'язання рівняння (57).

Користування графіком для розв'язання залежності (57) настільки просте, що відпадає потреба окремо спинятись на цьому питанні.

В спорудах, які дають стискання поперечного перерізу водотоку, величина витрати практично дуже рідко може бути сталою. Природно, що при прийнятому співвідношенні між B і b залежно від величини витрати можуть змінюватись і умови протікання в споруді. Якщо зміна побутової глибини h нижче споруди відповідає зміні витрати, то, очевидно, умови протікання в отворі можна встановити за залежністю (53). Але можливі і такі випадки руху рідини, коли з зміною витрати Q при сталому відношенні B до b глибина нижче споруди змінюється настільки мало, що її практично можна вважати сталою. В цьому випадку визначення критерію затопленості зручніше, як здається, мати не через відносну глибину ζ_1 чи η , а через критичну витрату Q_k , величині якої відповідає критична форма протікання рідини в отворі споруди.

Для визначення значення критичної витрати Q_k при заданих величинах h і $\frac{B}{b}$ скористуємось, як вихідним, рівнянням (51), яке можна записати в такому вигляді для русла прямокутного перерізу:

$$\frac{2\alpha Q^2}{gB^2h} + h^2 - \frac{2\alpha Q^2}{gBbh_1} - h_1^2 = 0$$

або:

$$\frac{2\alpha Q^2 b^2}{gB^2 b^2 h} + h^2 - \frac{2\alpha Q^2 b}{gB b^2 h_1} - h_1^2 = 0 \quad (58)$$

Рівень з низової сторони не впливає на умови протікання в отворі споруди, коли в кінці звуженої частини встановлюється глибина h_{k1} .

Вводячи позначення $\frac{h_1}{h_{k1}} = \zeta_1$ і $\frac{h}{h_{k1}} = \xi$, після ділення правої і лівої частини залежності (58) на h_{k1}^2 запишемо її через відносні глибини у вигляді:

$$\frac{2b^2}{B^2} \frac{1}{\xi} + \xi^2 - 2 \frac{b}{B} \cdot \frac{1}{\zeta_1} - \zeta_1^2 = 0 \quad (59)$$

Але оскільки для початку критичних умов протікання рідини в отворі $h_1 = h_{k1}$, то $\zeta_1 = 1,0$; тому останнє рівняння запишемо:

$$2 \frac{b^2}{B^2} + \xi^3 - \frac{2b}{B} \xi - \xi = 0$$

або:

$$\xi^3 - \xi \left(\frac{2b}{B} + 1 \right) + 2 \frac{b^2}{B^2} = 0 \quad (60)$$

Для поставленої задачі відношення $\frac{b}{B}$ відоме; звідси для скорочення рівняння (60) запишемо:

$$\xi = F \left(\frac{b}{B} \right) = F_1 \left(\frac{B}{b} \right) \quad (61)$$

Розв'язання залежності найзручніше представити графічно (графік VIII).
Маючи величину $\frac{b}{B}$, за графіком знаходимо ξ , а далі вже і h_{k1} з співвідношення:

$$h_{k1} = \frac{h}{\xi} \quad (62)$$

Величиною ж h_{k1} визначається як питома „критична“ витрата q_k , так і сумарна Q_k за залежностями (37) і (38). Для русла прямокутного перерізу:

$$q_k = \sqrt{\frac{gh_{k1}^3}{\alpha}}$$

$$Q_k = bq_k$$

Величиною „критичної витрати Q_k і заданої витрати Q водотоку при відомому співвідношенні між B і b визначаються умови протікання рідини в отворі споруди. Відносячи як величину „критичної“ Q_k , так і заданої витрати Q водотоку до одиниці ширини отвору, можемо встановити такі співвідношення, за якими легко визначити, чи впливає побутова глибина h в нижньому б'єфі на умови протікання рідини в межах ділянки, стиснутої з боків спорудою, чи ні.

При $q_k < q_1$ рівень у нижньому б'єфі не впливає на умови протікання рідини в споруді, тобто отвір слід розглядати як незатоплений.

При $q_k = q_1$ маємо граничну витрату водотоку, при якій ще рівень у нижньому б'єфі не впливає на умови руху рідини в споруді.

При $q_k > q_1$ рівень з низової сторони впливає на умови протікання в споруді. Отже, тільки при $q_k > q_1$ отвір слід розглядати як затоплений.

Слід особливо підкреслити, що навіть при $q_k = q_1$ в дослідах спостерігається ледве помітне підвищення рівня у верхньому б'єфі порівнюючи з глибиною, яка спостерігається при $q_1 > q_k$. Таким чином, певний вплив на умови протікання рідини в отворі споруди виявляється навіть при рівності „критичної“ Q_k і заданої витрат Q водотоку. Але вплив цей настільки незначний, що ним можна нехтувати. Очевидно, пояснення певного збільшення глибин у верхньому б'єфі при $q_k = q_1$ порівнюючи з глибинами при $q_1 > q_k$ слід шукати в зміні тиску в перерізі за ділянкою, стисненою спорудою. При стисненні живого перерізу водотоку з боків і при нерозмішваному руслі за спорудою може утворитись, як і при витіканні спід шита, відігнаний або затоплений стрибок. Ясно, що при відгоні стрибка ($q_1 > q_k$) рівень з низової сторони не може впливати на умови руху рідини в споруді. В міру того як змінюється співвідношення між q_k і q_1 , а саме $\frac{q_1}{q_k}$ наближається до одиниці, стрибок насувається до споруди, і в той момент, коли валець (чи хвиля) утворюється в безпосередній близькості до перерізу, що прилягає до стиснутої ділянки, і спостерігається підвищення рівня (щоправда, дуже незначне) у верхньому б'єфі. Очевидно, таке підвищення рівня у верхньому б'єфі і відбувається завдяки зміні (збільшенню) тиску, створюваного вальцем стрибка (чи хвилястим стрибком). Крім того, зміна тиску може бути викликана зміною викривлення струмин і зміною форми бічних вальців коло виступів при розширенні поперечного перерізу (коло стінок 1—1 рис. 9). Але, як показує дослідна перевірка, зміна глибини у верхньому б'єфі при $q_1 = q_k$ порівнюючи з глибиною при $q_1 > q_k$ настільки незначна, що її можна на враховувати. Звідси і у встановлених залежностях для визначення критерію затоплюваності в споруді.

дах, які стискають поперечний переріз водотоку з боків, при практичному застосуванні немає потреби вводити якінебудь поправки.

Встановлення критерію затопленості дає певні відправні залежності і для з'ясування умов руху за спорудою. Але розв'язання задачі по визначенню форми супрягання б'єфів в умовах змінної ширини повинно бути предметом спеціального дослідження, через що в даній роботі цього питання ми зовсім не торкаємось.

§ 5. Рух через водозливи¹⁾

Споруди, до гідравлічного розрахунку яких застосовується теорія водозливу, на практиці є, мабуть, найпоширенішим типом гідротехнічних споруд. І коли теорія гідравлічного розрахунку для найпоширеніших на практиці типів незатоплених водозливів дає досить надійні результати, то для цих же типів, але затоплених, по суті є тільки наближене розв'язання задачі в частині врахування впливу затоплення на умови протікання в отворі водозливу. Особливо це стосується водозливів практичного профіля.

Для ілюстрації наведемо значення коефіцієнта затоплення σ_n , яким звичайно враховується вплив затоплення у водозливах практичних профілів (табл. 3). В таблиці, крім абсолютних величин σ_n за Гершелем і Моріцом, наводимо також значення σ_n в процентах, прийнявши коефіцієнт затоплення за Гершелем за 100%.

Таблиця 3²⁾

H_1/H	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Значення σ_n										
За Гершелем	0,991	0,983	0,972	0,956	0,637	0,907	0,856	0,773	0,621	0,00
За Моріцом	1,01	0,98	0,94	0,90	0,84	0,78	0,70	0,59	0,44	—
%	101,9	99,7	96,7	94,2	89,7	86,0	81,8	76,4	70,8	—

В наведеній таблиці: H_1 — перевищення побутового рівня з низової сторони над порогом водозливу; H — напір над порогом водозливу. Як видно з зіставлення наведених в таблиці величин σ_n , розходження досягає 30%. Ще більше розходження одержується, коли порівняти значення σ_n за Гершелем і Базеном³⁾ (Bazin) для тих же водозливів практичного профіля. Крім значних відхилень у величинах σ_n , слід указати ще на одну обставину, якої часто не беруть на увагу при розгляді затоплення водозливів. Так, на основі дослідних даних, Моріц і Гершель дають значення

σ_n як функції від $\frac{H_1}{H}$. При такому розв'язанні задачі до певної міри враховується, звичайно, і вплив перепаду z як різниці рівнів у верхньому

¹⁾ Дослідження умов руху рідини через затоплений водозлив не входить у програму даної роботи. Торкаємось розгляду цієї задачі, щоб з'ясувати можливість застосування закону кількостей руху до встановлення критерію затопленості для водозливів.

²⁾ Числові значення σ_n в табл. 3 наводимо в тому вигляді, в якому дає їх проф. К. А. Михайлов (див. К. А. Михайлов, Ирригационные сооружения, ОНТИ, 1937). В роботі Н. W. King'a (див. Н. W. King, Handbook of Hydraulics, Лондон, 1929) числові значення σ_n за Гершелем трохи більші. Якщо в розрахунок ввести ці значення σ_n , то відхилення між коефіцієнтами затоплення за Гершелем і Моріцом будуть ще більші.

³⁾ Враховувати затоплення для водозливів практичних профілів за Базеном рекомендує проф. Б. А. Бахметев.

і нижньому б'єфах на умови протікання в отворі водозливу. Але в той же час зовсім не враховується вплив висоти водозливу p_1 ¹⁾ в умовах, коли водозлив працює як затоплений. Але вже дослідами Базена встановлено, що висота p_1 (точніше—відношення $\frac{z}{p_1}$) в значній мірі впливає на умови протікання в отворі водозливу в тонкій стінці при затопленні останнього. Для ілюстрації в табл. 4 наводимо значення σ_n за Базеном — як абсолютні

Таблиця 4

$\frac{z}{p_1}$	$\frac{H}{p_1}$	0,05	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,0	1,5
0,05		0,80	0,70	0,61	0,55	0,51	0,49	0,48	0,46	0,45	0,44	0,43	0,41
0,70		0,99	0,97	0,95	0,94	0,93	0,91	0,91	0,89	0,89	0,89	0,89	0,87
%		124,7	138,6	155,7	170,9	182,3	185,7	189,6	193,4	197,8	202,3	207,1	212,2

їх величини, так і в процентах (за 100% прийнято значення σ_n при $\frac{z}{p_1} = 0,05$).

Табличні дані ясно показують, що з зміною відношення $\frac{z}{p_1}$ значно змінюється і величина коефіцієнта затоплення σ_n (більш ніж у два рази при $\frac{H_1}{p_1} = 1,5$). Якщо взяти на увагу, що при заданому напорі H і витраті Q ширина b водозливного отвору є в прямій залежності від σ_n , то звідси стає зрозумілою важливість і актуальність установлення дійсної величини σ_n і точного критерію затопленості. А що останній залежить і від висоти водозливу, не підлягає сумніву. Для прямокутного водозливу в тонкій стінці залежність затоплення від висоти p_1 добре ілюструється матеріалами, наведеними в табл. 4.

Точне врахування впливу затоплення для водозливних отворів має особливо важливе значення тепер в зв'язку з використанням малих річок, коли в масовому масштабі провадиться будівництво низьконапірних гребель. Саме в низьконапірних греблях при пропусканні максимальних витрат найчастіше має місце затоплення водозливних отворів. Точне ж врахування впливу затоплення дає змогу уточнити і розміри водозливного отвору. При встановленні критерію затопленості водозливів звичайно поділяють їх на дві групи. До першої належить водозлив у тонкій стінці і практичного профіля; до другої групи належать водозливи з широким порогом. Водозливи в тонкій стінці (рис. 10), як і водозливи практичних

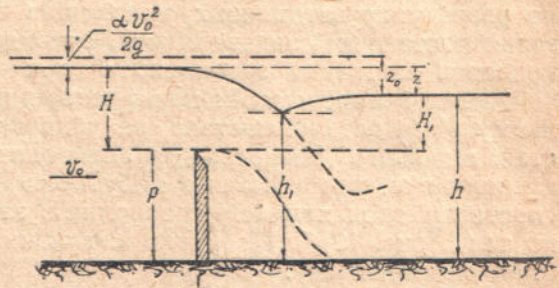


Рис. 10.

¹⁾ Тут, як і далі p_1 — висота порога водозливу з низової сторони (рис. 13).

профілів, звичайно вважають затопленими при додержанні таких двох умов:

$$\text{а) } h > p_1; \quad \text{б) } \frac{z}{p_1} < 0,70.$$

Для водозливу з широким порогом (рис. 11) критерій затопленості теж, звичайно, дають двома такими співвідношеннями:

$$\text{а) } h > p_1 + h_k; \quad \text{б) } \frac{z}{p_1} < 0,70,$$

де h_k — критична глибина над порогом водозливу.

Слід відзначити, що числове значення відносного перепаду (критерій Базена) $\frac{z}{p_1} < 0,70$ звичайно прийнято вважати наближеним критерієм затопленості. Точніше абсолютне значення $\frac{z}{p_1}$ в кожному окремому випадку можна встановити розрахунком на основі з'ясування умов супрягання б'єфів ($\frac{z}{p_1} \leq 0,70$ наближено відповідає умовам супрягання б'єфів з затопленим стрибком¹⁾).

Таким чином, друга загальноприйнята ознака затопленості водозливів до певної міри суперечить загальноприйнятому ж методі врахування затопленості для водозливів як практичних профілів, так і з широким порогом, коли σ_n дається як функція двох змінних H_1 і H незалежно від висоти водозливу p_1 з низової сторони.

Уже з цих коротких зауважень видно, наскільки мало вивчене питання про розрахунок затоплених водозливів практичного профіля. До розв'язання поставленої задачі можна, очевидно, підійти так само, як і до встановлення критерію затопленості при розгляді умов витікання рідини спід щита з порогом. Як показують досліди, побутова глибина h в нижньому б'єфі встановлюється не відразу за водозливом, а на певній відстані від нього. Безпосередньо за водозливом устанавлюється певне зниження рівня, порівнюючи з побутовою глибиною h . За зниженням рівня спостерігається хвиляста поверхня з затихаючим коливанням рівня вниз по течії (рис. 12)²⁾. Побутова ж глибина h встановлюється на певній відстані від водозливу.

Звідси, очевидно, і до встановлення критерію затопленості треба підходити не з співвідношення висоти p_1 порога водозливу і побутової глибини h в нижньому б'єфі, а розглядати затоплення залежно від співвідношення глибини h_1 за водозливом і висоти p_1 . Можливість такого підходу до встановлення критерію затопленості, як здається, добре ілюструється і даними про величину коефіцієнта затоплення σ_n . Так, при малих значеннях $\frac{H_1}{H}$ і порівняно невеликій висоті p_1 порога водозливу

¹⁾ Точніше не $\frac{z}{p_1}$, а $\frac{z_0}{p_1}$ (див. рис. 10, 11).

²⁾ Рисунок, наведений в цитованій роботі King'a (с. 96, рис. 46), де зображена картина руху нижче затопленого водозливу в тонкій стінці, грохи не погоджується з тим, що спостерігається в досліді. За зниженням, за King'ом, іде хвиля, гребінь якої вище побутової глибини. Такої хвилі в досліді спостерігати не вдавалось.

$\left(\frac{z}{\rho_1} = 0,70\right)$, значення σ_n дуже близькі до одиниці, тобто підтоплення з низової сторони майже не впливає на умови протікання в отворі при незначному перевищенні побутової глибини над порогом водозливу.

Для визначення глибини h_1 у безпосередній близькості до водозливу, а саме в тому перерізі, де спостерігається найбільше зниження рівня, застосуємо закон кількостей руху. При цьому вважатимемо, що розподіл тиску в перерізі 1—1 (рис. 12) відбувається за законом гідростатики. В дійсності в перерізі 1—1 матимуть місце певні відхилення в розподілі

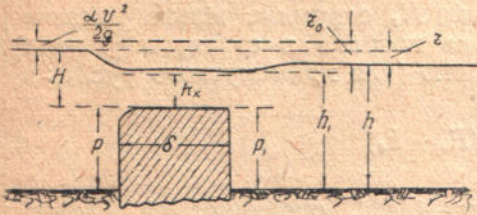


Рис. 11.

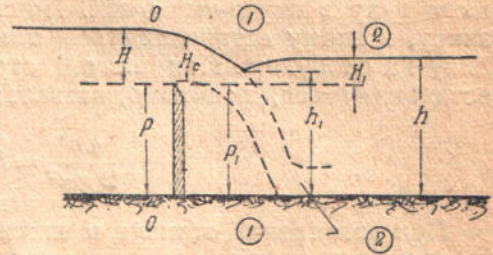


Рис. 12.

тиску від гідростатичного закону. Але, як показують досліди, відхилення практично незначні і ними можна нехтувати. Нехтуючи проекцією сили тертя на ділянці між перерізами 1—1 і 2—2 (рис. 12), для прямокутного русла рівняння закону кількостей руху запишемо в такому вигляді (при $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$):

$$\frac{\alpha Q^2}{g\omega} - \frac{\alpha Q^2}{g\omega_c} = \frac{bh_1^2}{2} - \frac{Bh^2}{2} + \frac{(B-b)h_1^2}{2} \quad (63)$$

В залежності (63):

$\frac{(B-b)h_1^2}{2}$ — горизонтальна складова тиску в напрямі осі потоку на бічні стінки водозливу при ширині потоку B більшій, ніж ширина водозливу b ;

$\omega_c = bh_c$ — площа перерізу струмни за порогом водозливу.

Розв'язуючи рівняння (63) щодо h_1 , одержимо:

$$h_1 = \sqrt{h^2 - \frac{2\alpha Q^2}{gB^2} \left(\frac{Bh - bh_c}{bh_c h} \right)} \quad (64)$$

Це і є загальна залежність для визначення глибини h_1 в руслі прямокутного перерізу при ширині B водотоку, яка не дорівнює ширині b водозливу.

Рівняння (64) трохи спрощується для випадку, коли B і b рівні.

Глибина h_1 при рівності B і b визначається залежністю:

$$h_1 = \sqrt{h^2 - \frac{2\alpha q^2}{g} \left(\frac{h - h_c}{hh_c} \right)} \quad (65)$$

Для визначення глибини h_1 треба мати як вихідні величини: витрату, побутову глибину h в нижньому б'єфі і переріз струмни за порогом водозливу. Найбільші труднощі може мати саме визначення перерізу $\omega_c = bh_c$ струмни чи товщини її h_c . Дослідні дані показують, що для прямокутного водозливу в тонкій стінці H_c товщина струмни у звуженому перерізі

над порогом водозливу є величиною, яка залежить від напору H . За дослідними даними залежність між H_c і H для водозливу в тонкій стінці виражається такими співвідношеннями¹⁾:

за Шімеми (Schimemi) — $H_c = 0,658 H$,

за Базеном (Bazin) — $H_c = 0,668 H$,

за Буссінеском (M. Boussinesq) — $H = 0,667 H_c$.

Не менш стійкою величиною при заданому напорі H є і товщина струмини над порогом водозливів практичних профілів, а також при протіканні через водозлив з широким порогом при певних умовах входу²⁾. Умови протікання рідини над порогом водозливу є одночасно і початковими умовами руху в нижньому б'єфі. Починаючи від перерізу над порогом водозливу, в якому встановлюється товщина H_c , струмина вільно падає в рідину за спорудою. При відгоні стрибка глибина в стиснутому перерізі встановлюється, як відомо, за залежністю (для прямокутного русла):

$$\frac{\alpha q^2}{2 g \varphi^2} = h_c^2 (E_0 - h_c) \quad (66)$$

При затопленні стрибка в нижньому б'єфі, очевидно, ця залежність незастосовна: над струминою тиск не атмосферний, як це має місце при відгоні стрибка, а більший, обумовлений тиском стовпа рідини, висота якого приблизно дорівнює глибині h води в нижньому б'єфі. В дійсності тиск, очевидно, повинен бути менше висоти h , тому що за водозливом спостерігається, як уже сказано, зниження рівня порівнюючи з побутовим. Не враховуючи опорів від порога до стиснутого перерізу, як і зниження рівня за водозливом, з рівності величини питомої енергії перерізу $0-0$ і $I-I$ маємо:

$$E_0 = \frac{v_c^2}{2g} + h,$$

звідки:

$$\frac{v_c^2}{2g} = E_0 - h \quad (67)$$

З рівняння (67) виходить, що за рахунок збільшення тиску стовпа рідини над струминою швидкість у стиснутому перерізі зменшується. Щождо глибини h_c , то остання зростає. Очевидно, рівняння (67) застосовне тільки в тому випадку, коли струмина, що стікає з водозливу, занурюється у воду в нижньому б'єфі, а не рухається по поверхні, що спостерігається при значному перевищенні побутової глибини над порогом водозливу.

Слід зауважити, що нехтування опорами від порога водозливу і до стиснутого перерізу, як і зниження рівня за водозливом, не повинно помітно впливати на кінцеві результати розрахунків по визначенню глибини h_c . Зниження рівня до глибини h_1 , а разом з ним і тиску, дає, загалом кажучи, зменшення глибини h_c (збільшення швидкості $\frac{v_c^2}{2g}$); за рахунок же опорів глибина h_c повинна збільшитись. В зв'язку з цим і можна, очевидно, вважати, що нехтування опорами і зниження рівня не відбивається кінцею-кінцем на величині глибини h_c . Дослідна перевірка підтвер-

¹⁾ А. С. Офицеров, Профиль водосливных плотин, ОНТИ, 1935.

²⁾ Проф. Г. Й. Сухомел при розв'язанні задачі по визначенню умов протікання над порогом водозливу з широким порогом у нижньому б'єфі вводить у розгляд перерізи над порогом і за ним—див. проф. Г. Й. Сухомел, Нерівномірний рух рідини у відкритих руслах і гідротехнічних спорудах, рукопис.

джує це положення. В табл. 5 наводимо матеріали дослідних даних, одержаних при дослідженні умов руху через водозлив практичного профіля (рис. 13). Зливна поверхня водозливу окреслена за координатами

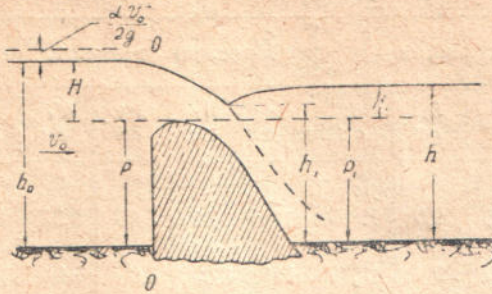


Рис. 13.

Крігера (Creager); напірна грань вертикальна¹⁾. Ширина лотуку і водозливу $b = 232$ мм.

Таблиця 5

Водозлив практичного профіля

№№ дослідів	Виміряні величини					Обчислені величини				Примітка
	Q л/сек	ρ см	H см	h_1 см	h см	v_c см/сек	h_c см	h_k см	h'_1 см	
1	3,64	24,0	4,56	23,0	23,74	97,2	1,62	2,93	23,3	При розрахунках прийнято $\alpha = 1,0$
2	3,64	24,0	4,56	25,38	25,83	73,2	2,15	2,93	25,4	
3	3,64	24,0	4,81	27,4	27,73	46,0	3,41	2,93	27,5	
4	3,64	24,0	5,16	28,19	28,47	36,8	4,27	2,93	28,3	
5	4,83	24,2	5,13	18,88	20,23	133,7	1,56	3,53	18,9	
6	4,83	24,3	5,08	23,78	24,60	96,8	2,15	3,53	23,8	
7	4,82	24,3	5,33	27,85	28,23	52,4	3,98	3,45	27,9	
8	9,5	18,2	7,5	15,53	18,28	120,8	3,39	5,55	15,9	
9	9,5	18,2	7,58	18,6	20,53	101,4	4,04	5,55	18,8	
10	9,5	18,2	7,6	21,38	22,58	79,5	5,15	5,55	21,4	
11	9,5	18,3	8,08	24,6	25,30	46,0	8,90	5,55	24,8	
12	9,5	18,3	10,2	26,98	27,6	—	—	5,55	—	
13	7,63	18,3	6,6	15,03	17,35	121,7	2,70	4,79	15,2	
14	7,63	18,3	6,64	21,6	22,53	68,7	4,79	4,79	21,7	
15	7,63	18,3	6,9	23,05	23,84	51,7	6,36	4,79	23,3	
16	7,63	18,3	8,34	25,68	25,95	—	—	4,79	—	Струмина коло вільної поверхні
17	10,7	18,3	7,86	15,48	18,6	121,7	3,79	6,01	16,0	
18	10,7	18,3	7,90	18,05	20,38	106,8	4,32	6,01	18,4	
19	10,7	18,3	8,0	21,33	22,73	83,7	5,51	6,01	21,4	
20	10,7	18,3	8,25	23,73	24,75	59,5	7,76	6,01	24,0	
21	10,7	18,3	9,06	25,68	26,15	—	—	6,01	—	Струмина коло вільної поверхні

В табл. 6²⁾ наводимо аналогічні дослідні дані для прямокутного водозливу в тонкій стінці (рис. 12). Ширина лотуку і водозливу $b = 232$ мм.

¹⁾ Досліди проведенні в гідравлічній лабораторії Київського гідромеліоративного інституту автором спільно з інж. Я. В. Тимошенком.

²⁾ Досліди проведенні в гідравлічній лабораторії Київського гідромеліоративного інституту інж. Я. В. Тимошенка.

Таблиця 6

Водозлив в тонкій стінці

№№ досліду	Виміряні величини					Обчислені величини				Примітка
	Q л/сек	p см	H см	h_1 см	h см	v_c см/сек	h_c см	h_k см	h'_1 см	
5	8,25	12,1	6,85	9,5	12,35	114	3,12	5,05	9,53	Під струминою немає повітря
6	8,25	12,1	7,00	9,0	12,35	115	3,09	5,05	9,84	Під струминою повітря і валець висотою 11,0 см
7	8,55	12,1	7,2	12,0	14,45	97,5	3,65	5,05	12,31	Струмина коло вільної поверхні
8	8,25	12,1	7,56	14,5	16,1	83,6	4,25	5,05	14,66	
9	8,25	12,1	8,19	—	18,0	—	—	5,05	—	
12	4,3	12,1	4,45	7,5	9,4	118,5	1,56	3,27	7,14	Під струминою немає повітря
13	4,3	12,1	4,73	7,06	9,45	122,0	1,52	3,27	7,11	Під струминою повітря і валець висотою 8,95 см
14	4,3	12,1	4,58	9,5	11,25	103,2	1,80	3,27	9,68	Під струминою немає повітря
15	4,3	12,1	4,70	9,45	11,28	104,0	1,78	3,27	9,70	Під струминою повітря і валець висотою 10,9 см
16	4,3	12,1	4,89	12,33	13,43	83,6	2,22	3,27	12,44	Струмина коло вільної поверхні
17	4,3	12,1	5,39	—	15,30	—	—	3,27	—	
18	4,3	12,1	5,7	—	16,05	—	—	3,27	—	Т е ж
21	6,7	12,1	5,8	7,0	10,6	120	2,41	4,40	7,61	Під струминою немає повітря
22	6,7	12,1	6,11	7,05	10,6	122	2,36	4,40	7,48	Під струминою повітря і валець товщиною 9,0 см
23	6,7	12,1	6,00	9,45	12,0	109	2,64	4,40	9,69	Під струминою немає повітря
24	6,7	12,1	6,18	9,38	12,0	111	2,60	4,40	9,64	Під струминою повітря і валець товщиною 11,0 см
25	6,7	12,1	6,29	12,25	14,0	92,8	3,11	4,40	12,39	Струмина коло вільної поверхні
26	6,7	12,1	6,90	15,1	16,25	73,5	3,93	4,40	15,2	
27	6,7	12,1	7,68	—	18,0	—	—	4,40	—	
30	9,9	12,1	7,58	7,50	12,0	123	4,48	5,71	8,26	Під струминою немає повітря
31	9,9	12,1	7,65	7,50	12,0	123	3,47	5,71	8,23	Під струминою повітря і валець товщиною 11,0 см
32	9,9	12,1	7,90	11,28	14,28	106	4,04	5,71	11,74	Струмина коло вільної поверхні
33	9,9	12,1	8,39	14,4	16,35	90,1	4,74	5,71	14,53	
34	9,9	12,1	8,89	—	18,08	—	—	5,71	—	
35	9,9	12,1	9,59	—	19,15	—	—	5,71	—	Т е ж

При розрахунках прийнято $\alpha = 1,0$

Як видно з наведених у табл. 5 і 6 матеріалів, залежність (65) дає значення глибин h_1 , які добре збігаються з вимірними в дослідах h_1 (за водозливом). Тому можна вважати, що задача по визначенню глибини h_1 розв'язується практично досить просто і з достатньою точністю.

Торкаючись питання про встановлення критерію затопленості водозливів, слід відзначити, що на перший погляд споруду можна розглядати як затоплену, коли коливання рівня в нижньому б'єфі відбиваються на зміні напору як рівня перед спорудою. Але коливання напору H можна спостерігати і в тому випадку, коли рівень з низової сторони нижче порога водозливу. При русі рідини через водозлив у тонкій стінці при ширині його b , рівній ширині потоку, може мати місце прилипання струмни до стінки. Поряд з цим можуть установитись і такі умови руху, коли під струминою утворюється валець і над ним (в просторі між струминою і вальцем) повітряний прошарок. При сталій витраті Q величина напору над порогом водозливу коливається залежно від того, чи є під струминою простір, заповнений повітрям, чи повітряного прошарку немає. В тому випадку, коли струмина прилипає до стінки, коливання рівня в нижньому б'єфі відбиваються на величині напору над порогом водозливу навіть і в тому випадку, коли побутова глибина h менша величини p . З збільшенням глибини h напір над порогом водозливу теж зростає, але лишається весь час меншим того напору, який спостерігається над порогом при наявності під струминою повітря. При наявності повітря під струминою коливання рівня в нижньому б'єфі зовсім не відбиваються на величині напору над порогом водозливу до того часу, поки рівень з низової сторони (у безпосередній близькості до стінки) не стане вище порога водозливу. Щодо повітряного мішка під струминою, то він теж може утворитись тільки в тому випадку, коли глибина в нижньому б'єфі менша висоти порога водозливу. Викладені міркування щодо впливу зміни рівня з низової сторони на коливання величини напору над порогом водозливу добре ілюструються дослідними даними, наведеними в табл. 7¹⁾.

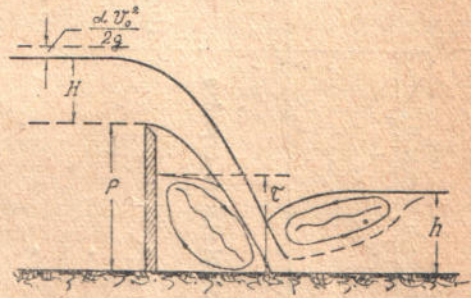


Рис. 14.

З неведених у табл. 7 дослідних матеріалів видно, що коли в розрахунок вводити напір, який спостерігається в тому разі, коли під струминою є повітря, то вплив рівня з низової сторони відбивається на зміні (збільшенні) напору не в той момент, коли глибина h стає рівною p , а значно пізніше (досліди 5, 6). Вплив виявляється саме в той момент, коли h_1 досягає ребра порога водозливу (досліди 7, 16, 25) або стає вище його.

Поряд з цим слід відзначити такі два моменти, які спостерігались у дослідах при русі через водозлив у тонкій стінці. При наявності під струминою повітря і вальця, товщина (висота) останнього звичайно значно вища глибини за струминою (рис. 14). Крім того, струмина в нижньому б'єфі при певному затопленні падає звичайно вниз. Але при певному перевищенні рівня з низової сторони над порогом водозливу струмина змінює свій напрям і рухається по поверхні рідини в нижньому б'єфі

¹⁾ Описані тут явища, які спостерігаються при русі рідини через водозлив у тонкій стінці, давно по суті відомі з досліджень Базена.

Таблиця 7

№ дослідів	Виміряні величини						Обчислені величини		Примітка
	Q л/сек	p см	H см	h ₀ см	h ₁ см	h см	h _к см при		
							α=1,0	α=1,1	
1	8,25	12,1	6,6	18,7	—	—	5,05	5,21	В нижньому б'єфі відгин стрибка
2	8,25	12,1	6,8	18,9	—	—	5,05	5,21	Під струминою немає повітря
3	8,25	12,1	6,63	18,73	—	—	5,05	5,21	Під струминою повітря і валець висотою 9,0 см
4	8,25	12,1	7,0	19,1	—	—	5,05	5,21	Під струминою повітря немає
5	8,25	12,1	6,85	18,75	9,5	12,35	5,05	5,21	Під струминою повітря і валець висотою 9,0 см
6	8,25	12,1	7,0	19,1	9,0	12,35	5,05	5,21	Під струминою повітря немає
7	8,25	12,1	7,2	19,3	12,0	14,45	5,05	5,21	Під струминою повітря і валець висотою 11,0 см
8	8,25	12,1	7,56	19,66	14,5	16,1	5,05	5,21	Струмина коло вільної поверхні
9	8,25	12,1	8,19	20,29	—	18,0	5,05	5,21	Під струминою повітря немає
10	4,3	12,1	4,34	16,44	—	7,13	3,27	3,38	Під струминою повітря і валець товщиною 6,6 см
11	4,3	12,1	4,75	16,85	—	7,1	3,27	3,38	Під струминою повітря немає
12	4,3	12,1	4,45	16,85	7,5	9,4	3,27	3,38	Під струминою повітря і валець товщиною 8,95 см
13	4,3	12,1	4,73	16,83	7,06	9,45	3,27	3,38	Під струминою повітря немає
14	4,3	12,1	4,58	16,68	9,5	11,25	3,27	3,38	Під струминою повітря і валець товщиною 8,95 см
15	4,3	12,1	4,70	16,8	9,45	11,28	3,27	3,38	Під струминою повітря немає

Струмина коло вільної поверхні

В нижньому б'єфі відгин стрибка

3,27

13,43

12,3

16,99

4,59

12,1

4,3

16

16	4,3	12,1	4,9	10,99	12,33	13,43	3,27	3,36	Струмина коло вільної поверхні
17	4,3	12,1	5,39	17,49	—	15,30	3,27	3,38	"
18	4,3	12,1	5,7	17,8	—	16,05	3,27	3,38	Під струминою повітря немає
19	6,7	12,1	5,71	17,81	—	—	4,40	4,54	Під струминою повітря і валець товщиною 7,0 см
20	6,7	12,1	6,11	18,21	—	—	4,40	4,54	Під струминою повітря немає
21	6,7	12,1	5,8	17,9	7,0	10,6	4,40	4,54	Під струминою повітря і валець товщиною 9,0
22	6,7	12,1	6,11	18,21	7,05	10,6	4,40	4,54	Під струминою повітря немає
23	6,7	12,1	6,00	18,1	9,45	12,0	4,40	4,54	Під струминою повітря і валець товщиною 11,0
24	6,7	12,1	6,18	18,28	9,38	12,0	4,40	4,54	"
25	6,7	12,1	6,29	18,39	12,25	14,0	4,40	4,54	"
26	6,7	12,1	6,90	19,0	15,1	16,25	4,40	4,54	Струмина коло вільної поверхні
27	6,7	12,1	7,68	19,78	—	18,0	4,40	4,54	Під струминою повітря немає
28	9,9	12,1	7,49	19,59	—	—	5,71	5,89	Під струминою повітря і валець товщиною 9,0 см
29	9,9	12,1	7,70	19,8	—	—	5,71	5,89	Під струминою повітря немає
30	9,9	12,1	7,58	19,68	7,5	12,0	5,71	5,89	Під струминою повітря і валець товщиною 11,0 см
31	9,9	12,1	7,65	19,75	7,5	12,0	5,71	5,89	Струмина коло вільної поверхні
32	9,9	12,1	7,90	20,0	11,28	14,28	5,71	5,89	"
33	9,9	12,1	8,39	20,49	14,4	16,35	5,71	5,89	"
34	9,9	12,1	8,89	20,99	—	18,08	5,71	5,89	"
35	9,9	12,1	9,59	21,69	—	19,15	5,71	5,89	"

(досліди 9, 17, 18, 27, 34 і 35). Повторення дослідів дало ті ж результати. Судячи з підрахунків, струмина починає рухатись по поверхні рідини в нижньому б'єфі, а не падати вниз в тому випадку, коли перевищення з низової сторони над порогом водозливу стає рівним h_k . Хоч треба вказати, що, очевидно, h_k для водотоку і h_{k1} для водозливу не рівні між собою. Для водозливу в умовах викривлення струмин розподіл швидкостей буде інший, ніж у потоці. Звідси і h_{k1} , мабуть, відрізняться від h_k водотоку. В табл. 7 наведені значення h_k водотоку.

Основне завдання постановки дослідів для характеристики умов протікання рідини через водозлив у тонкій стінці—показати незадовільне розв'язання задачі щодо врахування затопленості для водозливів практичних профілів. При цьому прийнято такий спосіб порівняння дослідних даних. Витрата через водозлив, які відомо, пропорціональна

коефіцієнтові затоплення σ_n і величині H^2 . Якщо відомий напір H над порогом водозливу при якійсь певній витраті Q в умовах відсутності впливу затоплення, і вимірний при тій же витраті напір H_x при затопленні, то відношення $\frac{H^2}{H_x^2}$ повинно, власне кажучи, давати числову вели-

чину σ_n . Для водозливу в тонкій стінці таке порівняння дає результати цілком задовільні, якщо приймати значення σ_n за Базеном. Щодо водозливу практичного профіля, то, як показують дослідні дані і врахування затоплення, і критерій затопленості не погоджуються з існуючими нормативами. В табл. 8 наводимо матеріали експериментальних даних по дослідженню руху рідини через водозлив практичного профіля з вертикальною гранню і зливною, окресленою за координатами Крігера при $H = 7,5$ см.

Як показують досліди, умови протікання у верхньому б'єфі (напір над порогом водозливу H) не змінюються не тільки при певному перевищенні побутової глибини h над порогом водозливу (досліди 2, 6, 8, 9, 10, 14, 17), але навіть і в тому разі, коли h_1 стає більше p_1 (досліди 2, 9, 10, 14), і тільки в досліді 19 виявлено, що перевищення глибини h_1 над порогом водозливу відразу відбилось (хоч і дуже незначно) на підвищенні напору. Звідси, очевидно, виходить, що загальноприйнятий критерій затопленості водозливів практичних профілів ($h > p_1$ і $\frac{z}{p_1} < 0,70$) не дає змоги встановити початок дійсної границі затоплення. З безперечною очевидністю виходить, що водозлив не є затопленим, якщо тільки побутовий рівень досягає порога водозливу. Як критерій затопленості треба вводити не побутову глибину h , а глибину h_1 за водозливом, яка звичайно менша h . Щодо врахування затопленості величиною σ_n , то, як це видно з табл. 8, результати далеко не погоджуються з дослідними даними: розходження досягають при σ_n за Гершелем 22,0—23,0%, а коли прийняти значення за Моріцом, то розходження будуть ще більші (до 50,0%), при чому значення σ_n і за Моріцом і за Гершелем, як правило, даються зменшені. Таким чином, існуючі методи врахування затоплення дають перебільшені розміри отворів споруд, до розрахунку яких застосовується теорія розрахунку затоплених водозливів практичних профілів.

Проведені досліди по вивченню затоплення водозливів дозволяють твердити, що затоплення слід розглядати залежно не від співвідношення h і p_1 , а від співвідношення глибини h_1 і висоти порога p_1 .

Дослідження впливу затоплення треба, очевидно, провадити окремо для вакуумних профілів і безвакуумних. Для вакуумних профілів, як і для

№ дослідів	Виміряні величини					Обчислені величини					Примітка		
	Q л/сек	P см	H см	h_0 см	h_1 см	h см	h_k см при $\alpha=1,0$	$z = \frac{h_0 - h}{\text{см}}$	$\frac{H_1}{H} = \frac{h_1 - p}{\text{см}}$	σ_n		$\frac{z}{H^2}$	$\frac{z}{H^2}$
	$\alpha=1,1$												
1	3,64	24,0	4,56	28,56	23,0	23,74	2,93	3,02	4,82	—	1,00	9,74	1,00
2	3,64	24,0	4,56	28,56	25,38	25,88	2,93	3,02	2,73	1,83	0,956	9,74	1,00
3	3,64	24,0	4,81	28,81	27,4	27,73	2,93	3,02	1,08	3,73	0,775	10,52	0,926
4	3,64	24,0	5,16	29,16	28,19	28,47	2,93	3,02	0,69	4,47	0,866	11,74	0,830
5	4,83	24,2	5,13	29,33	18,88	20,23	3,53	3,65	9,10	—	1,00	11,62	1,00
6	4,83	24,3	5,08	29,38	23,78	24,60	3,53	3,65	4,78	0,3	0,059	11,46	1,00
7	4,83	24,3	5,33	29,63	27,85	28,23	3,53	3,65	1,40	3,93	0,737	12,32	0,944
8	9,5	18,2	7,5	25,70	15,53	18,28	5,55	5,73	7,42	0,08	0,01	20,53	1,00
9	9,5	18,2	7,58	25,78	18,6	20,53	5,55	5,73	5,25	2,33	0,307	20,88	0,984
10	9,5	18,2	7,60	25,80	21,38	22,58	5,55	5,73	3,22	4,38	0,576	20,98	0,980
11	9,5	18,3	8,08	26,38	24,6	25,30	5,55	5,73	1,08	7,0	0,866	23,0	0,893
12	9,5	18,3	10,2	28,5	26,98	27,60	5,55	5,73	0,90	9,3	0,912	32,58	0,630
13	7,63	18,3	6,6	24,9	15,03	17,35	4,79	4,95	7,55	—	—	16,97	1,00
14	7,63	18,3	6,64	24,94	21,6	22,53	4,79	4,95	2,41	4,23	0,637	17,12	0,991
15	7,63	18,3	6,9	25,2	23,05	23,84	4,79	4,95	1,46	5,54	0,803	18,13	0,936
16	7,63	18,3	8,34	26,64	25,68	25,95	4,79	4,95	0,69	7,65	0,917	24,08	0,705
17	10,7	18,3	7,86	26,16	15,48	18,6	6,01	6,20	7,56	0,3	0,038	22,05	1,000
18	10,7	18,3	7,90	26,2	18,05	20,38	6,01	6,20	5,82	2,08	0,263	22,23	0,992
19	10,7	18,3	8,0	26,3	21,33	22,73	6,01	6,20	3,57	4,43	0,554	22,63	0,974
20	10,7	18,3	8,25	26,55	23,73	24,75	6,01	6,20	1,80	6,45	0,782	23,72	0,930
21	10,7	18,3	9,06	27,36	25,68	26,15	6,01	6,20	1,21	7,85	0,866	27,2	0,812

h_0 —глибина перед водозливом в перерізі, де провадилися вимірювання напорів

Значення σ_n прийняті за Гершелем (табл. 3) і лише для дослідів 12 і 16—за Моріцом, щоб уникнути мало надійної інтерполяції для σ_n за Гершелем при

$$\frac{H_1}{H} > 0,90$$

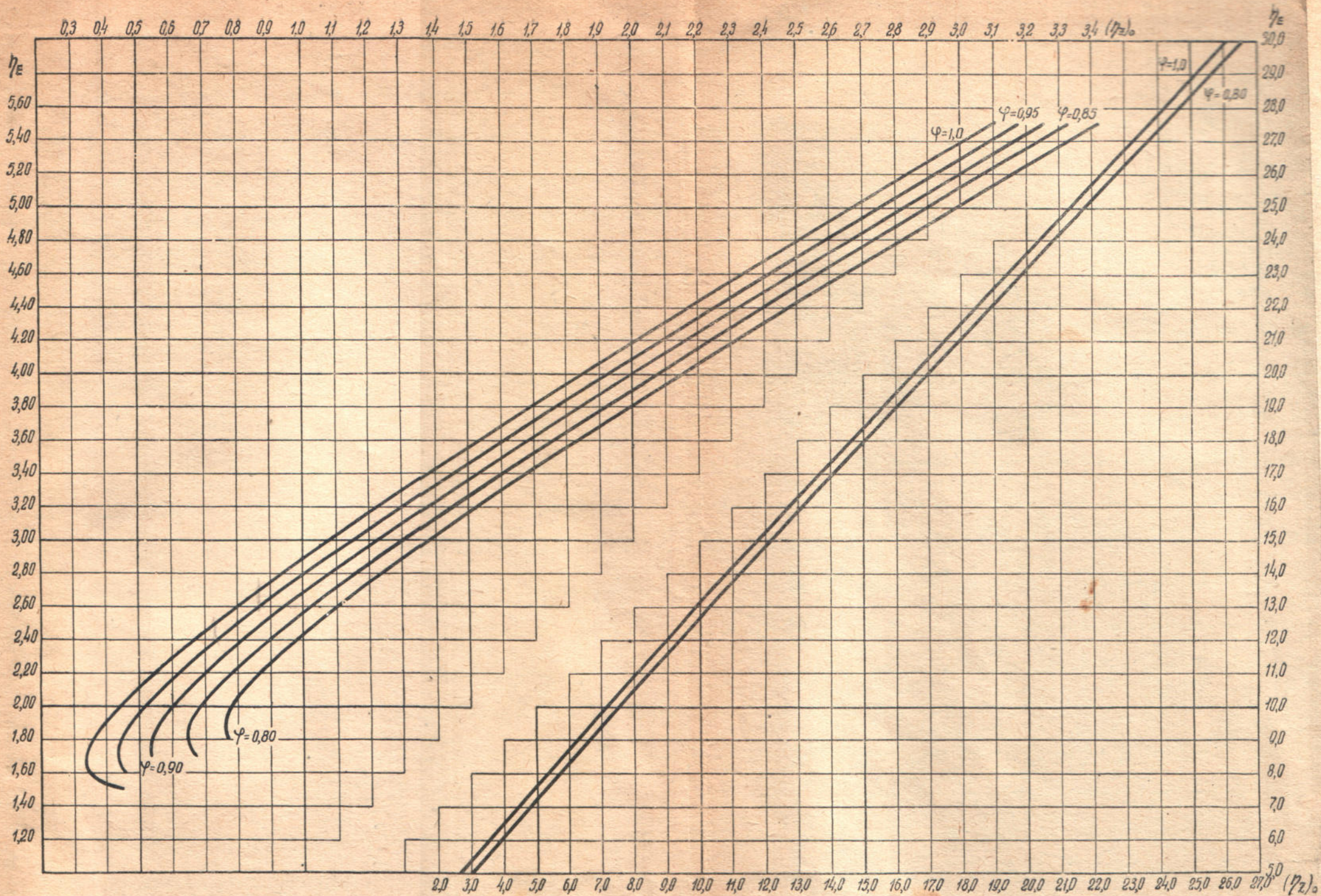
водозливу в тонкій стінці, вплив затоплення починає виявлятися, як тільки h_1 стає вище p_1 (табл. 7 і досліди 17—21¹⁾ в табл. 8). Для безвакуумних профілів вплив затоплення виявляється не відразу після того, як глибина h_1 стане більшою p_1 , а з деяким запізненням.

Є підстави вважати, що для безвакуумних профілів, як і для водозливу з широким порогом, затоплення настає тільки в тому разі, коли глибина h_1 стає більша $p_1 + h_k$. Проведених дослідів, звичайно, явно не досить, щоб зробити якінебудь остаточні висновки (це й не входить в завдання роботи) щодо врахування затопленості водозливів і встановлення критерію затопленості. Безперечно одне — питання про затоплення водозливів для уточнення гідравлічних розрахунків отворів гідротехнічних споруд вимагає всебічного дослідження.

21. XII 1939.

м. Київ

¹⁾ Напір H для цієї групи дослідів перевищував розрахунковий 7,5 см.



Графік I. Розв'язання рівняння

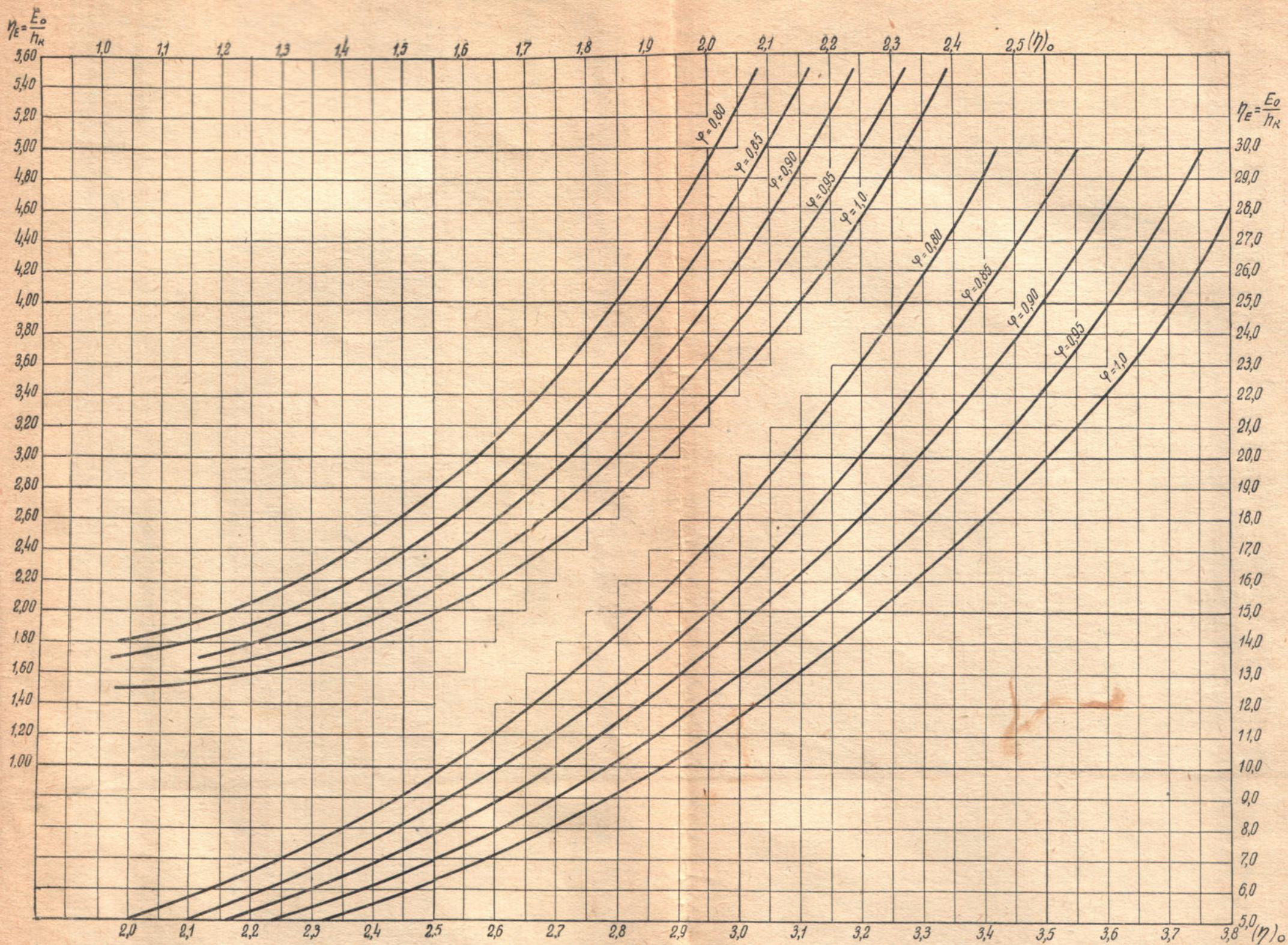
$$(\eta_z)_0 = \eta_E - \frac{\eta_c}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{8}{\eta_c^3}} - 1 \right]$$

для визначення форми супрягання б'єфів у спорудах прямокутного перерізу. В рівнянні:

$$\eta_E = \frac{E_0}{hk} \quad \text{і} \quad \eta_c = \frac{hc}{hk}$$

При $(\eta_z)_0 = \eta_z$ — критична форма супрягання б'єфів.
 При $\eta_z > (\eta_z)_0$ — супрягання б'єфів з відгоном стрибка.
 При $(\eta_z)_0 > \eta_z$ — супрягання б'єфів з затопленим стрибком.
 $(\eta_z)_0 = F(\eta_E)$ — визначається за графіком.

$$\eta_z = \frac{z_0}{hk} = \frac{E_0 - h}{hk}$$



Графік II. Розв'язання рівняння

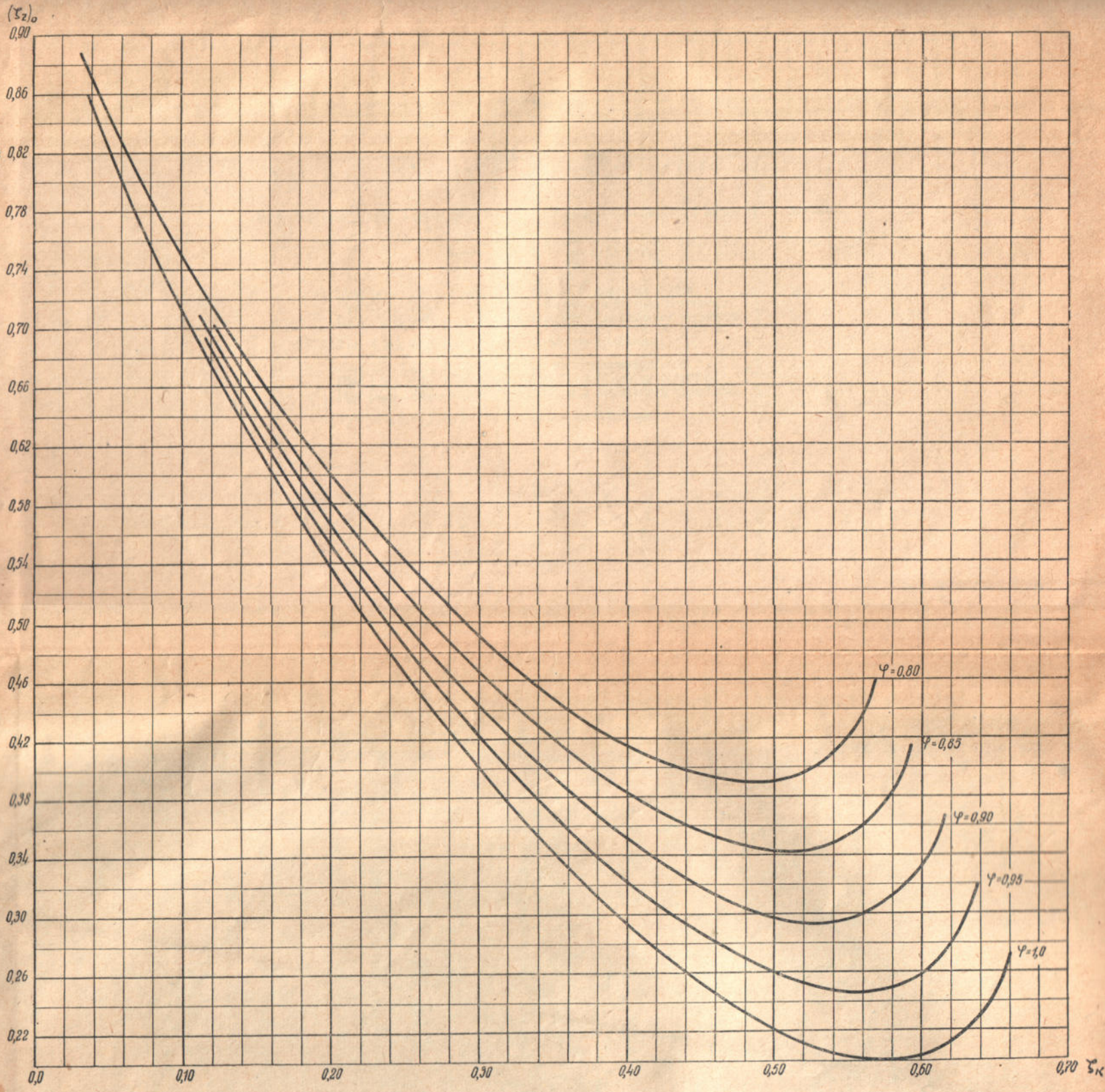
$$\eta_0 = \frac{\eta_c}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{8}{\eta_c^3} - 1} \right]$$

для визначення форми супрягання б'єфів у спорудах прямокутного перерізу. В рівнянні

$$\eta_c = \frac{h_c}{h_k} = f(\eta_E)$$

При $\eta = \eta_0$ — критична форма супрягання б'єфів.
 При $\eta_0 > \eta$ — супрягання б'єфів з відгоном стрибка.
 При $\eta > \eta_0$ — супрягання б'єфів з затопленим стрибком.
 $\eta_0 = f(\eta_c) = F_1(\eta_E)$ — визначається за графіком.

$$\eta = \frac{h}{h^k}$$



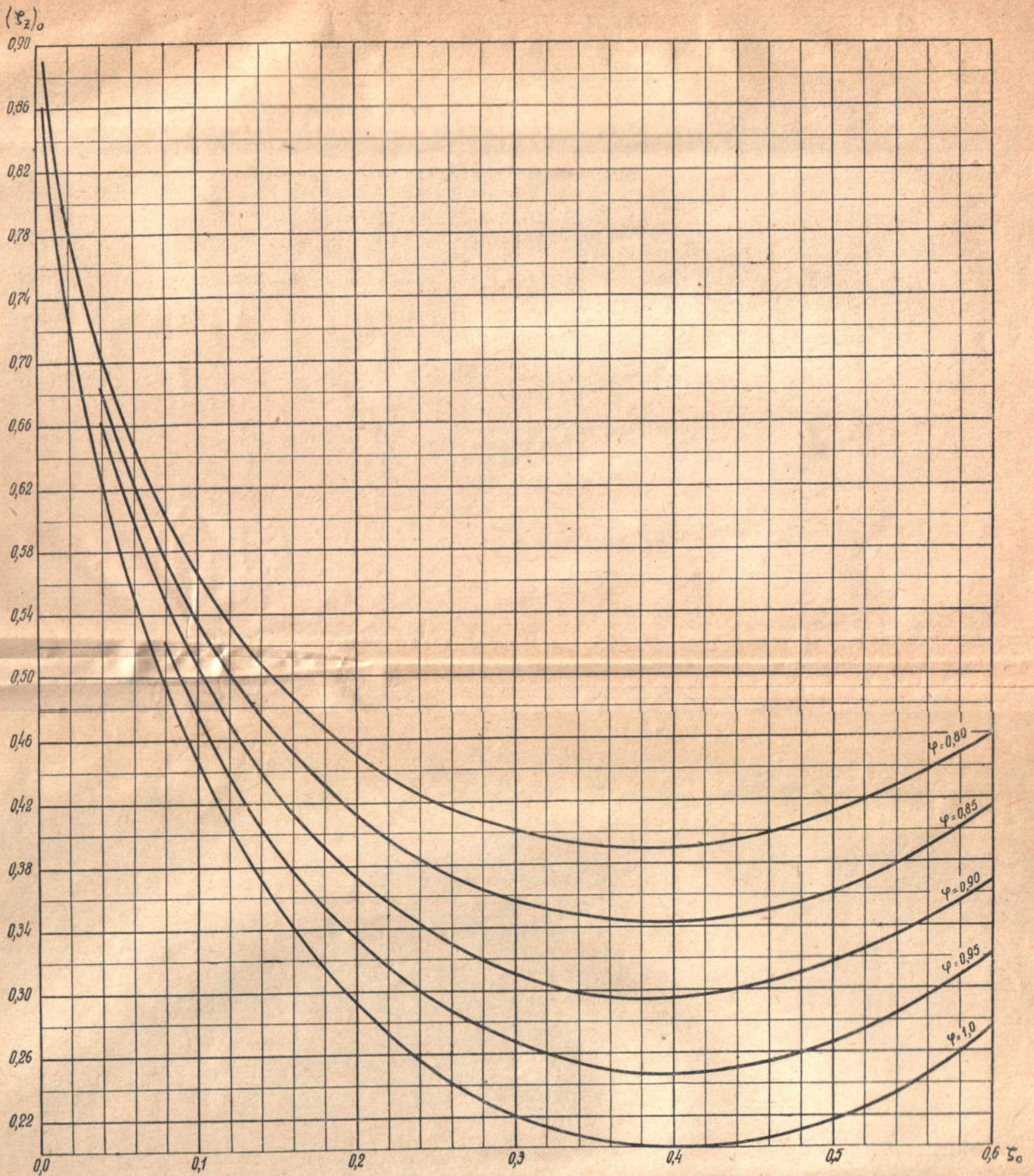
Графік III. Розв'язання рівняння

$$(\zeta_z)_0 = 1 - \frac{\zeta_c}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{8\zeta_k^3}{\zeta_c^3}} - 1 \right] = F(\zeta_k)$$

для визначення форми супрягання б'єфів у спорудах прямокутного перерізу. В рівнянні

$$\zeta_c = \frac{hc}{E_0}; \quad \zeta_k = \frac{hk}{E_0}; \quad \zeta_z = \frac{z_0}{E_0}$$

- При $\zeta_z = (\zeta_z)_0$ — критична форма супрягання б'єфів.
- При $\zeta_z > (\zeta_z)_0$ — супрягання б'єфів з відгоном стрибка.
- При $(\zeta_z)_0 > \zeta_z$ — супрягання б'єфів з затопленим стрибком.
- Тут $(\zeta_z)_0 = F(\zeta_k)$ — визначається за графіком.
- При $(\zeta_k)_0 = \zeta_k$ — критична форма супрягання б'єфів.
- При $\zeta_k > (\zeta_k)_0$ — супрягання б'єфів з відгоном стрибка.
- При $(\zeta_k)_0 > \zeta_k$ — супрягання б'єфів з затопленим стрибком.
- Тут $(\zeta_k)_0 = F_1(\zeta_z)$ — визначається за графіком.



Графік IV. Розв'язання рівняння

$$(\zeta_z)_0 = 1 - \frac{\zeta_c}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{8\zeta_k^3}{\zeta_c^3}} - 1 \right] = F(\zeta_c)$$

для визначення форми супрягання б'єфів у спорудах прямокутного перерізу. В рівнянні

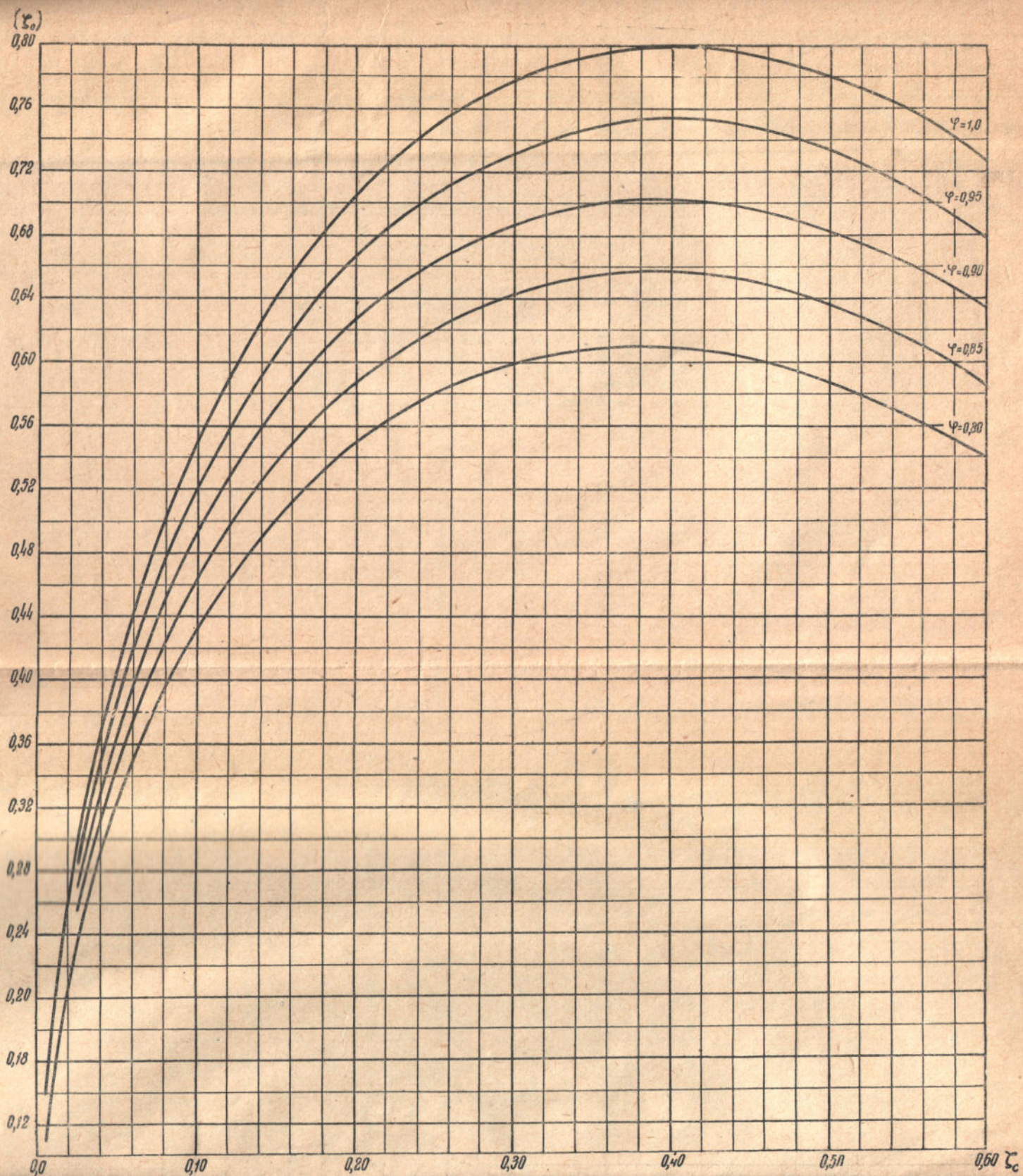
$$\zeta_c = \frac{h_c}{E_0}; \quad \zeta_k = \frac{hk}{E_0}; \quad \zeta_z = \frac{z_0}{E_0}$$

При $\zeta_z = (\zeta_z)_0$ — критична форма супрягання б'єфів.
 При $\zeta_z > (\zeta_z)_0$ — супрягання б'єфів з відгоном стрибка.
 При $(\zeta_z)_0 > \zeta_z$ — супрягання б'єфів з затопленим стрибком.

Тут $(\zeta_z)_0 = F(\zeta_c)$ — визначається за графіком.

При $\zeta_c = (\zeta_c)_0$ — критична форма супрягання б'єфів.
 При $(\zeta_c)_0 < \zeta_c$ — супрягання б'єфів з відгоном стрибка.
 При $(\zeta_c)_0 > \zeta_c$ — супрягання б'єфів з затопленим стрибком.

Тут $(\zeta_c)_0 = f(\zeta_z)$ — визначається за графіком.



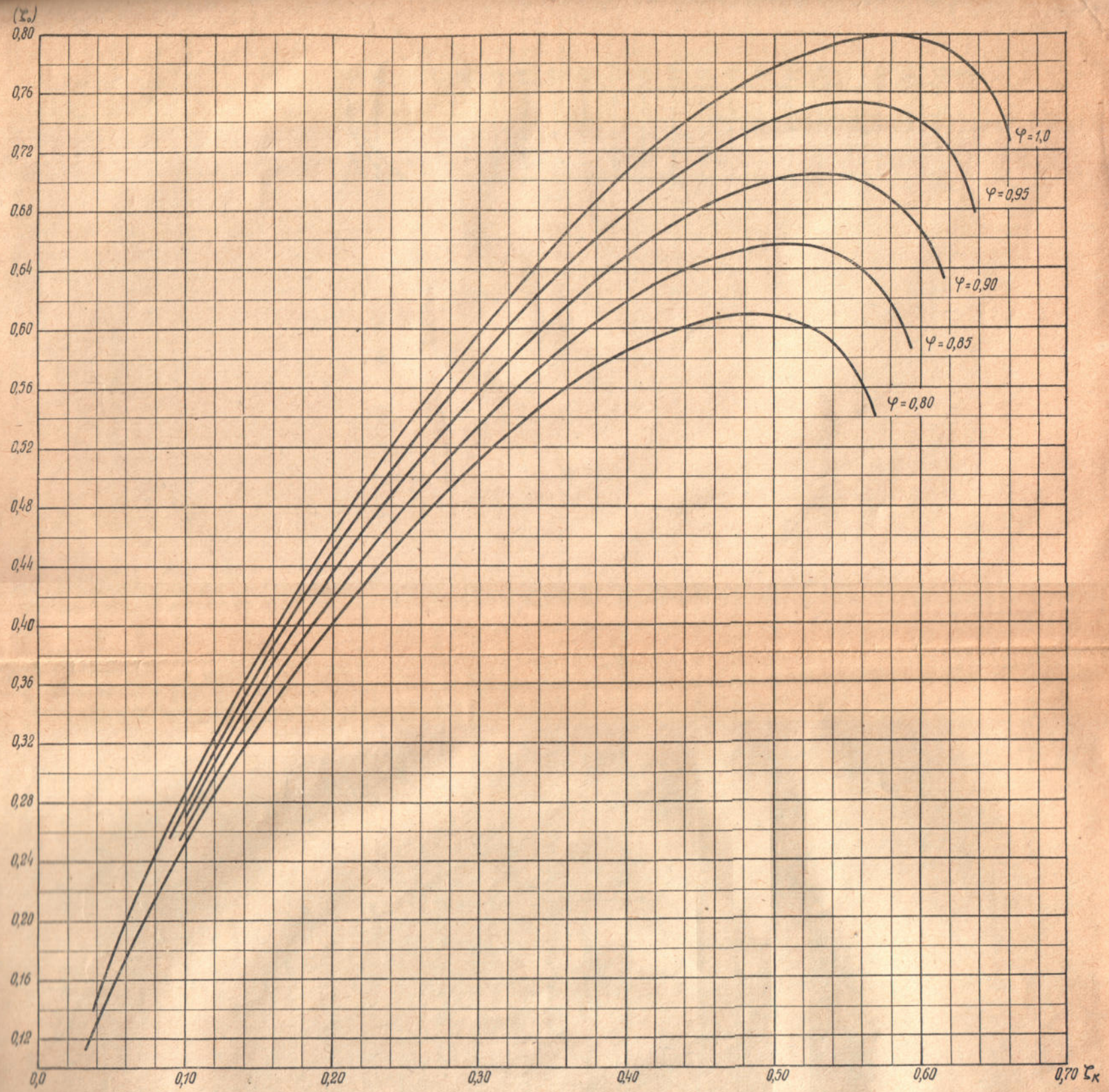
Графік V. Розв'язання рівняння

$$\zeta_0 = \frac{\zeta_c}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{8v_k^3}{\zeta_c^3}} - 1 \right] = F_1(\zeta_c)$$

для визначення форми супрягання б'єфів в спорудах прямокутного перерізу. В рівнянні

$$\zeta_c = \frac{hc}{2}; \quad \zeta_k = \frac{hk}{E_0}; \quad \zeta = \frac{h}{E_0}$$

- При $\zeta_0 = \zeta$ — критична форма супрягання б'єфів.
 При $\zeta_0 < \zeta$ — супрягання б'єфів з відгоном стрибка.
 При $\zeta_0 > \zeta$ — супрягання б'єфів з затопленим стрибком.
 $\zeta_0 = F_1(\zeta_c)$ — визначається за графіком.
 При $\zeta_c = (\zeta_c)_0$ — критична форма супрягання б'єфів.
 При $\zeta_c > (\zeta_c)_0$ — супрягання б'єфів з відгоном стрибка.
 При $(\zeta_c)_0 > \zeta_c$ — супрягання б'єфів з затопленим стрибком.
 $(\zeta_c)_0 = \varphi(\zeta)$ — визначається за графіком.



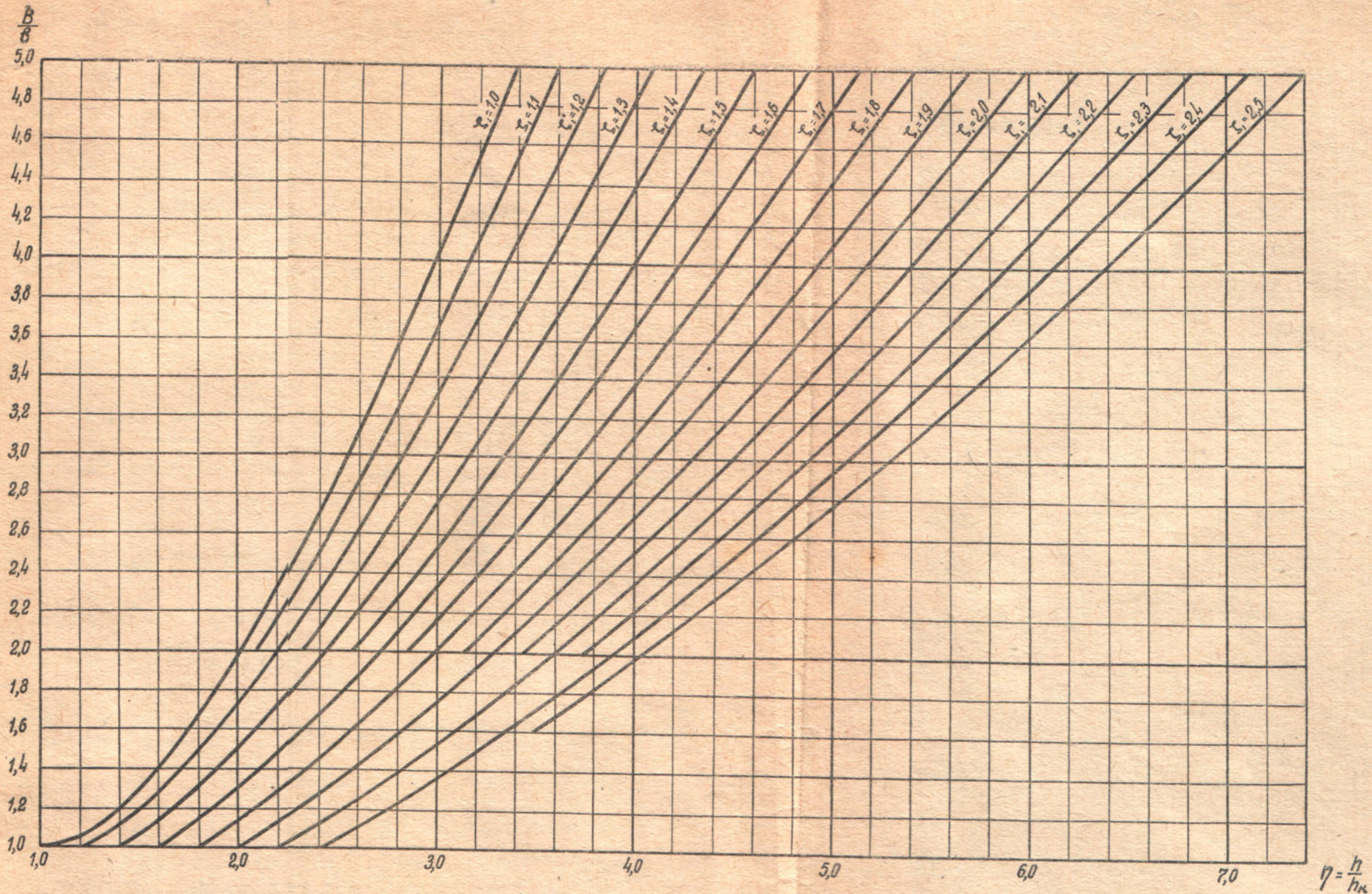
Графік VI. Розв'язання рівняння

$$\zeta_0 = \frac{\zeta_c}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{8 \varphi^3}{\zeta_c^3}} - 1 \right] = F_1(\zeta_k)$$

для визначення форми супрягання б'євів у спорудах прямокутного перерізу. В рівнянні

$$\zeta_c = \frac{h_c}{E_0}; \quad \zeta_k = \frac{h_k}{E_0}; \quad \zeta = \frac{h}{E_0}$$

- При $\zeta_0 = \zeta$ — критична форма супрягання б'євів.
- При $\zeta_0 > \zeta$ — супрягання б'євів з відгоном стрибка.
- При $\zeta_0 < \zeta$ — супрягання б'євів з затопленим стрибком
- $\zeta_0 = F_1(\zeta_k)$ — визначається за графіком.
- При $(\zeta_k)_0 = \zeta_k$ — критична форма супрягання б'євів.
- При $\zeta_k > (\zeta_k)_0$ — супрягання б'євів з відгоном стрибка.
- При $(\zeta_k)_0 > \zeta_k$ — супрягання б'євів з затопленим стрибком.
- $(\zeta_k)_0 = F_2(\zeta)$ — визначається за графіком.



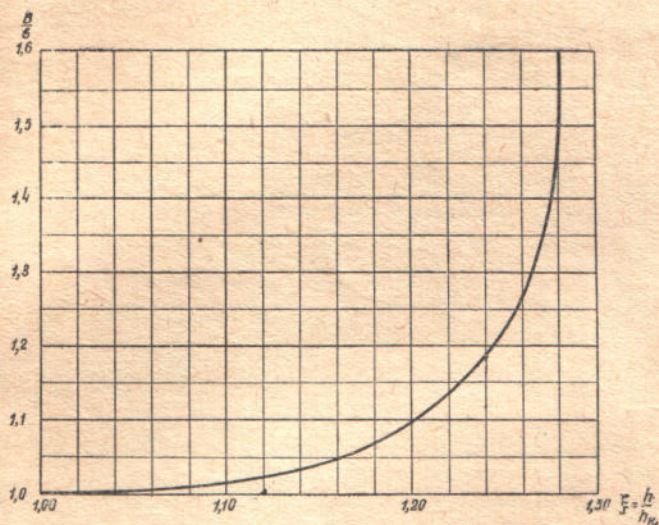
Графік VII. Розв'язання рівняння

$$\zeta_1^3 \frac{B^2}{b^2} - \frac{\zeta_1 \sqrt[3]{\frac{B^2}{b^2}}}{\eta} (2 + \eta^3) + 2 \frac{B}{b} = 0$$

для визначення умов протікання в спорудах прямокутного перерізу, які стискають водотік з боків. В рівнянні

$$\zeta_1 = \frac{h_1}{h_{k_1}} \quad \text{і} \quad \eta = \frac{h}{h_k}$$

При $\zeta_1 = 1,0$ глибина $h_1 = h_{k_1}$
 При $\zeta_1 > 1,0$ глибина $h_1 > h_{k_1}$



Графік VIII. Розв'язання рівняння

$$\xi^3 - \xi \left(\frac{2b}{B} + 1 \right) + 2 \frac{b^2}{B^2} = 0$$

для визначення умов протікання в спорудах прямокутного перерізу, які стискають водотік з боків. В рівнянні

$$\xi = \frac{h}{h_{k_1}} = \frac{h}{h_k \sqrt[3]{\frac{B^2}{b^2}}};$$

$\zeta_1 = \frac{h_1}{h_{k_1}}$ прийнято рівним одиниці.

При $q_1 \geq q_k$ — у звуженому перерізі встановиться h_{k_1} .

При $q_k > q_1$ — у звуженому перерізі встановиться $h_1 > h_{k_1}$.

$$q_k = \sqrt{\frac{g h_{k_1}^3}{\alpha}}; q_1 = \frac{Q}{b}; h_{k_1} = \frac{h}{\xi}$$

КРИТЕРИЙ ЗАТОПЛЕННОСТИ ПРИ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ РАСЧЕТАХ СООРУЖЕНИЙ

Инж. И. В. Журавель

Кандидат технических наук

Резюме

Движение жидкости в затопленных сооружениях в большей или меньшей степени отличается от условий протекания в тех же сооружениях, но незатопленных. При гидравлических расчетах сооружений необходимо различать две формы затопления: затопление прыжка в нижнем бьефе (рассматривается спокойный водоток, когда бытовая глубина h больше критической h_k) и затопление сооружения, когда уровень с низовой стороны оказывает влияние на условия протекания жидкости и в отверстии сооружения, и в верхнем бьефе. Задача исследования — установление критерия затопленности сооружений. Затопление прыжка приходится рассматривать лишь в связи с затоплением сооружения. Решение задачи по установлению критерия затопленности рассматривается только для русла прямоугольного сечения и для сооружений, наиболее часто встречающихся на практике.

Истечение из-под щита без порога

При истечении из-под щита без порога (черт. 4 и 4а) уровень нижнего бьефа не оказывает влияния на условия протекания в сооружении только в том случае, когда за щитом образуется отгон прыжка либо установится критическая форма сопряжения бьефов. В том случае, когда ниже щита сопряжение бьефов происходит с затоплением прыжка, уровень с низовой стороны оказывает влияние на условия протекания в отверстии и в верхнем бьефе — затопление прыжка вызывает затопление сооружения. Условия протекания жидкости ниже щита (определение формы сопряжения бьефов) обычно устанавливаются на основании „глубинного критерия“ — соотношения между глубинами: бытовой h и сопряженной h_c со сжатой h_c .

Круг задач, которые приходится решать для выяснения условий истечения из-под щита, требует введения новых величин, соотношение между которыми можно было бы принять в качестве критерия затопленности прыжка, а вместе с тем и сооружения.

Возможная постановка задач:

1. Определение открытия a щита (глубины h_c) при заданных величинах Q , H_0 и h ;
2. Определение глубины h в нижнем бьефе при заданных Q , H_0 и h_c ;
3. Определение напора H_0 перед щитом при заданных величинах Q , h и a (или h_c).
4. Определение расхода Q через щитовое отверстие при известных H_0 , a и h .

5. Определение ширины b , отверстия (длины l сливного фронта при параллельной работе нескольких щитов) при заданных Q , h и H_0 .

Исходные зависимости для решения поставленных задач представлены уравнениями (16 и 17), решение которых в каждом отдельном случае дает возможность установить условия движения жидкости в нижнем бьефе. Частные решения уравнений (16 и 17) представлены зависимостями (18)—(22) для случая, когда ширина отверстия равна ширине водотока.

За щитом образуется отгон прыжка (уровень с низовой стороны не оказывает влияния на условия протекания жидкости в отверстии сооружения и в верхнем бьефе) при соблюдении одного из следующих соотношений:

$$h < h_0$$

$$h_c > h_{c_0}$$

$$Q > Q_0$$

$$H_0 > H_{01}$$

где: Q , H_0 , h и h_c — действительные значения расхода, напора, глубины бытовой и в сжатом сечении для данного водотока;

Q_0 , H_{01} , h_0 и h_{c_0} — „критические значения“ расхода напора, глубины бытовой и в сжатом сечении, величины которых определяются по уравнениям (17, 19, 20 и 21).

Равенство величин: $h = h_0$; $h_c = h_{c_0}$; $Q = Q_0$ и $H_0 = H_{01}$ соответствует критической форме сопряжения бьефов (уровень с низовой стороны, как и в первом случае, не оказывает влияния на условия истечения из-под щита).

В нижнем бьефе образуется затопленный прыжок (уровень с низовой стороны оказывает влияние на условия протекания как в отверстии, так и в верхнем бьефе) только при соблюдении одного из следующих соотношений:

$$h > h_0$$

$$h_{c_0} > h_c$$

$$Q_0 > Q$$

$$H_{01} > H_0$$

Решение уравнений (18)—(22) представлено графиками I—VI. Влияние затопления сооружения сказывается на изменении условий движения жидкости в нем, что необходимо учесть при назначении размеров отверстия. Расчет сооружений, в которых движение жидкости происходит по типу истечения из-под щита, является крайне неопределенным из-за неопределенности в выборе коэффициента расхода μ , от величины которого зависят, при прочих равных условиях, размеры отверстия. (По Буркову величина μ доходит до значения 0,91 для затопленного отверстия против $\mu = 0,61 \div 0,62$ для отверстий незатопленных). Объясняется это тем, что обычно не учитывают понижения уровня за щитом по сравнению с бытовой глубиной h . Обычно для затопленных отверстий величину напора полагают равной $z_0 = H_0 - h$. В действительности напор $z'_0 > H_0 - h$ за счет понижения уровня за щитом по сравнению с бытовой глубиной. Величина z'_0 определяется либо по зависимости (4), либо из соотношения (черт. 4):

$$z'_0 = H_0 - (\tau + h_c)$$

Величину $\tau + h_c$ можно определить по уравнениям (40) и (41); z'_0 по зависимости (4) хорошо согласуется с опытными данными. Учет понижения уровня за щитом дает возможность сделать расчет затопленного щитового отверстия достаточно определенным (постоянство величины коэффициента расхода μ).

Истечение из-под щита с порогом

Для отверстия, образованного порогом и нижней кромкой щита (черт. 5), обычно принято учитывать затопление в том случае, когда бытовая глубина h больше высоты p_1 порога и сопряжение бьефов происходит с затоплением прыжка. Такой подход приводит к неопределенности расчета при назначении размеров отверстия из-за неопределенности в выборе величины μ . (По Рельтову величина μ колеблется в пределах от 0,517 до 0,804). Расчет становится определенным, если учесть понижение уровня за щитом по сравнению с бытовой глубиной h . Уровень с низовой стороны начинает оказывать влияние на условия истечения из отверстия при $h_1 > p_1$, где: h_1 — глубина за щитом, меньшая чем бытовая h_1 , а p_1 — высота порога со стороны нижнего бьефа. Но влияние затопления при значениях $h_1 \leq p_1 + \frac{a}{2}$ настолько незначительно, что его практически можно не учитывать. Более заметно влияние затопления только при $h_1 > p_1 + \frac{a}{2}$ (a — открытие щита). Поэтому отверстие необходимо рассматривать как затопленное при $h_1 > p_1 + \frac{a}{2}$. Глубина h_1 определяется по зависимости (43), а действующий напор — из уравнения (45) или по соотношению (черт. 6):

$$z'_0 = H_1 - h_1$$

где: H_1 — глубина перед щитом, исправленная на высоту скорости подхода.

Для выяснения условий движения жидкости в нижнем бьефе (определение формы сопряжения бьефов), в случае истечения из-под щита с порогом, при равенстве ширины отверстия и водотока можно воспользоваться зависимостями и графическими решениями, данными для щита без порога с тем однако ограничением, что по указанным зависимостям при наличии порога нельзя определить высоту a открытия щита.

Движение через сооружения, стесняющие водоток с боков

Стеснение поперечного сечения спокойного водотока вызывает либо понижение уровня по сравнению с бытовой глубиной, либо, при сильном стеснении, установление критической глубины h_{k_1} в конце отверстия (черт. 8 и 9). В сооружениях, стесняющих водоток с боков, уровень с низовой стороны оказывает влияние на условия протекания в отверстии до тех пор, пока в нем не установится критическая глубина h_{k_1} . Соотношением между глубиной h_1 в конце отверстия и h_{k_1} определяются условия протекания в сооружении. Но так как и h_1 и h_{k_1} при заданном расходе Q зависят от степени стеснения, как отношения ширины отверстия b к ширине водотока B , то, очевидно, условия протекания в отверстии можно характеризовать и по степени стеснения живого сечения водотока. Наконец, условия протекания в отверстии можно установить по величине расходов.

Исходное уравнение для решения поставленных задач представлено зависимостью (51). Частные решения даны уравнениями (53), (56) и (60).

Соотношения, которые дают возможность установить условия протекания в отверстии, могут быть определены аналитическим или графическим решением этих уравнений (графики VII—VIII). Отверстие будет затопленным (уровень с низовой стороны не оказывает влияния на условия протекания в отверстии и выше сооружения) при одном из следующих соотношений:

$$\zeta_1 = 1,0 \quad (\zeta_1 < 1,0 \text{ не может быть})$$

$$\frac{B}{b} \geq \left(\frac{B}{b}\right)_k$$

$$Q \geq Q_k \quad \text{или} \quad q_1 \geq q_k,$$

где: $\zeta_1 = \frac{h_1}{h_k} \cdot \frac{B}{b}$, Q и q_1 — действительные значения отношения ширины водотока к ширине отверстия, расхода суммарного и единичного для заданных конкретных условий;

$\left(\frac{B}{b}\right)_k$, Q_k и q_k — значения отношения ширины водотока к ширине отверстия, суммарного и единичного расходов, определяемых из уравнений (56) и (60) или их графических решений (графики VII и VIII).

Отверстие будет затопленным (уровень с низовой стороны оказывает влияние на условия протекания в отверстии и в верхнем бьефе) при следующих соотношениях

$$\zeta_1 > 1,0$$

$$\left(\frac{B}{b}\right)_k > \frac{B}{b}$$

$$Q_k > Q \quad \text{или} \quad q_k > q_1$$

Установление критерия затопленности дает некоторые отправные предпосылки для выяснения условий движения жидкости за сооружением.

Движение через водосливы

Для водосливов всех профилей влияние затопления обычно учитывается коэффициентом σ_n . Существующие нормы учета затопления для водосливов практических профилей и с широким порогом нельзя признать удовлетворительными: уже значения σ_n для водосливов практического профиля по Морицу и Гершелю дают расхождение до 30,0% — отсюда принятие коэффициента σ_n по Морицу или Гершелю дает расхождение в размерах водопропускного отверстия до 30,0% при $H = \text{const}$.

Водосливы в тонкой стенке и практического профиля принято считать затопленными в том случае, когда бытовая глубина h больше высоты порога p_1 , а сопряжение бьефов происходит с затоплением прыжка (черт. 10, 13). Водослив с широким порогом принято считать затопленным при условии, что бытовая глубина h больше $p_1 + h_k$, и ниже водослива прыжок затоплен (черт. 11). Опытная проверка показывает, что даже для водослива в тонкой стенке затопление начинает сказываться только тогда, когда глубина h_1 , меньшая, чем бытовая h , становится больше высоты порога p_1 (черт. 12). Повидимому, для установления критерия

затопленности водосливов необходимо различать вакуумные и безвакуумные профили водосливов. Для вакуумных профилей, как и для водослива в тонкой стенке, затопление, повидимому, наступает при $h_1 > p_1$; для безвакуумных, как и для водослива с широким порогом, затопление, повидимому, наступает при $h_1 > p_1 + h_k$.

Значение глубины h_1 определяется по зависимости (64) и (65). Глубина h_1 , подсчитанная по зависимости (65), при равенстве ширины водослива и водотока хорошо согласуется с опытными данными.

Опыты, выполненные для проверки точности учета затопления выведением σ_n для водослива практического профиля с вертикальной напорной гранью и сливной, очерченными по координатам Кригера (Creager), показывают, что расхождение между опытным значением σ'_n и σ_n по Гершелю достигает 22,0—23,0%, а если принять значения σ_n по Морицу, то расхождение для отдельных опытов увеличивается до 50,0% (табл. 8). Как правило, σ_n даются преуменьшенными, а следовательно, размеры водосливного отверстия будут при прочих равных условиях преувеличенными. Полученные опытные данные показывают, что вопрос относительно затопления водосливов для уточнения гидравлических расчетов гидротехнических сооружений требует всестороннего изучения.

SUBMERSION CRITERIUM FOR HYDRAULIC CALCULATION OF STRUCTURES

by I. V. Zhuravel

Summary

The motion of liquid in submerged structures more or less differs from that in the same structures but insubmerged. At hydraulic calculation of structures two submersion forms should be distinguished: submersion of the jump downstream (a smooth flow is considered for which the natural depth h is greater than the critical depth h_k) and submersion of the structure when the level on the down stream side influences the motion of the liquid both in the aperture of the structure and upstream. The investigation aims to establish the submersion criterium of structures.

The submersion of the jump has to be considered only in connection with that of the structure itself. The solution of the problem involving the establishment of a submersion criterium, is taken up only for the case of a rectangular bed and for structures which are mostly encountered in practice.

Outflow from under a gate having no crest

For an outflow from under a gate having no crest (figs 4 and 4a) the downstream level does not influence the motion of liquid in the structure only when repulsion of the jump is formed behind the gate or the critical conjugation of downstream and upstream sets in. If the conjugation of downstream and upstream waters below the gate is followed by submersion of the jump, the level on the downstream side influences the motion of liquid in the aperture upstream, too, and submersion of the jump brings about submersion of the structure itself. The conditions for the motion of liquid below the gate (the conjugation form of the up and down streams) are usually established on the basis of the „depth criterium“, i. e. the relation between the natural length h and the conjugate depth h_c on one side, and the contracted depth h_c on the other.

The problems one has to solve in order to clear up the conditions of an outflow from under the gate, requires the introduction of new quantities so that the relation between the latter might be assumed as the criterium for the submersion of the jump, hence of the structure, too.

The following problems can be considered:

1. The determination of the gate opening a (depth h_c) for the given values of Q , H_0 and h .
2. The determination of the down stream depth h for the given values of Q , H_0 and h_c .
3. The determination of the head H_0 before the gate for the given values of Q , h and a (or h_c).
4. The determination of the discharge Q through the gate opening, the values of H_0 , a and h being known.
5. The determination of the aperture width (the length l of the overfall front at parallel action of several gates) for the given values of Q , h and H_0 .

The fundamental relations to be used for the solution of the problems above, are given by equations (16) and (17).

Solving these equations for every particular case will allow to establish the conditions for the motion of the downstream water. The particular solutions of equations (16) and (17) are given by (18) to (22) for the case when the width of the aperture is equal to that of the water passage.

Behind the gate, repulsion of the jump (the level on the downstream side having no effect on the flow conditions both in the aperture of the structure and upstream) is formed if one of the following relations is satisfied:

$$\begin{aligned}h &< h_0 \\h_c &> h_{c0} \\Q &> Q_0 \\H_0 &> H_{01}\end{aligned}$$

in which

Q , H_0 , h , h_c are the true values of the discharge, head, natural depth, contracted depth, for the given water flow.

Q_0 , H_0 , h_0 , h_{c0} the „critical values“ of the discharge, head, natural depth, and contracted depth.

These quantities are determined from equations (17), (19), (20), and (21). The equations

$$h = h_0, h_c = h_{c0}, Q = Q_0, H_0 = H_{01}$$

correspond to the critical form of upstream and downstream conjugation, the level on the downstream side as in the former case having no effect on the outflow from under the gate.

A submerged jump (the downstream level influences the flow conditions both in the aperture and upstream) is formed downstream only when one of the following conditions is satisfied:

$$\begin{aligned}h &> h_0 \\h_{c0} &> h_c \\Q_0 &> Q \\H_{01} &> H_0\end{aligned}$$

The solution of equations (18) to (22) is given by the diagrams I—VI. Submersion of the structure influences the motion of the liquid therein which

has to be taken into account in proportioning the opening. The calculation of structures, in which the motion of liquid takes place according to the outflow-from-under-the-gate type, is quite vague due to the uncertainty arising in the selection of the coefficient of discharge μ which influences the proportions of the opening. According to Bourkov, the coefficient μ rises up to 0.91 for submerged apertures as compared with the value $\mu = 0.61-0.62$ for free apertures. This is explained by the fact that generally the drop of level behind the gate with respect to the natural depth h , is not taken into account. For submerged apertures the head is usually assumed equal to,

$$z_0 = H_0 - h$$

Actually, the head is

$$z'_0 > H_0 - h$$

due to the lowering of the level behind the gate with respect to the natural depth. The value of z'_0 can be determined either from equation (4) or

$$z'_0 = H_0 - (\tau + h_c)$$

(s. fig. 4).

The sum $\tau + h_c$ can be calculated from equations (40) and (41).

The value of z'_0 as determined from equation (4) is in good agreement with experimental data. By taking into account the drop of level behind the gate, the calculation of the submerged gate aperture can be made certain enough (i. e. the coefficient of discharge μ remains constant).

Outflow from under a gate with crest

For an aperture formed by the sill and the lower edge of the gate (fig. 5) the submersion is usually taken into account when the natural depth h exceeds the sill height p_1 and conjugation of down and up streams is followed by submersion of the jump. This makes uncertain the proportioning of the aperture due to the vagueness which arises in selecting the coefficient μ (according to Beltov the value of μ varies within limits from 0.517 to 0.804). The calculation will become definite if the drop of level behind the gate with respect to the natural depth h is taken into account. The level on the downstream side begins to influence the outflow conditions if

$$h_1 > p_1$$

in which

h_1 — the depth behind the gate less than the natural depth h .

h_1 — the crest height on the downstream side.

However, the influence of submersion at $h_1 \leq p_1 + \frac{a}{2}$ is so insignificant that it is practically negligible. The submersion has a more marked effect only when $h_1 > p_1 + \frac{a}{2}$, a denoting the gate opening. Hence, the aperture should be regarded as submerged at $h_1 > p_1 + \frac{a}{2}$. The depth h_1 is determined from equation (43) and the active head from equation (45) or

$$z'_0 = H_1 - h_1$$

(fig. 6) in which

H_1 — the depth before the gate corrected by that behind the gate.

To determine the conditions for the motion of liquid (conjugation form of the up and down streams) in the case of an outflow under a gate with crest and when the width of the aperture is equal to that of the waterflow, the equations and graphic solution given for a gate having no crest can be used with but one limitation that the height a of the gate opening cannot be found from the equations above for a gate with crest.

Motion through structures restricting the waterflow on the sides

The restriction of the cross section of a smooth waterflow brings about either a drop of the level as compared with the natural depth or, in the case of a strong restriction, the critical depth h_{k1} sets in at the end of the aperture (figs 8 and 9). In structures restricting the waterflow on the sides, the downstream level influences the flow conditions in the aperture until the critical depth h_{k1} does not set in. The flow conditions in the structure are determined by the relation between the depth h_1 at the end of the aperture and h_{k1} . However, the depths h_1 and h_{k1} for a given discharge Q being dependent of the degree of restriction assumed as the ratio of the width of the aperture b to that of the waterflow B , it becomes evident that the motion through the apertures can be also characterized by the degree of restriction of the wetted cross section. Finally, the conditions of flow through the aperture can be characterized by the value of the discharge.

The basic equation in solving the problems stated above can be represented by (51). The particular solutions are obtained from equations (53), (56), and (60).

The relations establishing the conditions of the flow through the aperture, can be determined analytically or graphically by solving these equations (diagrams VII—VIII). The aperture will be insubmerged (the downstream level having no effect on the flow through the aperture and above the structure) if one of the following conditions is satisfied:

$$\zeta_1 = 1,0 \quad (\zeta_1 < 1,0 \text{ impossible})$$

$$\frac{B}{b} \geq \left(\frac{B}{b}\right)_k$$

$$Q \geq Q_k \quad \text{or} \quad q_1 \geq q_k$$

in which

$\zeta_1 = \frac{h_1}{h_{k1}} \cdot \frac{B}{b}$, Q , and q_1 are the true values of the ratio between the width of waterflow and that of the aperture, the total and unit discharges for given concrete conditions.

$\left(\frac{B}{b}\right)_k$, Q_k and q_k — the ratio of the width of waterflow to that of the aperture, the total and unit discharges as determined from equations (56) and (60) or graphs VII and VIII.

The aperture will be submerged (the downstream level having an effect on the flow both through the aperture and upstream) for the following conditions:

$$\zeta_1 > 1,0$$

$$\left(\frac{B}{b}\right)_k > \frac{B}{b}$$

$$Q_k > Q \quad \text{or} \quad q_k > q_1$$

Having established the submersion criterium, some of the starting points necessary to clear up the conditions for the motion of liquid behind the structure are obtained.

Flow through weirs

For all types of weir profiles the submersion effect is usually taken into account by the coefficient σ_n . The existing standards taking into account the submersion effect for weirs of practical profiles and wide-crested weirs cannot be regarded as satisfactory. The values of σ_n for weirs of practical profiles due to Moritz and Herschell show a divergence up to 30 per cent. Hence, if the value of σ_n should be assumed according to Moritz and Herschell the error in proportioning the flow aperture would go up to 30 per cent for $H = \text{const.}$

Narrow-crested weirs and those of practical profile are usually regarded as submerged when the natural depth h exceeds the crest height p_1 , while the conjugation of up and down streams is followed by submersion of the jump (fig. 10 and 13). Wide-crested weirs are assumed submerged if the natural depth h exceeds the value of $p_1 + h_k$, while the jump is submerged below the weir (fig. 11). An experimental investigation has shown that even for narrow-crested weirs the submersion effect begins to tell only when the depth h_1 , which is smaller than the natural depth h , becomes larger than the sill height p_1 (fig. 12). In establishing the submersion criterium of weirs it seems necessary to differ vacuum weirs from vacuumless weirs. For vacuum profiles submersion, as in the case of narrow-crested weirs, begins at $h_1 > p_1$; while with vacuumless profiles, similarly to wide-crested weirs, submersion seems to start at $h_1 > h_1 + h_k$.

The value of the depth h_1 is determined from equations (64) and (65). The depth h_1 as calculated from (65) is in good agreement with experimental data if the width of the weir is equal to that of the waterflow.

Experiments carried out in order to check the accuracy which is obtained in taking into account the submersion effect by the introduction of the factor σ_n for weirs of practical profile having a vertical head basin or overfall basin drawn up by using Creager's coordinates, have shown that the disagreement between the experimental value of σ'_n and σ_n goes up to 22—23 per cent according to Herschell. If the values of σ_n are assumed according to Moritz the disagreement will rise up to 50 per cent for separate cases (table 8).

As a rule, the factors σ_n are assumed smaller than their true value; therefore the proportions of the overfall aperture will be exaggerated, other conditions being equal. Experimental data obtained have shown that the problem of the submersion of weirs requires an extensive study to make more accurate the calculations of hydraulic works.

ЗМІСТ

	Стор.
Вступ	3
§ 1. Витікання спід щита. Загальні зауваження	4
§ 2. Витікання спід щита без порога	10
§ 3. Витікання спід щита з порогом	20
§ 4. Рух через споруди, які стискають водотік з боків	29
§ 5. Рух через водозливи	36
Резюме	49
Summary	53

ИЗДАНИЯ ИНСТИТУТА ГИДРОЛОГИИ АКАДЕМИИ НАУК УССР

1. Известия Института Водного Хозяйства АН УССР, том. VII. Киев. 1937, стр. 274.
Цена 8 руб.

Содержание: Акад. *Г. Высоцкий*. Дессукия и коррективный водоподъем. Проф. *А. В. Огиевский*, д-р техн. наук. Учет влияния лесистости на весенние максимальные расходы. *М. И. Гук*. О ливнях в бассейне р. Северного Донца (1903—1912, 1924—1931 гг.). *А. М. Сотченко*, канд. техн. наук. Графоаналитический способ расчета трансформации паводочного притока водохранилищем. *А. Я. Белявский*, канд. геол. наук. К вопросу о капиллярном и пленочном движении воды в породах. *А. Е. Зеленко*. К вопросу о методике исследований шахтных вод Криворожья. Инж. *П. И. Драншиников*. Зависимость коэффициента фильтрации грунтов от их уплотнения. Проф. *Г. И. Сухомел*. Некоторые дополнения к теории водосливов с широким порогом. Проф. *Г. И. Сухомел* и *И. В. Журавель*. Потери энергии при истечении из-под щита. Инж. *Р. Т. Слободян*. Характеристика факторов, влияющих на осадку гидротехнических сооружений на нескольких грунтовых основаниях. *Н. И. Товстолес*. Применение метода Эггардта к речным триангуляциям. *А. К. Корчагин*. Береговые укрепления Днепра. Инж. *Н. Л. Киссель*. К вопросу о скоростях течения в отверстиях судоходных плотин на малых реках. *И. Л. Кравчук*. Некоторые вопросы экономики транспортного освоения малых рек УССР.

Статьи на украинском языке с резюме на русском и английском языках.

2. Известия Института Гидрологии АН УССР. Том I (VIII). Киев. 1938, стр. 200. Цена 7 руб. 50 к.

Содержание: Проф. *А. В. Огиевский*, д-р техн. наук. Новая формула для вычисления максимальных весенних расходов в реках. *В. М. Засс*. О сопротивлении воды при движении судов по малым рекам. Инж. *В. А. Марьян*. О волнах в речных водоемах озерного типа. Инж. *И. В. Журавель*, канд. техн. наук. К вопросу о размерах водобойного колодца и длине крепления в нижнем бьефе. *И. Г. Валяев*. Речная сеть на территории УССР, ее густота и коэффициенты густоты. Инж. *П. И. Драншиников*, канд. техн. наук. доцент. Инженерно-гидрогеологические условия для проектирования и устройства плотин в верховьях р. Десны. *Р. Т. Слободян*. Эффективность шпунтов в флютбетах гидротехнических сооружений. *К. И. Маков*. О гидрогеологическом атласе УССР. *П. Д. Осипов*. Шахтные воды Кривбасса.

Статьи на украинском языке с резюме на русском и английском языках.

3. Мялковский *М. В.* Применение кривой распределения Шарлье для вычисления годового и максимального стока. Киев. 1937, стр. 126. Цена 4 руб. 50 к.

На украинском языке с резюме на английском и (расширенным) на русском языках.

4. Сотченко *А. М.* и Мялковский *М. В.* Нормы потерь на испарение с водной поверхности в бассейне р. Днепра. Под руководством и редакцией проф. *А. В. Огиевского*. Киев. 1935, стр. 98 + атлас на XXX листах. Цена 8 руб. с атласом.

На украинском языке с резюме на русском и немецком языках.

5. Сборник по вопросам гидравлики. Киев. 1936, стр. 147. Цена 5 руб. 50 коп.

Содержание: *Г. И. Сухомел*. О местных потерях энергии в открытых водотоках и гидротехнических сооружениях в связи с общим принципом движения потоков. *Г. И. Сухомел*. Движение воды в реках на участках, стесненных дамбами. *И. В. Журавель*. К вопросу о гашении энергии в прыжке. *Г. И. Сухомел*. Основы теории неустановившегося движения в открытых водотоках (волны перемещения). *В. С. Козлов*. Неравномерное движение грунтовых вод. *В. С. Козлов* и *Н. Р. Балакирский*. Приток воды к дрене, не лежащей на водоупоре. *И. А. Боголепов*. Новые принципы определения волновой нагрузки.

Статьи на украинском языке с резюме на русском и немецком языках.

6. Сборник по вопросам гидротехники. Киев. 1936, стр. 115. Цена 7 руб.

Содержание: *В. С. Козлов* и *Н. Р. Балакирский*. Влияние глубины забивания шпунта на фильтрацию воды под ним. *Р. Т. Слободян*. Опыты по определению коэффициентов внутреннего трения и сцепления в грунтах. *Р. Т. Слободян*. К расчету осадок гидротехнических сооружений на грунтовых основаниях. *В. А. Марьян*. Экспериментальное исследование прочности и жесткости составных дощатых свай.

Доц. В. С. Козлов. Определение максимальных расчетных расходов через отверстия гидросооружений при регулирующем действии водохранилища. В. С. Козлов. Построение кривой депрессии в теле земляной плотины.

Статьи на украинском языке с резюме на русском и немецком языках.

7. Река Обиточная, ее гидрология и гидрогеология (в связи с проблемой орошения на местном стоке в Приазовьи). Киев. 1937, стр. 200. Цена 6 руб. 50 к.

Содержание: А. М. Сотченко, кандидат техн. наук. Гидрологический очерк р. Обиточной. В. Г. Ткачук. Гидрогеологический очерк бассейна р. Обиточной в связи с проблемой орошения на местном стоке. П. И. Дранишников. Фильтрационные свойства пород и потери воды на фильтрацию в водохранилищах Азовского кристаллического массива.

Статьи на украинском языке с резюме на русском и английском языках.

8. Проф. Сухомел Г. И. О неравномерном движении жидкости в открытых водотоках и сооружениях на них. Киев. 1938, стр. 140. Цена 4 руб. 50 коп.

На украинском и русском языках (параллельные тексты) с резюме на английском языке.

- Киссель Н. Л., Корчагин А. К., Русаков С. В. и Толмацкий А. М. Приведение малых рек в судоходное состояние (простейшие мероприятия). Москва. 1937, стр. 250. Цена 4 руб. 35 к.

На русском языке.

10. Засс В. М. Метод выбора типов судов для малых рек. Киев. 1937, стр. 86. Цена 4 руб.

На украинском языке с резюме на русском и немецком языках.

11. Засс В. М. Основы технической эксплуатации флота на малых реках. Киев. 1939, стр. 110. Цена 3 руб. 50 коп.

На украинском языке с резюме на русском и английском языках.

12. Гусев, В. М., Корчагин А. К., Лосиевский А. И., Толмацкий А. М. Транзитное дноуглубление на Днепре и Десне в условиях естественного и частично зарегулированного стока. Киев. 1937, стр. 134. Цена 4 руб. 50 коп.

На украинском языке с резюме на русском языке.

13. Корчагин А. К. Судоходные глубины рек при регулировании стока. Киев. 1938, стр. 250. Цена 9 руб.

На украинском языке с резюме на русском и английском языках.

14. Сотченко А. М. Аннотированный указатель литературы по вопросу об испарении со свободной водной поверхности. Под редакцией д-ра техн. наук А. В. Огиевского. Киев. 1937, стр. 134. Цена 4 руб. 50 к.

Аннотации на украинском языке; предисловие на английском.

15. Гидрогеологический сборник. Киев. 1939, стр. 186. Цена 8 руб.

Содержание: К. И. Маков. Физико-механические свойства водоносных пород северо-украинской мульды. В. Г. Ткачук. К вопросу о физико-механических и петрографических свойствах третичных пород района среднего Днепра. А. Я. Белявский, канд. геол. наук. К методике лабораторного определения максимальной молекулярной влагоемкости пород и их водоотдачи. Р. Т. Слободян, канд. техн. наук. К вопросу о характеристике углов внутреннего трения и сцепления и углов естественного откоса. П. И. Дранишников, канд. техн. наук. Исследование коэффициента фильтрации в зависимости от температуры воды, длительности опыта и химического состава воды. П. И. Дранишников. Зависимость величины коэффициента фильтрации в песках и суглинках от добавки к ним гравия. А. Е. Зеленко и А. Я. Белявский, кандидаты геол. наук. К вопросу о методике гидрогеологических исследований по охране подземных вод.

На украинском языке с резюме на русском и английском языках.

THE UNIVERSITY OF CHICAGO

LIBRARY

1950

1950

Инж. И. В. ЖУРАВЕЛЬ
КРИТЕРИЙ ЗАТОПЛЕННОСТИ
ПРИ
ГИДРАВЛИЧЕСКИХ РАСЧЕТАХ СООРУЖЕНИЙ
(на украинском языке)

ПРИЙМАННЯ ЗАМОВЛЕНЬ І ПЕРЕДПЛАТИ
на всі видання Академії Наук УРСР
проводяться в книготорговельному секторі
Видавництва Академії Наук УРСР,
Київ, вул. Чудновського, 2 ■■■■■

ПРОДАЖ ВИДАНЬ ■■■■■
у науковій книгарні Академії Наук УРСР:
Київ, вул. Леніна, 12, і по всіх книгарнях
Укркниготоргу, КОГІЗ-у, Укоопкниго-
культторгу і „Академкниги“. :: :: :: ::