

получены эмпирические формулы в виде алгебраических полиномов в функции от характерного диаметра  $d_{10}$  и коэффициента неоднородности  $U$ :

$$\mu_n = 0,346 + 0,332 d_{10} - 0,064 U - 0,463 d_{10}^2 + 0,052 U^2; \quad (5)$$

$$s_{cp} = 0,34 - 0,36 d_{10} - 0,01 U; \quad (6)$$

$$\sigma = 0,038 + 0,027 d_{10} + 0,004 U. \quad (7)$$

Зависимость (5) справедлива при  $0,05 \leq d_{10} \leq 0,5$ ,  $2,4 \leq U \leq 7,6$ ; зависимости (6) и (7) — при  $0,10 \leq d_{10} \leq 0,4$ ,  $2,4 \leq U \leq 7,6$ .

Полученные расчетные зависимости позволяют более полно по сравнению с имеющимися учитывать полезную информацию, полученную в процессе анализа гранулометрического состава песчаных грунтов. Их применение наиболее целесообразно при оценке водовместимости дренируемых средне- и крупнозернистых песчаных грунтов, а также при проведении водобалансовых расчетов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А в е р ь я н о в С.Ф. Борьба с засолением орошаемых земель. М., 1978. — 288 с.
2. Э р к и н Г.Д. Осушение заболоченных аллювиальных почв. — В кн.: Освоение заболоченных земель: Тр. Всесоюз. науч.-исследовательск. ин-та болотного хозяйства. Минск, 1937, с. 147—151.
3. К а п о т о в а Н.И. Водоотдача водоносных грунтов. — Тр. ГГИ, вып. 194. Л., 1972, с. 218—241.
4. Б а р о н В.А. Неустановившийся режим фильтрации подземных вод в безнапорном пласте. — Тр. ВНИИ гидролог. и инж. геолог., вып. 127, М., 1979, с. 18—29.
5. П р о с к у р н и к о в С.М. Экспериментальные данные по изучению движения капиллярной воды в песке. — Тр. ГГИ, вып. 8 (62). Л., 1948, с. 150—174.
6. Н о с о в а О.Н. Расчет водоотдачи песчаных грунтов. М. — Л., 1962. — 116 с.
7. Щ е р б а к о в Г.А., Ж и б у р т о в и ч К.К. Определение водоотдачи песчаных грунтов по данным гранулометрического состава. — В кн.: Водное хозяйство и гидротехническое строительство. Минск, 1985, вып. 14, с. 93—99.
8. П о л у б а р и н о в а-К о ч и н а П.Я., П р я ж и н с к а я В.Г., Э м и х В.Н. Математические методы в вопросах орошения. М., 1969. — 414 с.
9. П о л л а р д Дж. Справочник по вычислительным методам статистики (Пер. с англ.). — М., 1982. — 344 с.

УДК 626.823

С.П.ГАТИЛЛО, И.В.ФИЛИППОВИЧ,  
канд. техн. наук (БПИ)

### УЧЕТ ПОДТОПЛЕНИЯ ПРИ РАСЧЕТЕ ТРУБЧАТЫХ ВОДОПРОПУСКНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Трубчатые водопропускные сооружения на каналах мелиоративных систем часто работают с затопленным выходным сечением. Уровень нижнего бьефа обычно значителен в паводки и половодья и может оказывать влияние на уровень верхнего бьефа, что иногда приводит к затоплению земель выше таких сооружений. Поэтому без учета подобного явления невозможно правильно провести гидравлические расчеты трубчатых сооружений.

Анализ проектов сооружений гидромелиоративных систем показывает, что довольно часто они рассчитываются на небольшой перепад уровней при значительных повышениях нижнего бьефа, достигающих верха выходного отверстия трубы или превышающих его. В этих случаях использование методических рекомендаций по гидравлическим расчетам, разработанных для напорного движения при больших перепадах бьефов, может привести к неверным решениям.

В литературе отмечается, что при напорном затопленном движении воды коэффициент расхода уменьшается с увеличением затопления выходного отверстия [1]. В известных типовых проектах труб-регуляторов и труб-перезедов [2] такое движение воды учитывается в неявном виде в графиках их пропускной способности, построенных по результатам лабораторных модельных исследований трубчатых сооружений и позволяющих в определенном диапазоне найти соответствующие друг другу значения расчетного расхода и уровней нижнего и верхнего бьефов. Эти графики пригодны для сооружений (по конфигурации поперечного сечения, виду входного и выходного оголовков, соотношению размеров отдельных элементов), модели которых были исследованы. Аналитические выражения зависимостей в источнике [2] не приводятся.

Следует отметить, что, судя по данным [3], для учета затопления трубчатых сооружений с различной конфигурацией сечения, а также с разным устройством бьефов необходимо использовать отличные друг от друга зависимости.

В данной работе на основе лабораторных исследований моделей трубчатых водопропускных сооружений треугольного поперечного сечения [4] рассматриваются закономерности изменения уровней воды в верхнем бьефе сооружения под воздействием их изменения в нижнем, а также закономерности происходящей при этом смены видов движения воды через трубы. Даются аналитические выражения выявленных зависимостей, устанавливаются значения их основных параметров.

Опыты проводились на модели из оргстекла, выполненной в масштабе 1:20. Отношение ширины лотка к ширине модели — 1,6, т.е. условия близки к плоской задаче; оголовки порталные; уклон трубы  $i = 0$ ; перепад дна на выходе и входе отсутствует; уклон лотка  $i_n = 0$ . Уровень воды в нижнем бьефе регулировался при помощи затвора, установленного на выходе из лотка. Уровни замерялись мерными иглами с ценой деления шкалы 0,1 мм (абсолютное значение погрешности  $\Delta h = 0,1$  мм). Расход устанавливался по тарировочной кривой треугольного водослива; цена деления шкалы расходов 20 см<sup>3</sup>/с,  $\Delta Q = 10$  см<sup>3</sup>/с. Уровень воды на водосливе замерялся при помощи мерной иглы.

Через модель сооружения пропускался заданный постоянный расход. При помощи затвора уровень нижнего бьефа поднимался через определенные интервалы и на некоторое время фиксировался, пока движение потока не стабилизировалось. Полученный график дает возможность определить соотношение уровней, при которых на пропускную способность сооружения оказывает влияние уровень нижнего бьефа, а также дать аналитические зависимости, оценивающие это влияние.

На рис. 1. показаны полученные зависимости глубины воды над порогом трубы  $H$  от глубины воды в нижнем бьефе  $h$  при различных расходах

$Q$  и видах движения воды в трубе. График  $H = f(h, Q)$  можно разделить на характерные участки. Если движение в трубе безнапорное ( $H < 1,22a$  [4];  $a$  — высота трубы), график (при постоянном расходе) распадается на три участка; I — при низких значениях уровня нижнего бьефа (НБ) движение безнапорное и увеличение уровня воды в НБ не оказывает влияния на

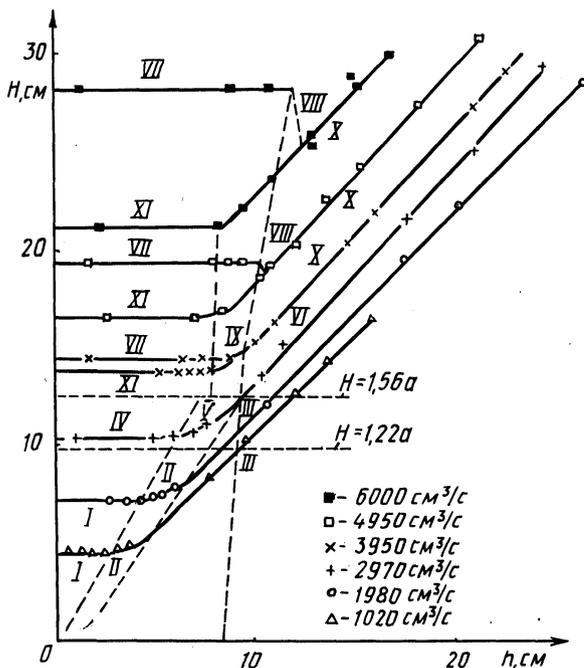


Рис. 1. Зависимость между глубинами воды в нижнем и верхнем бьефах при различных расходах и видах движения воды через модель трубчатого водопропускного сооружения треугольного поперечного сечения  $H = f(h, Q)$ .

уровни воды выше трубы; II — после достижения в НБ глубины, соответствующей критической глубине воды в трубе, начинает сказываться подтопление (интенсивность повышения уровня в верхнем бьефе (ВБ) стремится к интенсивности повышения уровня воды в НБ, однако движение воды в трубе остается безнапорным); III — с момента превышения интенсивности роста уровня ВБ над его интенсивностью в НБ и стабилизацией этого соотношения имеет место следующий участок зависимости. После того как уровень воды в НБ превысит верх выходного отверстия трубы, движение становится напорным.

При полунапорном движении (при  $1,22a \leq H$  [4]) до  $H \leq 1,56a$  график внешне подобен рассмотренному ранее. Причем участку I соответствует IV; II—Y и III—YI. При этом участки I, III, IV и YI можно описать прямыми линиями.

При полунапорном движении воды в трубе и  $H > 1,56a$  (прямые YII) подтопление не влияет на прирост интенсивности повышения воды перед трубой до тех пор, пока труба не станет работать полным сечением. Это происходит при затоплении выходного участка трубы. Затем она быстро заполняется по всей длине. Данный процесс выражается линиями YIII или YX. Они

примыкают к прямой X напорного затопленного движения при том же расходе. После заполнения трубы (при значительных напорах) происходит снижение уровня верхнего бьефа, так как при переходе к напорному движению пропускная способность трубы возрастает. При этом, чем выше уровень ВБ, тем больше величина его падения (она соответствует разности уровней воды в ВБ на графике пропускной способности трубы для полунапорного и напорного движений).

Если движение в трубе с самого начала напорное, то при своем повышении уровень воды нижнего бьефа не влияет на уровень воды в ВБ сооружения (прямая XI). Затем это влияние начинает проявляться (X).

Во всех случаях точки перехода от первоначального участка к последующему представляют критерии подтопления трубы при разных видах движения, а описание участков дает возможность оценить влияние подтопления.

При расчетах воспользуемся известными зависимостями для указанных видов движения [3, 5]:

при безнапорном движении

$$Q = m_{\kappa} b_{\kappa} \sqrt{2g} H_0^{3/2}, \quad (1)$$

где  $m_{\kappa}$  — коэффициент расхода;  $b_{\kappa}$  — средняя ширина потока в трубе в сечении с критической глубиной;  $H_0$  — глубина над порогом трубы с учетом скоростного напора;  $g$  — ускорение свободного падения;

при полунапорном движении

$$Q = \mu_{\pi} \omega \sqrt{2g(H_0 - \eta_{\pi} a)}, \quad (2)$$

где  $\mu_{\pi}$  — коэффициент расхода;  $\omega$  — площадь поперечного сечения трубы;  $\eta_{\pi}$  — коэффициент.

При напорном движении и свободном выходе из трубы

$$Q = \mu_{\pi} \omega \sqrt{2g(H_0 + i l_{\text{тр}} - \eta_{\pi} a)}. \quad (3)$$

Здесь  $i$  — уклон дна трубы;  $l_{\text{тр}}$  — длина трубы;  $\eta_{\pi}$  — коэффициент;  $\mu_{\pi} = \frac{1}{\sqrt{\sum \xi}}$  —

коэффициент расхода;  $\sum \xi = \xi_{\text{вх}} + \xi_{\text{дл}} + \xi_{\text{вых}}$  — сумма коэффициентов сопротивления на вход, по длине и на выход.

При напорном движении и затопленном выходном сечении

$$Q = \mu_{\pi} \omega \sqrt{2g(H_0 + i l_{\text{тр}} - h)}, \quad (4)$$

где  $h$  — глубина воды в нижнем бьефе.

Анализ показывает, что при безнапорном движении воды в трубе (при  $H < 1,22 a$ ) подтопление надо учитывать тогда, когда  $h$  превышает глубину воды в трубе  $h_{\kappa}$ , близкую к критической:  $h_{\kappa} = 0,600 H^{0,977}$ . При  $h \leq h_{\kappa}$  расчет ведется по формуле (1).

В случае  $h > h_{\kappa}$  можно воспользоваться этой же формулой;  $b_{\kappa}$  определяется в определенной последовательности;  $h$  делится на  $k = 0,862 + 0,0584 h$ . Коэффициент  $k$  позволяет перейти к расчету глубины воды в трубе (после подтопления глубина больше  $h_{\kappa}$ , но меньше  $h$ ), которая является определяющей для указанного напора, поперечного сечения трубы и подтопления. Сред-

няя ширина потока  $b'_k$  в сечении с данной глубиной подставляется в формулу (1) вместо  $b_k$ :

$$b'_k = d - \frac{h \cdot \operatorname{ctg} \alpha}{0,862 + 0,0584 h} \quad (5)$$

где  $d$  – ширина трубы по низу;  $\alpha$  – угол у основания поперечного сечения трубы.

При обработке данных принято  $H_0 = H$  (не учитывается скоростной напор).

Процесс подтопления при полунапорном движении и при  $H \leq 1,56$  а напоминает подтопление безнапорного потока (сравним участки IY–YI и I–III) и отличен от полунапорного при  $H > 1,56$ а. При  $H = (1,22 - 1,56)$  а можно при описании процесса пользоваться зависимостями (1) и (5). При этом необходимо ввести поправку в коэффициент расхода и вместо  $m_k$  (для безнапорного движения) вводить в расчет  $m = k_1 m_k$ , где  $k_1 = 1,44 - 0,0464 H$  – коэффициент перехода к расчету полунапорного движения.

При  $H > 1,56$ а и полунапорном движении ( $h < 6,60 + 0,188 H$ ) нет необходимости учитывать влияние уровня нижнего бьефа; расчет ведется по формуле (2). При  $H > 1,56$ а и напорном движении в трубе до значений  $h < 6,68 + 0,073 H$  влияние глубины НБ не ощущается, расчет осуществляется по выражению (3). Участки III, YI и X графика (см. рис. 1), отражающие напорное движение воды в трубах, схожи между собой; пропускная способность для них рассчитывается по формуле (4) в том случае, если при исходном напорном движении воды в трубах уровень НБ  $h \geq 6,68 + 0,073 H$ , а при исходном полунапорном  $h \geq 6,60 + 0,188 H$ . По этой формуле необходимо вести расчет также для участков III и YI. При этом уровень нижнего бьефа должен превышать значение  $h = 1,6 H^{0,685}$ . Переход трубы к работе полным сечением здесь происходит при  $h \geq 8,1 + 0,073 H$ .

Для условий эксперимента при переходе от неподтопленного (участки I, IY, IX) к подтопленному напорному движению перепад на сооружении (т.е.  $H - h$ ) вначале снижается, а затем, после перехода к участкам III, YI и X, опять возрастает.

При повышении уровня воды ВБ происходит изменение суммы сопротивлений  $\Sigma \xi$ . Для определения  $\Delta \xi$  сравним уровни воды в ВБ при различных степенях подтопления с уровнями воды в ВБ при этих же расходах и неподтопленной трубе. Решая совместно уравнения (3) и (4), получим

$$\Delta \xi = \frac{2g\omega^2}{Q^2} [ (H_{\text{зат}} - h) - (H_{\text{незат}} - \eta_{\text{н а}}) ],$$

где  $H_{\text{зат}}$  и  $H_{\text{незат}}$  – глубины воды в верхнем бьефе при одинаковом расходе и соответственно затопленном и незатопленном выходном сечении.

Для участков III и YI сравнивались коэффициенты расхода в случае затопленного движения из формулы (4) и незатопленного напорного из формулы (3) при исследовании неподтопленной трубы.

На основании данных эксперимента подсчитаны значения  $\Delta \xi$  и построена зависимость  $\Delta \xi = f(H - h)$  (рис. 2). Точки на рис. 1 и 2, описывающие одина-

ковые расходы, обозначены однотипно. Как видно, для участков III и VI (при малых расходах) в исследованном диапазоне для каждого Q можно принять  $\Delta\xi = \text{const}$ .

Для близких к ним значений перепадов на сооружении были проведены дополнительные опыты (для  $Q = (500 - 3210) \text{ см}^3/\text{с}$ , см. рис. 2). Для подтопленного напорного потока (участки X) для каждого из расходов нельзя принять постоянным  $\Delta\xi$ .

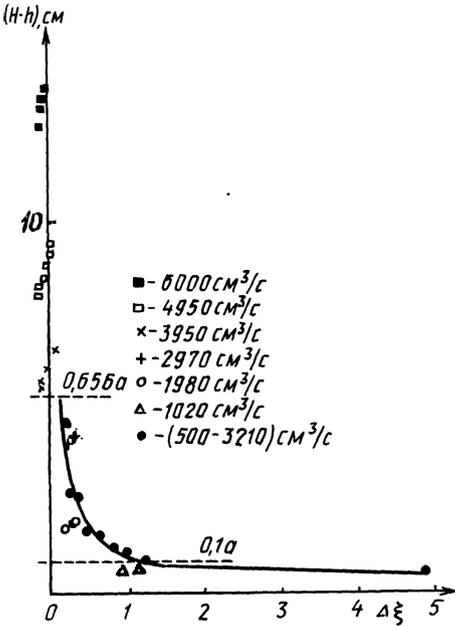


Рис. 2. Зависимость коэффициента  $\Delta\xi$  от перепада уровней на сооружении  $(H-h)$ .

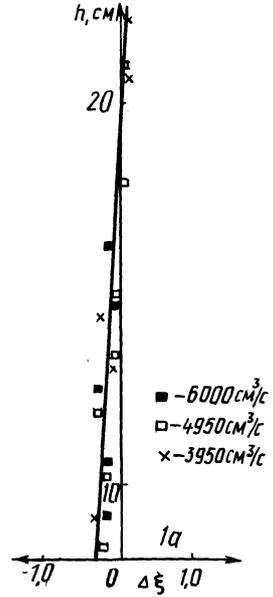


Рис. 3. Зависимость коэффициента  $\Delta\xi$  от глубины воды в нижнем бьефе  $h$ .

При  $(H-h) \leq 0,656a$  значение  $\Delta\xi$  необходимо определять по графику рис. 2 или по зависимости

$$\Delta\xi = \frac{1,046}{(H-h)^{1,289}}, \tag{6}$$

которая описывает этот график в диапазоне  $0,1a \leq (H-h) \leq 0,656a$ . При  $(H-h) < 0,1a$  можно пользоваться зависимостью

$$\Delta\xi = 12,68 - 15,58 (H-h). \tag{7}$$

Для значений  $(H-h) > 0,656a$  на рис. 3 показана зависимость  $\Delta\xi = f(h)$ , которую следует описать уравнением одной прямой для всех перепадов. Поэтому при  $(H-h) > 0,656a$

$$\Delta\xi = 0,796 + 0,0112h. \tag{8}$$

Полученные зависимости (5) — (8) с учетом границ их применения при использовании формул (1) и (4) дают возможность учесть подтопление при расчете трубчатого водопропускного сооружения с трубами треугольного поперечного сечения, работающими в условиях, которые схожи с экспериментальными. Зависимости даны для описанной модели сооружения ( $H$  и  $h$ , см). Их можно пересчитать для натуральных сооружений, пользуясь критериями моделирования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Алтунин В.И. Гидравлические исследования сооружений с гладкими и гофрированными трубами: Автореф. дис... канд. техн. наук. — М., 1977. — 24 с. 2. Трубы-регуляторы и трубы-переезды. Альбом 1. Пояснительная записка, чертежи. — Минск, 1976. — 110 с. 3. Розанов Н.П. Гидравлические расчеты водопропускных труб. — М., 1979. — 72 с. 4. Гатилло С.П., Филиппович И.В. О целесообразности применения треугольной и полукруглой геометрических форм трубчатых водосбросов. — Докл. ВАСХНИЛ, 1981, № 1, с. 38—40. 5. Руководство по проектированию и гидротехническому расчету регулирующих мелиоративных сооружений. — Минск, 1984. — 96 с.

УДК 627.83

И.В.ФИЛИППОВИЧ, канд. техн. наук,  
П.М.БОГОСЛАВЧИК (БПИ)

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗМЫВА РЕЗЕРВНОГО ВОДОСБРОСА НА КРУПНОМАСШТАБНЫХ МОДЕЛЯХ

Водохранилищные гидроузлы обычно имеют в своем составе водосбросы, предполагающие пропуск расчетных паводковых расходов реки. Практика показывает, что на полную пропускную способность водосбросы либо включаются крайне редко, либо длительное время простаивают без включения в ожидании расчетного паводка. Исходя из этого, целесообразным, по нашему мнению, является устройство в одном гидроузле двух водосбросов: основного запроектированного на расход высокой обеспеченности и часто включающегося в работу, и резервного, работающего очень редко либо вообще не работающего, запроектированного на расход редкой повторяемости.

В качестве резервного может быть использован водосброс по типу размываемой вставки. Он представляет ограниченную неразмываемой одеждой часть грунтовой плотины, гребень которой выше НПУ, но ниже гребня основных подпорных сооружений. Если пропускная способность основного водосброса исчерпывается, уровень в водохранилище повышается, благодаря чему начинаются перелив воды через гребень размываемого водосброса и его разрушение. Тем самым предотвращается перелив через основные подпорные сооружения. По окончании паводка размываемая вставка восстанавливается.

К настоящему времени такие сооружения функционируют на некоторых крупных гидроузлах Австралии, Индии, Турции, США, Сирии [3, 5].