

# ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО



18

Министерство народного образования Белорусской ССР  
Белорусский ордена Трудового Красного Знамени  
политехнический институт

# ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

РЕСПУБЛИКАНСКИЙ МЕЖВЕДОМСТВЕННЫЙ  
СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

Основан в 1971 году

ВЫПУСК 18

Минск  
"Вышэйшая школа"  
1989

УДК 626/628(476) (082)

*В62*

Редакционная коллегия:

*В.П. Старинский* (главный редактор), *Г.В. Васильченко*, *П.Д. Гатилло* (отв. секретарь), *Д.А. Козлов*, *П.Е. Лапчук*, *Е.М. Левкевич*, *А.И. Мурашко*, *И.В. Филитович*

Сборник посвящен исследованиям, имеющим приложение в различных областях водного хозяйства и гидротехники.

В ряде статей разрабатываются гидрометеорологические основы водохозяйственных расчетов мелиоративных, канализационных и других систем; рассматриваются методы очистки некоторых видов промышленных сточных вод; решаются вопросы проектирования мелиоративных насосных станций, рыбонасосов, рыбозащитных устройств; предлагаются конструкции водосбросных сооружений; исследуются свойства грунтов и распределения напряжений в основаниях сооружений.

Сборник предназначен для научных и инженерно-технических работников в области гидротехники, использования и охраны водных ресурсов.

В 3801000000 – 010 132–89  
М304 (03) – 89

© Издательство "Высшая школа",  
1989

## ОЦЕНКА РЕПРЕЗЕНТАТИВНОСТИ ДАННЫХ МЕТЕОСТАНЦИЙ В БЕЛОРУССИИ ДЛЯ ОПЕРАТИВНЫХ ВОДНО-БАЛАНСОВЫХ РАСЧЕТОВ

При проектировании и эксплуатации мелиоративных объектов необходимо располагать гидрометеорологической информацией конкретной территории (осадки, температура, дефицит влажности воздуха и т.д.). На этом основана, в частности, методика оперативного планирования режимов дождевания сельскохозяйственных культур [1], которая находит широкое применение в республике.

Наиболее обоснованные водно-балансовые расчеты обеспечиваются в случае, когда необходимые метеорологические элементы измеряются в непосредственной близости к объекту. Однако на практике это далеко не всегда возможно, поскольку требуются систематические круглосуточные наблюдения за метеоэлементами. Поэтому обычно предлагается использовать оперативные данные ближайших метеостанций и метеопостов при условии их репрезентативности. При прочих равных условиях она находится в обратной зависимости от расстояния между пунктами измерения метеоэлементов и мелиоративным объектом. Нами оценена связь декадных значений осадков ( $P$ , мм), температуры ( $t$ , °С) и дефицита влажности воздуха ( $d$ , мб), измеряемых на различных расстояниях от данного пункта.

Исходные декадные данные  $P$ ,  $t$ ,  $d$  взяты за период май—август 1978—1982 гг. по двадцати пяти метеостанциям БССР. Для каждой из них были образованы ряды указанных элементов длиной по 60 декад.

Связь величин гидрометеорологических элементов в различных точках территории может характеризоваться пространственной корреляционной функцией  $r(L)$ , выражающей зависимость корреляционной связи  $r$  исследуемого элемента от расстояния  $L$  между пунктами его определения [2, 3].

При построении функции  $r(L)$  вначале рассчитывались матрицы коэффициентов корреляции  $r$  по рядам декадных  $P$ ,  $t$  и  $d$  для всевозможных пар метеостанций  $N = 300$ . Для этих же пар были ранее [4] определены расстояния между станциями. Для каждого элемента строились графики связи  $r = f(L)$  и на ЭВМ рассчитывались соответствующие уравнения регрессии. При этом для температуры и дефицита влажности воздуха указанная связь оказалась линейной (формулы 1 и 2), а для осадков — аппроксимировалась функцией (3):

$$r_t = 1 - 1,6 \cdot 10^{-4} L; \quad (1)$$

$$r_d = 1 - 5,6 \cdot 10^{-4} L; \quad (2)$$

$$r = 1 - 0,047L^{0,46}. \quad (3)$$

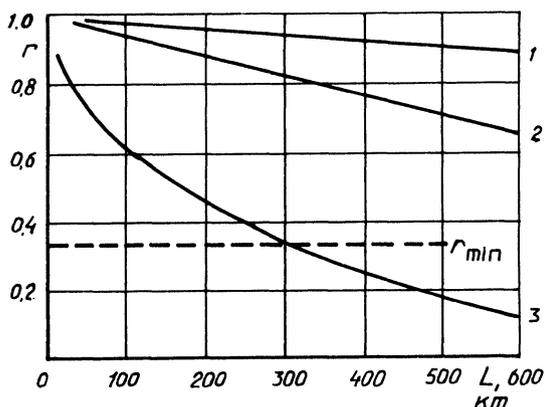


Рис. 1. Корреляционные функции декадных значений метеорологических элементов на территории БССР:

- 1 — температура воздуха;  
2 — дефицит влажности воздуха; 3 — осадки.

Коэффициенты корреляции формул (1), (2) и корреляционное отношение формулы (3) соответственно равны 0,91, 0,84 и 0,81. Значения  $T$ - и  $F$ -критериев выше допустимых на 5 %-м уровне значимости. Пределы изменения  $L = 44 \dots 569$  км.

Анализ графиков 1...3 (рис. 1) показывает, что в целом связь декадных метеозаписей уменьшается с увеличением расстояния между пунктами их измерения. Однако абсолютные величины  $r$  и интенсивность их уменьшения с ростом  $L$  существенно различны для  $t$ ,  $d$  и  $P$ .

Для температуры воздуха наблюдаются весьма высокие значения  $r$  вплоть до максимальных расстояний. Так, при  $L = 500$  км  $r = 0,92$ , а при  $L < 125$  км  $r_t > 0,98$ . Коэффициенты корреляции для дефицита влажности воздуха несколько ниже температурных, но в целом также отражают достаточно тесную связь  $r_d = f(L)$ . В частности, при  $L < 179$  км  $r > 0,90$ .

Значительно меньшие величины  $r$  характерны для декадных осадков, и наибольшее их снижение отмечается при меньших значениях  $L$ . Для  $L$ , равных 50, 100 и 500 км,  $r_p$  соответственно равны 0,72, 0,61 и 0,18. При  $L > 300$  км корреляционная связь для  $P$  становится ниже минимального существенного значения  $r_{min} = 0,33$ .

Таким образом, значения температуры и дефицита влажности воздуха за декаду и близкие к ней интервалы времени с достаточной надежностью могут приниматься по данным их измерений в пунктах, удаленных на расстоянии до 100...150 км. Практически это перекрывает расстояние между любым объектом на территории БССР и ближайшей метеостанцией. Связь декадных сумм осадков не является достаточно высокой даже при расстоянии 30...50 км, что объясняется локальным характером летних дождей. Для периодов короче декады следует ожидать еще меньших значений  $r_p$ . Поэтому использование данных ближайших метеостанций по осадкам может привести к большим погрешностям при оперативных водно-балансовых расчетах. Во избежание этого осадки рекомендуется измерять непосредственно в пределах мелиоративного объекта, что в условиях МУООС или любого хозяйства республики не представляет практических затруднений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Методические рекомендации по оперативному планированию режимов дождевания сельскохозяйственных культур на минеральных почвах Белорусской ССР. — 1986. — 44 с. 2. Сиротенко О.Д. Получение и использование данных о статистической структуре полей осадков в агрометеорологических расчетах // Тр. ИЭМ. — М., 1969. — Вып. 8. — С. 92–97. 3. Сачок Г.И. Пространственно-временная структура гидрометеорологического режима Белоруссии и прилегающих регионов. — Мн., 1980. — 222 с. 4. Голыченко М.Г., Вихров В.И. Пространственная корреляция оросительных норм многолетних трав на территории Белоруссии // НТИ по мелиорации и водному хозяйству / Минводхоз БССР, 1984. — № 9. — С. 18–20.

УДК 626/556.810(476)

А.А. ВОЛЧЕК

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ИСПАРЕНИЯ

С ростом масштабов водохозяйственного строительства наметился переход от создания локальных систем к системам, охватывающим большие территории со всем разнообразием природных и хозяйственных условий. В свою очередь возникла необходимость более полного и точного учета пространственно-временных колебаний ресурсов и потребления воды [1, 2]. Нами сделана попытка представить испарение на территории Белоруссии в виде непрерывных стохастических полей и исследовать их статистическую структуру.

Характерной особенностью испарения является неупорядоченность, турбулентность, большая зависимость от географических условий, что затрудняет его описание, как непрерывного процесса во времени и по территории. Не представляется возможным такое описание поля испарения, которое позволило бы задать интересующие величины в каждой точке пространства  $(x; y; h)$  и в каждый момент времени  $t$ . Нами использован аппарат корреляционных функций с установлением связей типа:

$$R(M_0 M) = R(x_0; y_0; h_0; t_0; x; y; h; t), \quad (1)$$

где  $M_0$  и  $M$  — соответственно исходная и текущая точки;  $R$  — параметр корреляционной функции.

Для стационарных полей, введя переменную  $\tau = t - t_0$  (сдвиг во времени), представим корреляционную функцию в полярных координатах  $\rho = ((x - x_0)^2 + (y - y_0)^2)^{1/2}$  и  $\alpha = \arctg((y - y_0)(x - x_0)^{-1})$ . При этом для равнинных территорий разностью отметок местности  $(h - h_0)$  можно пренебречь. Тогда

$$R(M_0; M) = R(x_0; y_0; \rho; \alpha; \tau), \quad (2)$$

где  $\rho$  — расстояние между метеопунктами;  $\alpha$  — угол между северным направлением и линией, соединяющей метеостанции.

Пространственные корреляционные функции (ПКФ) однородных и изотропных полей не зависят от координат полюса  $(x_0; y_0)$ , а также от направле-

ния  $\alpha$  и описываются как

$$R(\rho) = f(\rho, \tau). \quad (3)$$

Требования однородности и изотропности диктуют необходимость предварительной оценки статистической структуры исследуемых полей испарения. Зафиксировав  $\tau$  и получив ПКФ как функцию  $R = f(\rho)$ , в поле эмпирических точек наводят корреляционную функцию по точкам средневзвешенных значений коэффициентов корреляции и соответствующих средних арифметических значений расстояний для каждой градации.

Полученные линии принимаются за истинные зависимости  $R = f(\rho)$ , отвечающие природе пространственной корреляционной связности испарения на данной территории, а отклонения эмпирических точек от этой пространственной модели обусловлены случайными флуктуациями выборочных данных. Задача сводится к доказательству нуль-гипотезы и требует статистической проверки. Наиболее детально этот вопрос рассмотрен в работах Г.А. Алексеева [3], А.В. Рождественского, А.И. Чеботарева [4].

Если эмпирические и теоретические вероятности оказываются близкими, то исследуемая ПКФ признается однородной, а соответствующее поле изотропным, т.е. нулевая гипотеза не опровергается. При существенном расхождении между эмпирическими и теоретическими вероятностями нулевая гипотеза отвергается и признается альтернатива о неоднородности эмпирической ПКФ. В этом случае рассматриваемое поле должно быть уменьшено. Проверка повторяется до получения однородного и изотропного полей.

Для исследования структуры временных рядов применены автокорреляционные функции в сочетании с интегральными. Это позволяет выявить менее выраженные циклы в ряду лет с большими периодами колебаний.

Методика оценки статических характеристик пространственной структуры полей испарения не отличается от оценки полей других элементов, не представляют сложности и сами расчеты. Однако требуется учесть ряд специфических особенностей. Во-первых, данные отдельных почвенных испарителей или лизиметров, с помощью которых определяются величины испарения, являются репрезентативными лишь для однородной по условиям формирования испарения территории, в то время как для решения поставленной задачи необходимо определить не структуру испарения в окрестностях отдельных метеостанций, а поле испарения как стохастического формирования в целом. Во-вторых, малый объем исходной выборки в пунктах наблюдений неизбежно ведет к искажению статистических модельных представлений испарения в точке, а количество пунктов наблюдений недостаточно для качественного представления его пространственно-временной структуры. В рядах наблюдений имеются пропуски, отмечается нестационарность наблюдений во времени и неоднородность рядов. Создается ситуация, при которой, имея четкую методику исследования поля испарения, не просто ее реализовать на практике. Увеличение потенциала информативности исходных выборок (одна реализация в год) также не приводит к желаемому результату. Успешное решение поставленной задачи в значительной степени зависит от корректного модельного представления исследуемого поля. Поэтому в ряде случаев целесообразнее отказаться от наблюдаемых величин, а использовать рассчитанные, что и сделано в настоящей работе. Нами выполнен анализ существующих математических

моделей и предложенных на их основе методов [5]. Наиболее приемлемыми в условиях Белоруссии являются методы гидролого-климатических расчетов (ГКР) и комплексный. Для массовых расчетов нами использован метод ГКР [6], откорректированный для условий Белоруссии [7], а для контроля месячных величин суммарного испарения, рассчитанных за период 1947–1981 гг. для 39 опорных метеопунктов Белоруссии, – комплексный. Проверка результатов показала, что рассчитанные величины максимально возможного  $Z_m$  и суммарного  $Z$  испарений корректны и образуют методически однородные поля. Последние можно подвергать специальному анализу и математической обработке.

В связи с большим объемом вычислений данная методика реализована нами комплексом прикладных программ в системе ЕС ФОРТРАН. Для оценки реальных возможностей выполнен численный эксперимент на примере описания полей  $Z_m$  и  $Z$ . Изменчивость  $Z_m$  во времени невелика. Коэффициенты вариации колеблются: для годовых значений – 0,04... 0,06; для теплого периода – 0,05...0,07; для летних месяцев – 0,15...0,22. Изменчивость  $Z$  несколько большая. Так, коэффициенты вариации испарения для годовых значений в среднем составляют 0,11, для теплого периода – 0,13, вегетационного – 0,15, для летних месяцев – 0,26. Максимальная изменчивость  $Z$  – в июле – 0,34. К этому времени весенние влагозапасы израсходованы и испарение определяется в основном конвективными атмосферными осадками. Пространственная изменчивость величин  $Z_m$  и  $Z$  рассматриваемой территории сопоставима с временной изменчивостью. Коэффициенты пространственной вариации  $Z_m$  по территории для принятых промежутков времени (год, теплый период, летние месяцы) соответственно составляют 0,03...0,04; 0,03...0,05; 0,05...0,16, а  $Z$  – 0,05... 0,16; 0,06...0,19; 0,10...0,36. Анализ ПКФ позволил оценить асинхронность величин  $Z_m$  и  $Z$ . Установлено, что коэффициенты парной корреляции  $R$  с увеличением  $\rho$  в среднем закономерно убывают, хотя и наблюдается значительный разброс для отдельных точек. Подобное рассеивание, очевидно, связано со случайными колебаниями парных коэффициентов корреляции, обусловленными ограниченностью используемых в расчетах выборок [4].

Корреляционные функции аппроксимируются зависимостями вида

$$R(\rho) = \exp(-a\rho^\beta), \quad (4)$$

где  $a$  и  $\beta$  – структурные параметры.

Пространственные корреляционные функции  $Z_m$  для различных интервалов осреднения в диапазоне расстояний 0...700 км представлены на рис. 1. Различия между ПКФ для отдельных интервалов времени в диапазоне расстояний 0...300 км находятся в пределах точности расчетов. Чем меньше интервал осреднения, тем быстрее с увеличением расстояния затухают корреляционные связи.

Поля испарения менее однородны, чем поля максимально возможного испарения, так как, помимо теплоэнергетических ресурсов, существенное влияние на испарение оказывают свойства испаряющей поверхности, поэтому поля  $Z$  проверялись на однородность и изотропность.

При доверительных интервалах  $\pm\sigma$  и  $\pm 2\sigma$  поля испарения неоднородны, поэтому они уменьшались в размерах. В итоге выявлена однородность ПКФ и

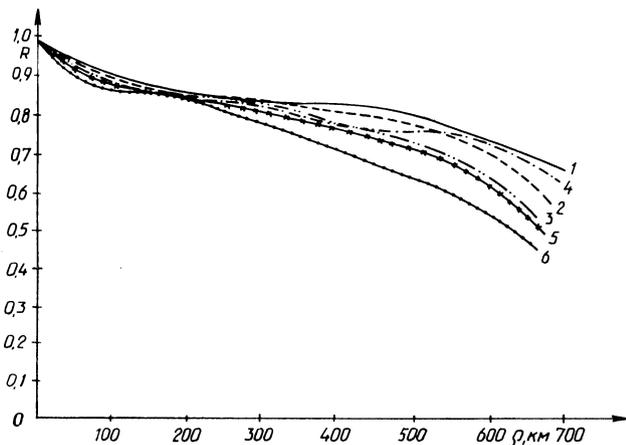


Рис. 1. Пространственные корреляционные функции максимально возможного испарения (территория Белоруссии):

1 – год; 2 – теплый период; 3 – май; 4 – июнь; 5 – июль; 6 – август.

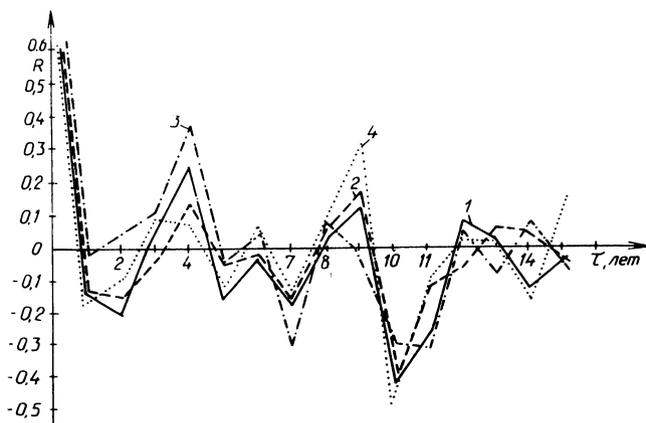


Рис. 2. Автокорреляционные функции максимально возможного испарения:

1 – Минск; 2 – Верхнедвинск; 3 – Брест; 4 – Василевичи.

изотропность соответствующих полей испарения Черноморского склона (в пределах Белоруссии) за февраль, июнь, июль, октябрь, ноябрь, вегетационный и теплый периоды, год, а также полей испарения различной ориентации.

Анализ автокорреляционных функций выполнен для годовых значений величины  $Z_m$  по всей территории. Эти колебания в общем случае опериодичены, так как фазы и амплитуды циклов в процессе теплообмена меняются. Коэффициенты автокорреляции  $R$  (1) величин  $Z_m$  обычно не превышают 0,2...0,3, ряды  $Z_m$  отличаются от бессвязных рядов дальними внутрирядными связями, цикличностью и слабой корреляционностью смежных членов. Всплеск автокорреляционных функций ( $R$  (3)... $R$  (5) равны  $0,40 \pm 0,11$  и  $R$  (9)...  $R$

(11)  $-0,50 \pm 0,12$  вызван не присутствием "белого шума", а свидетельствует о наличии 3...5 и 9...11-летних циклов в динамике изменения рассматриваемых метеоэлементов (рис. 2).

Учет асинхронности процессов формирования максимально возможного испарения и суммарного испарения поверхности суши в ходе исследования пространственно-временных колебаний их полей дает возможность уточнить водные ресурсы и расходные статьи водного баланса на территории Белоруссии.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Калинин Г.П. Проблемы глобальной гидрологии. – Л., 1968. – 377 с. 2. В о р о п а е в Г.В., М е с т е ч к и н В.Б. Физико-географические основы формирования водохозяйственных балансов. – М., 1981. – 135 с. 3. А л е к с е е в Г.А. Объективные методы выравнивания и нормализация корреляционных связей. – Л., 1971. – 363 с. 4. Р о ж д е с т в е н с к и й А.В., Ч е б о т а р е в А.И. Статистические методы в гидрологии. – Л., 1974. – 424 с. 5. В о л ч е к А.А., М а р ч у к В.Н. О методах определения суммарного испарения. – Брест, 1987. – 31 с. Деп. в ЦБНТИ Минводхоза СССР, 2.12.87, № 459. 6. М е з е н ц е в В.С., К а р н а ц е в и ч И.В. Увлажненность Западно-Сибирской равнины. – Л., 1969. – 158 с. 7. В о л ч е к А.А. Методика определения максимально возможного испарения по массовым метеоданным (на примере Белоруссии): Научно-техническая информация по мелиорации и водному хозяйству / Минводхоз БССР. – Мн., 1986. – № 12. – С. 17–21.

УДК 551.577.36(476)628.212.2

П.Д. ГАТИЛЛО, А.Н. ОДИНЕЦ

### ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЖИМА АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ И ПОВЕРХНОСТНОГО СТОКА, НЕОБХОДИМЫЕ ПРИ РАСЧЕТАХ ДОЖДЕВОЙ КАНАЛИЗАЦИИ ГОРОДОВ

Имеющиеся нормативные руководства по проектированию дождевой канализации касаются прежде всего определения расчетной интенсивности атмосферных осадков и производных от нее расчетных максимальных расходов поверхностного стока методом предельных интенсивностей при соответствующих периодах однократного превышения. Поскольку поверхностный сток с застроенных территорий загрязнен, основную его часть (не менее 70 % годового объема) рекомендуется направлять на очистку [1...5]. Речь идет о расходах, соответствующих интенсивности предельных дождей с периодами однократного превышения  $p = 0,05-0,10$  года. Так как пропускная способность коллекторов, отводящих стоки на очистку, значительно меньше пропускной способности подводящих коллекторов, часть стоков во время ливней будет попадать в приемники без очистки. Временная инструкция [3] допускала лишь один вариант предельного расхода (в условиях БССР  $p \approx 0,045$  года), т.е. игнорировала вопросы сочетания величин канализуемых территорий с водоносностью приемников.

Однако еще до признания целесообразности направлять на очистку часть стоков дождевой канализации селитебной территории [2] с территорий про-

мышленных предприятий, на которых нет специфических веществ с токсическими свойствами, и весь их объем с территорий, имеющих в своем составе токсические или значительные количества органических веществ [5], в Белоруссии проводились охранные мероприятия. Например, в г. Минске для защиты приемников в городской черте разработана и осуществляется система перехватывающих коллекторов, отводящих стоки дождевой канализации ниже города для их очистки в прудах. В Солигорском промышленном районе промливневый сток некоторых площадок отводится в пруд-регулятор. Последний, снижая загрязнение Солигорского водохранилища, является одновременно источником технического водоснабжения и позволяет экономить электроэнергию на перекачку по техническому водоводу речной воды из довольно удаленного водозабора. Аналогичное решение принято и в г. Сморгони. В Солигорске, кроме того, проработана замкнутая система водоснабжения, предусматривающая очистку, доочистку и полное использование для целей технического водоснабжения и на сельскохозяйственных полях орошения сточных вод не только промышленной и промливневой, но и городской дождевой канализации.

После выхода СН 496–77 [3] при разработке схем перспективного развития канализации городов БССР рассматривали обычно варианты полной раздельной и полураздельной систем. Однако расчетный расход стоков дождевых вод, направляемых на очистку по перехватывающим (при полной раздельной) или по общесплавным (при полураздельной системе канализации) коллекторам, принимали однозначно и вне зависимости от водоносности приемников. Выбор варианта определялся строительной стоимостью, но без проработки вопросов влияния на приемники части стоков, сбрасываемых без очистки во время ливней и интенсивного таяния снега. С выходом СНиП [1], учитывающего рекомендации [2] и [5] по установлению количества стоков, направляемых на очистку, можно ожидать проработки вариантов их предельного расхода. Однако необходимы и отсутствовавшие до сих пор прогнозные расчеты качества воды приемников с учетом влияния неочищенных и очищенных стоков дождевой и очищенных промышленной канализаций.

При проектировании полной раздельной дождевой канализации без мероприятий по охране от загрязнения и снижению диаметров водоводов необходимы лишь данные для определения пропускной способности сети. СНиП [1, 6] предлагают принимать эти значения по данным обработки материалов плевниографических наблюдений. Если же таковых нет или они весьма непродолжительны, использовать приведенные в них таблицы и карты.

Уточненные данные параметров для расчета интенсивности дождей и дождевого стока по методам СНиП приведены для условий БССР на основе обработки наблюдений в 11 пунктах [7], а для территории СССР, включая и Белоруссию, – на основе обработки наблюдений более чем в трех тысячах пунктах [8].

Для расчетов уменьшения диаметров коллекторов за счет регулирования стока следует иметь данные о режиме стока (гидрограф) в расчетный ливень. При быстром опорожнении регулирующих емкостей (в течение или немногим спустя после прекращения стока) для решения возникающих задач достаточно располагать гидрографом только одного расчетного ливня. Если же регулирующие емкости сбрасываются малоинтенсивно, последующие осадки могут

выпасть до опорожнения емкостей. Такие задачи можно решать только на основе гидрографов дождей, объединяемых в дождливые периоды.

Наиболее распространенной является методика построения гидрографа для случая, когда интенсивность осадков, наибольшая вначале, постепенно снижается [4]. Исследованы возможности аналитического описания и построения гидрографов при иных режимах изменения интенсивности ливней [9, 10], сопоставлены результаты регулирования стока на основе их использования [4]. Объемы стока, вычисленные по площади гидрографа М.В. Молокова и по величине слоя осадков, различаются, хотя максимальный расход гидрографа соответствует интенсивности дождя с тем же периодом однократного превышения, что и у суммы осадков, а коэффициенты стока и площади водосборов в обоих случаях одинаковы. Возникает необходимость согласования этих вопросов или подбора более приемлемого варианта, например, на основе обобщения совмещенных безразмерных гидрографов.

Способность рек ассимилировать загрязнения, сбрасываемые со стоками дождевой канализации, проверяют [5] сопоставлением количества кислорода, необходимого для окисления загрязнений, содержащихся в осевших взвесах, с его суточными ресурсами в проточной воде. В качестве расчетной суммы атмосферных осадков, сток от которых учитывается при оценке вносимых загрязнений, рекомендуется принимать средний из ежегодных максимумов суточных сумм осадков [8, 11]. Однако это правомерно в случае сброса в приемник всего объема стоков дождевой канализации. Если же часть их направляется на очистку, то количество оседающих в приемниках взвесей логично определять только по стокам, попадающим в приемники из разделительных камер. Рекомендации [5] этой ситуации не рассматривают, так как по предлагаемому в них исходным данным такого расчленения объема стока ливней на две части вообще произвести нельзя.

В ходе проектирования дождевой канализации возникает необходимость решения и многих других задач. Для уменьшения загрязнения приемников сбрасываемой частью стоков интенсивных ливней на устьевых участках коллекторов могут размещаться резервуары-регуляторы (рис. 6.6, в [4]). Для определения производительности очистных сооружений и вместимости буферного регулирования стоков, поступающих по перехватывающим или общесплавным коллекторам к кустовым или общегородским станциям очистки, необходимо иметь гидрографы поступления этих стоков в расчетные дождливые и половодные периоды. При проектировании замкнутых систем водоснабжения, кроме изложенного, следует установить ресурсы воды в расчетные мало-, средне- и многоводные годы, их внутригодовое распределение с учетом не только дождевых, но и всех других вод.

Анализ показал, что, кроме пренебрежения вопросами прогноза влияния дождевой канализации на качество воды в приемниках, весьма приближенно устанавливаются регулирующие емкости проливневой полной раздельной и перед очистными сооружениями полураздельной канализаций. Объяснить это можно неразработанностью характеристик режима стоков дождевых и талых вод.

Случайный характер этих стоков зависит от атмосферных осадков, многих других климатических и местных факторов. Режим прохождения по дож-

девой канализации стоков весьма сложен и изменчив. Основная задача – выявить характерные (расчетные) сочетания объемов, расходов, продолжительности стоков, по которым можно было бы определять параметры сооружений, обеспечивающих требуемую степень благоустройства канализируемой территории, охрану приемников от загрязнения, минимум приведенных затрат на создание канализационной сети и проведение охранных мероприятий. Нарушений нормального режима прохождения стоков должно быть не больше, чем это предопределено принятием расчетного периода однократного превышения.

Особенностью дождевой канализации является эпизодический характер прохождения стоков (за исключением условно чистых). По проводимым несистематическим наблюдениям (материалы не публикуются) получить расчетные значения стока нельзя, однако они могут служить основой для разработки методики расчета стоковых характеристик по данным об атмосферных осадках. Систематические наблюдения (в том числе плювиографические) за атмосферными осадками (материалы публикуются) позволяют рассчитать характеристики стока дождевых и талых вод. В современных условиях, кроме вышеназванных характеристик, следует располагать гидрографами стоков в дождливые периоды и при таянии снега, а также характеристиками количества всех видов стоков (дождевых, талых, условно чистых, поливомоечных вод) в разные по водности годы и их внутригодовое распределение.

Пропускная способность дождевой канализации городов, установленная на основе определения расчетных максимальных расходов дождевых вод методом предельных интенсивностей, замечаний не вызывает. Поэтому на этих вопросах мы не останавливаемся.

На характер гидрографов стока дождевых вод влияет ряд параметров: сумма осадков за дождливые периоды и входящие в них дожди; количество дождей, характер их распределения по величине и времени; продолжительность дождей и промежутков между ними, дождливых периодов в целом; интенсивность осадков и ее изменения в течение дождей и др. В общем случае условия ассимиляции сбрасываемых со стоками загрязнений и необходимые регулирующие емкости будут соответственно тем сложнее, чем больше сумма осадков, меньше промежутки времени между дождями, продолжительность дождей, дождливых периодов и групп дождей внутри этих периодов. При отсутствии достаточно тесных корреляционных связей в качестве расчетных принимают дождливые периоды, угрожающие загрязнением и требующие максимальных регулирующих емкостей. Важно, чтобы расчетная повторяемость таких периодов соответствовала наблюдаемым в природе.

Для того чтобы из множества различных сочетаний дождей выбрать расчетное, целесообразно всю массу плювиографических наблюдений рассортировать и представить в виде единой системы.

Суммы осадков распределяют соответственно их величинам:  $I$  – за один дождь, независимо от того, был ли каждый из них одиночным или входил в состав дождливого периода –  $h_{д.п}^I(p)$ ;  $2$  – за весь дождливый период, независимо от того, сколько дождей входит в его состав, –  $h_{д.п}^{II}(p)$ ;  $3$  – за дождливые периоды, состоящие из одного –  $h_{д.п}^{III}(p)$ ; двух –  $h_{д.п}^{IV}(p)$ ; трех –  $h_{д.п}^{V}(p)$ ; четырех –  $h_{д.п}^{VI}(p)$ ; пяти и более дождей –  $h_{д.п}^{\geq V}(p)$ . Для ряда метеостанций

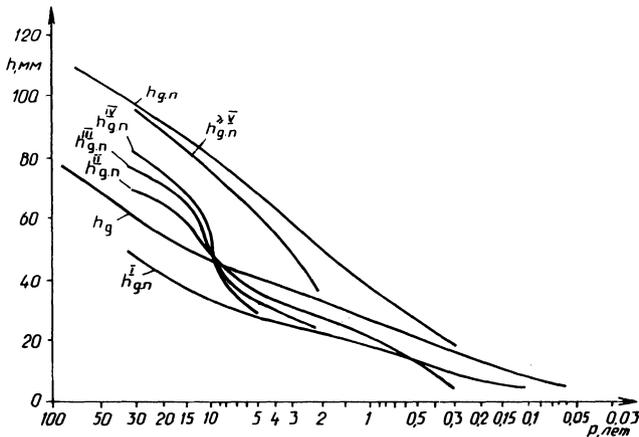


Рис. 1. Распределение сумм атмосферных осадков за дождливые периоды с различным количеством дождей.

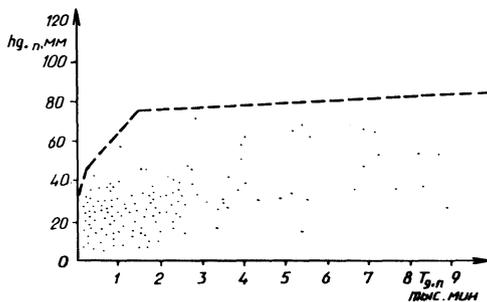


Рис. 2. Связь между суммами атмосферных осадков и продолжительностью дождливых периодов.

Белоруссии нами установлены распределения  $h_d(p)$  и  $h_{д.п}(p)$  и методика их построения [12, 13].

Последующие проработки показали, что дождливые периоды со средней интенсивностью  $\geq 0,005$  мм/мин могут включать до шести-восьми и более дождей (рис. 1). Для принятой величины  $p$  могут быть установлены суммы осадков за весь дождливый период  $h_{д.п}$ , наибольший дождь  $h_d$  и т.д.

Если по сумме осадков для каждого дождя определить период  $p$  его однократного превышения (с помощью распределения  $h_d(p)$  на рис. 1), то методом предельных интенсивностей можно установить максимальные расходы, а затем гидрографы и продолжительность стекания вод каждого из этих дождей. Разместить полученные гидрографы дождей внутри расчетного периода можно по верхней огибающей заблаговременно построенного поля точек эмпирических связей между суммами осадков и продолжительностью дождливых периодов (рис. 2), устанавливая по ней промежутки времени от начала первого до окончания каждого последующего дождя и, наконец, всего дождливого периода  $T_{д.п}(h_{д.п})$ .

Следует отметить возможность замены в расчетном периоде варианта первого дождя (например, с суммой осадков 55 мм) вариантом двух дождей

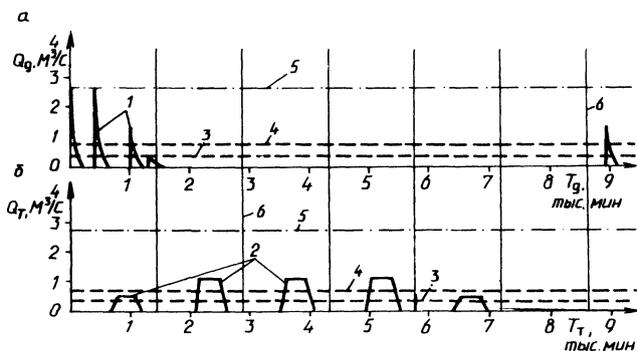


Рис. 3. Пример гидрографов коллектора дождевой канализации (площадь водосбора – 100 га, время добегания стока – 30 мин) :

*a* – сток дождевых вод в дождливый период (сумма атмосферных осадков соответствует  $p = 20$  лет) ; *б* – сток талых вод в весну с максимальным запасом воды в снежном покрове обеспеченностью 5 %, 1 – гидрографы дождевых вод; 2 – гидрографы талых вод; 3,4 – расходы стоков, соответствующие интенсивности предельного дождя с периодами однократного превышения  $p = 0,05$  года и  $p = 0,10$  года; 5 – пропускная способность коллектора (интенсивность дождя  $p = 1$  год); 6 – границы суток;  $Q_d$  и  $Q_T$  – соответственно расход дождевых стоков и талых вод;  $T_d$  и  $T_T$  – соответственно время стока дождевых и талых вод.

(30 и 25 мм), поскольку, во-первых, такое сочетание представляется более вероятным и, во-вторых, необходимо еще выявление степени попадания в канализацию стоков столь большого и интенсивного дождя.

При низкой интенсивности опорожнения регулирующей емкости вместимость последней для задержания талых вод может превысить вместимость, требуемую для регулирования стока дождевых вод, поэтому необходимо располагать также и гидрографами расчетного половодья. При их построении временно можно использовать формулы и исходные данные [4] для определения расчетных максимальных расходов талых вод, а также их сток за 3...10 сут в течение 10 ч дневного времени [2]. Расчетный гидрограф имеет вид трапеции: начало стока в 11,00 по местному времени, максимум – к 12.30, продолжение – до 18,00, постепенное снижение и окончание – в 20.00 (рис. 3, б). Число дней со стоком можно вычислить, разделив его объем за половодье на объем стока за сутки (площадь гидрографа). Исходными данными являются: максимальный слой воды в снежном покрове расчетной обеспеченности (например, 5 %); сток с водосбора за вычетом площадей, с которых снег вывозится или не участвует в формировании стока напряженного периода (на крышах, в тени зданий, под пологом насаждений).

Нами изложена только схема работ и показана принципиальная возможность установления рассматриваемых характеристик. Многие вопросы подлежат изучению на базе обработки массовых материалов наблюдений в конкретных пунктах и в ходе экспериментов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. СНиП 2.04.03-85. Канализация. Наружные сети и сооружения / Госстрой СССР. — М., 1986. — 72 с.
2. Временные рекомендации по предотвращению загрязнения вод поверхностным стоком с городской территории (дождевыми, тальмами, поливомоечными водами). — М., 1975. — 38 с.
3. СН 496-77. Временная инструкция по проектированию сооружений для очистки поверхностных сточных вод / Госстрой СССР. — М., 1978. — 40 с.
4. М о л о к о в М.В., Ш и ф р и н В.Н. Очистка поверхностного стока с территории городов и промышленных площадок. — М., 1977. — 104 с.
5. Временные рекомендации по проектированию сооружений для очистки поверхностного стока с территорий промышленных предприятий и расчету условий выпуска его в водные объекты. — М., 1983. — 47 с.
6. СНиП 11-32-74. Канализация. Наружные сети и сооружения / Госстрой СССР. — М., 1975. — 38 с.
7. Методические рекомендации по расчету интенсивности дождей при проектировании канализации в условиях Белоруссии (временные). — Мн., 1978. — 32 с.
8. К у р г а н о в А.М. Таблицы параметров предельной интенсивности дождя для определения расходов в системах водоотведения. — М., 1984. — 110 с.
9. К у р г а н о в А.М. Закономерности движения воды в дождевой и общесплавной канализации. — М., 1982. — 72 с.
10. Г о н ч а р о н о к Б.М. Математическая модель хода дождя // Водоотведение и оценка качества поверхностных вод. — Мн., 1983. — С. 20-26.
11. Справочник по климату СССР // Влажность воздуха, атмосферные осадки и снежный покров. — М.; Л., 1964-1970 гг. — Ч. IV.
12. Г а т и л л о П.Д., О д и н е ц А.Н. Распределение периодов однократного превышения сумм осадков за дождь на территории Белоруссии // Водное хозяйство и гидротехн. стр-во. — Мн., 1984. — Вып. 13. — С. 25-34.
13. Г а т и л л о П.Д., О д и н е ц А.Н. Распределение сумм осадков за дождливые периоды на территории Белоруссии // Водное хозяйство и гидротехн. стр-во. — Мн., 1986. — Вып. 15. — С. 7-13.

УДК 628.1-192

АНДЖЕЙ КРУЛИКОВСКИ, ЛЕХ ДЗЕНИС

### ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ВОДОПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ НА ПРИМЕРЕ НЕКОТОРЫХ ГОРОДОВ ПОЛЬШИ

Выявление основных типов отказов водопроводных сетей, их классификация, анализ причин возникновения и разработка требований к уровню надежности систем водоснабжения являются одним из важнейших условий повышения качества водообеспечения потребителей.

В статье представлен опыт проведенных эксплуатационных наблюдений работы нескольких городских систем водоснабжения Польши, обеспечивающих водой: город "А" на 800 тыс. жителей (крупный); город "Б" на 250 тыс. жителей (средний); город "В" на 60 тыс. жителей (небольшой).

Период наблюдений для города "А" составлял 19 лет, для городов "Б" и "В" — 7 лет (1979-1985).

Водопровод в городе "А" в 1978 г. представлял систему трубопроводов из различных материалов общей протяженностью около 840 км. До 1970 г. использовались главным образом чугунные трубы, затем увеличилась доля асбестоцементных и пластмассовых труб. Водопроводная сеть состоит из магистральных трубопроводов диаметром 400...1000 мм и распределительных трубопроводов диаметром 80..400 мм. Значительная часть сети (центр города) проложена 50-60 лет назад.

Водопроводная сеть в городе "Б" представлена трубопроводами из разных материалов общей протяженностью около 360 км. Магистральные линии большей частью чугунные, диаметр – 350...1000 мм, распределительные – 80...350 мм.

Общая протяженность водопровода в городе "В" около 86 км (1985 г.), трубы чугунные (71 %) и стальные (29 %). Диаметр магистральных трубопроводов 400...800 мм, распределительных – 50...400 мм.

Для оценки надежности работы водопроводных сетей предлагается использовать следующие показатели:

*функцию надежности*, характеризующую вероятность безотказной работы элементов системы в определенном диапазоне времени

$$R(t) = 1 - F(t), \quad (1)$$

где  $F(t)$  – функция распределения времени безотказной работы;

*функцию плотности вероятности отказа элементов сети*, представляющую собой производную функции распределения времени безотказной работы сети

$$f(t) = F'(t), \quad (2)$$

*частоту отказов водопроводных сетей*, отражающую количество аварий в определенном диапазоне времени, отнесенное к 1 км длины сети

$$\alpha = N / (L \Delta t), \quad (3)$$

Оценка надежности работы водопроводных сетей в городах "А", "Б" и "В" позволила определить главные ее показатели. Например, время безотказной работы элементов сетей  $T_0$  может быть описано экспоненциальным распределением

$$F(t) = 1 - \exp(-\lambda t), \quad (4)$$

Степень соответствия статистического распределения отказов сетей в выбранных городах экспоненциальному закону была проверена по критерию согласия  $\lambda$  – Колмогорова, что показало справедливость принятой математической модели.

Примерные значения показателей надежности для сетей рассматриваемых городов получены равными:

для города "А"

$$R(t) = \exp(-0,196t); \quad f(t) = 0,196 \exp(-0,196t);$$

$$T_0 = 5,1 \text{ сут}; \quad \alpha = 0,34 \text{ год}^{-1} \text{ км}^{-1};$$

для города "Б"

$$R(t) = \exp(-0,1695t); \quad f(t) = 0,1695 \exp(-0,1695t);$$

$$T_0 = 5,9 \text{ сут}; \quad \alpha = 0,26 \text{ год}^{-1} \text{ км}^{-1};$$

для города "В"

$$R(t) = \exp(-0,212t); \quad f(t) = 0,212 \exp(-0,212t);$$

$$T_0 = 4,7 \text{ сут}; \quad \alpha = 0,41 \text{ год}^{-1} \text{ км}^{-1}.$$

Главные показатели надежности (функции надежности и плотности ве-

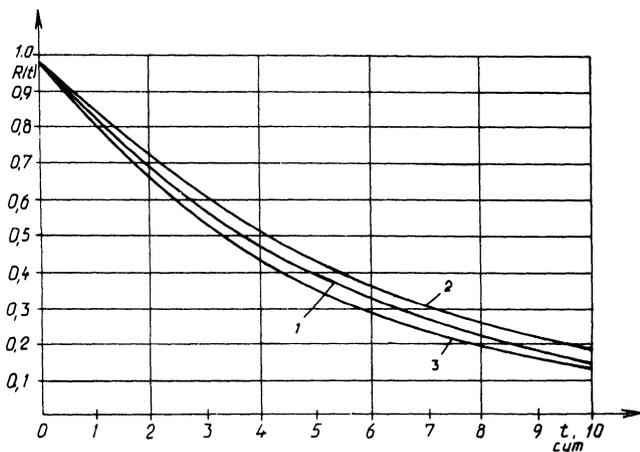


Рис. 1. Функции надежности работы водопроводных сетей в выбранных городах:  
1, 2, 3 – соответственно города "А", "Б", "В".

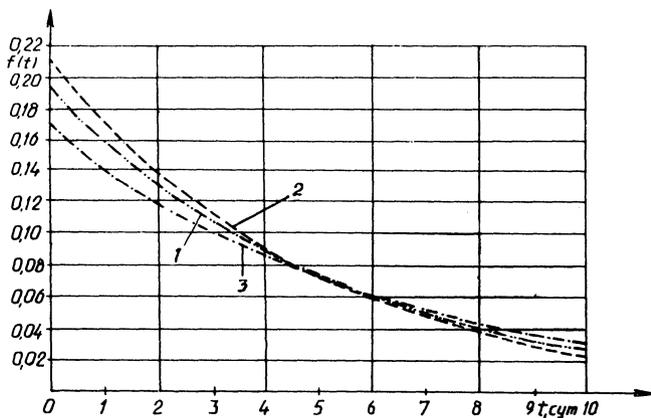


Рис. 2. Плотности вероятности отказов элементов водопроводных сетей в выбранных городах:  
1, 2, 3 – соответственно города "А", "Б", "В".

роятности отказов) для сетей рассматриваемых городов представлены на рис. 1 и 2.

Интересно распределение количества повреждений сетей в течение года (табл. 1). Самое большое количество аварий наблюдается в зимние месяцы в городах "А" и "Б". В городе "В" – три периода повышенной аварийности сетей: в январе, апреле и июле. Июльский период, очевидно, связан с туризмом в городе "В".

Анализ значений показателей надежности выявил их сходство в распределении во времени. Существенным оказалось небольшое значение времени безотказной работы сетей (не превышает шести суток), Вероятность безотказ-

**Процентное распределение количества поврежденных водопроводных сетей  
в анализируемых городах в течение года**

| Месяц        | Среднее количество аварий в городах, % |              |              |
|--------------|--|--------------|--------------|
|              | "А"                                    | "Б"          | "В"          |
| I            | 11,1                                   | 8,6          | 12,7         |
| II           | 9,2                                    | 7,2          | 4,8          |
| III          | 7,2                                    | 7,6          | 7,1          |
| IV           | 5,8                                    | 7,4          | 13,2         |
| V            | 6,0                                    | 8,2          | 7,4          |
| VI           | 6,3                                    | 7,5          | 7,7          |
| VII          | 6,8                                    | 7,8          | 11,9         |
| VIII         | 7,4                                    | 9,7          | 7,2          |
| IX           | 6,6                                    | 7,7          | 8,7          |
| X            | 9,5                                    | 7,2          | 6,7          |
| XI           | 12,2                                   | 9,7          | 7,0          |
| XII          | 11,9                                   | 10,8         | 5,4          |
| <b>Итого</b> | <b>100,0</b>                           | <b>100,0</b> | <b>100,0</b> |

ной работы элементов водопроводных систем для высказанных выше значений времени 34...38 %.

Таким образом, исследуемые водопроводные сети характеризуются значительной аварийностью, нестабильностью работы, а долговременная, надежная их эксплуатация оказывается маловероятной.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Ильин Ю.А. Надежность водопроводных сооружений и оборудования. — М., 1985. — 180 с. 2. D z i e n i s L., K r ö l i k o w s k i A. Analiza uszkodzeń miejskich sieci wodociągowych. Materiały konferencyjne "Niezawodność systemów wodociągowych i kanalizacyjnych. — Kielce, 1986. — 209-214 с. 3. D z i e n i s L., O r z e c h o w s k a M. Analiza awaryjności sieci wodociągowej w Białymstoku z zastosowaniem teorii niezawodności // Gaz, woda i technika Sanitarna. — 1987. — N 4. — С. 60-62. 4. D z i e n i s L., K r ö l i k o w s k i A. Analiza uszkodzeń sieci wodociągowych makroregionu północnowschodniego. Materiały konferencyjne "Problemy gospodarki wodno-ściekowej w regionach rolniczo-przemysłowych" — Białystok, 1987. — С. 85-92.

УДК 628.543

А.Г. ВОРОНИН

### ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД МЯСОКОМБИНАТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТОКОВ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

Одним из основных загрязнителей сточных вод предприятий мясной промышленности являются жировые частицы. Они значительно усложняют эксплуатацию канализационных сетей, вызывая их закупорку, затрудняют

биохимическую очистку сточных вод и в то же время представляют собой ценное сырье, которое может быть переработано для технических целей. Поэтому независимо от того, сбрасываются ли сточные воды предприятий мясной промышленности в городскую канализацию или подвергаются очистке перед сбросом в водоем на самостоятельных очистных сооружениях, на территории предприятия должна быть предусмотрена локальная очистка.

Для выделения жира из сточных вод широко применяются существующие типы жироловок, работающие по принципу простого отстаивания либо с предварительной аэрацией, в которых задерживается в среднем до 50 % жиров.

С целью повышения эффективности работы жироловок используются комбинации отстаивания с предварительным коагулированием либо хлорированием стоков. Эффект обезжиривания сточных вод с предварительным хлорированием в среднем составляет 90 %, содержание остаточного жира в осветленной воде — 30...95 мг/л. Однако эти способы оказались достаточно сложными в эксплуатации [2, 4].

Наиболее приемлемы флотационные способы очистки, сущность которых заключается в действии молекулярных сил, способствующих прилипанию частиц загрязнений к пузырькам воздуха, диспергированного в сточной воде, и всплывании образовавшегося комплекса частица—пузырек на поверхность воды.

Результаты очистки жиросодержащих сточных вод во флотомашинах импеллерного типа показали, что эффект очистки от жира составлял 83 % с остаточным содержанием 56 мг/л [3, 4].

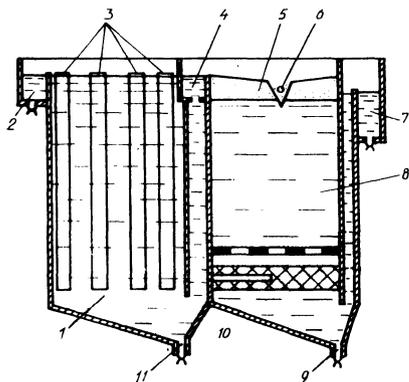
При этом надо отметить, что в процессе очистки образуется значительное количество пены (до 14 % от объема очищаемой воды), которую необходимо снова направлять на очистку [5].

В настоящее время при очистке сточных вод мясокомбинатов используют электрофлотацию. Сущность этого способа заключается в переносе вещества из жидкости на ее поверхность с помощью пузырьков газа, образующихся при электролизе воды. На эффективность процесса электрофлотации влияют: плотность тока на электродах, продолжительность обработки, материал и способы выполнения анода и катода, температура сточной жидкости. Оптимальная плотность тока при электрофлотации жира — 10...15 мА/см<sup>2</sup>, наибольшая скорость извлечения жира первые 3...5 мин работы электрофлотационной установки: наиболее благоприятная температура сточной жидкости — 30...40 °С. При соблюдении этих параметров эффект очистки сточных вод от жира достигает 98 %. Внедрение способа на Кишиневском мясокомбинате показало, что максимальный эффект очистки стоков составляет 96 % с остаточным содержанием жира 85 мг/л [6, 7].

Для интенсификации процессов очистки нами предложена предварительная обработка сточной воды токами высокой частоты. Интенсивное движение жировых частиц укрупняет их размеры, и при последующей очистке стоков электрофлотацией они интенсивно всплывают.

Рассмотрим схему и принцип работы электрофлотатора (рис. 1). Жидкость, которую надо очистить или из которой необходимо извлечь мелкие частицы какого-либо вещества, поступает по трубопроводу в приемную камеру 2 и переливается в первичную камеру 1, оборудованную пластинчатыми электродами 3. Здесь благодаря токам высокой частоты происходит укрупне-

Рис. 1. Схема электрофлотатора.



ние жировых и твердых частиц. Последние оседают в камере 1 и удаляются через штуцер 11. Жидкость с укрупненными жировыми частицами и освобожденная от взвеси поступает в приемную секцию 4, переливается в камеру флотации 8, оборудованную электродами 10, и насыщается пузырьками газа, которые образуются в результате электролиза воды. Пузырьки газа, встречаясь с укрупненными частицами жира, прилипают к ним и флотируют их на поверхность жидкости, образуя пену. Последняя удаляется по наклонному желобу 5, внутри которого проходит труба 6 с горячей водой. Пенообразная жиромасса в результате нагрева спадает и стекает в сборник. Освобожденная от взвешенных частиц жидкость переливается в секцию 7 и удаляется из аппарата. Частицы тяжелее воды опускаются вниз и выводятся через штуцер 9.

В проведенных исследованиях сточную воду, содержащую животный жир, предварительно обрабатывали токами высокой частоты (10...25 МГц) в первичной камере в течение 5 мин и подавали в электрофлотатор. Плотность тока варьировала в пределах от 3 до 30 мА/см<sup>2</sup>; продолжительность электрофлотации составляла 10 мин. Первичная камера оборудована железными электродами, а камера флотации — алюминиевыми.

Результаты опытов (рис. 2) показали, что с увеличением плотности тока выделение жира возрастает, а затем начинает несколько снижаться. Это объясняется тем, что при малой плотности тока процесс электрофлотации протекает медленно, так как жидкость слабо насыщается газовыми пузырьками. Необходимо сравнительно длительное время, чтобы к частицам жира прилипло достаточное число пузырьков и они начали подниматься вверх. С повышением плотности тока и ростом числа пузырьков, выделяющихся на электродах, скорость электрофлотации увеличивается, т.е. повышается степень насыщения жидкости пузырьками.

При плотности тока, превышающей оптимальное значение, газовых пузырьков становится слишком много, то только часть из них участвует в процессе флотации. Остальные пузырьки, проходя через жидкость, создают потоки, которые препятствуют флотации жировых частиц. Пузырьки поднимаются группами в виде струй, поэтому скорость их подъема увеличивается, а вероятность прилипания к частицам жира уменьшается. Таким образом, с ростом плотности тока (свыше 16 мА/см<sup>2</sup>) скорость электрофлотации начи-

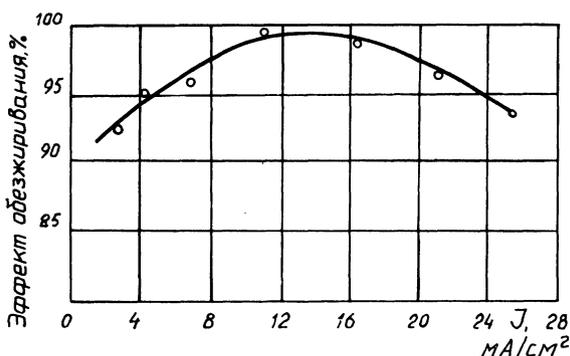


Рис. 2. Зависимость эффективности обезжиривания сточной жидкости от плотности тока на электродах при частоте тока 20 МГц.

нает снижаться. Оптимальными условиями для обезжиривания являются: плотность тока 12...16 МА/СМ<sup>2</sup>, частота — 20 МГц. Эффект обезжиривания составляет 99 %.

При частоте тока менее 20 МГц и плотности 12...16 МА/СМ<sup>2</sup> эффект очистки стоков от жира уменьшается. Это объясняется тем, что при данных условиях вероятность столкновения эмульгированных жировых частиц снижается и происходит слабое их укрупнение.

Предлагаемый способ позволяет интенсифицировать процесс очистки стоков, дополнительно получить ценное сырье — животный жир и уменьшить сброс загрязняющих веществ в водоемы. Экономический эффект от внедрения способа составит 15 тыс. руб. в год для мясокомбината с суточным расходом за жиренных сточных вод 1300 м<sup>3</sup>. Изложенный способ очистки сточных вод признан изобретением [1].

Таким образом, из рассмотренных способов очистки за жиренных сточных вод наиболее перспективным является комплексный метод очистки — метод электрофлотации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Воронин Г.А., Карелин Я.А. Способ очистки сточных вод от животного жира. Авторское свидетельство № 566775 // Бюллетень изобретений и товарных знаков. — 1977. — № 28. — С. 40—41.
2. Пальцев М.И., Ковтунова Л.Е., Порозова Л.Ф. Очистка сточных вод предприятий мясной и молочной промышленности. — М., 1980. — 33 с.
3. Вишневецкий М.А., Иванов Г.В. Очистка жиросодержащих сточных вод напорной флотацией // Изв. АН МССР. — 1980. — № 5. — С. 19—21.
4. Шифрин С.М., Иванов Г.В., Мишук Н.Т. Очистка сточных вод предприятий мясной и молочной промышленности. — М., 1981. — 272 с.
5. Иванов Г.В., Абаляева Т.И. Применение пенной сепарации для очистки сточных вод // Мясная индустрия СССР, — 1981. — № 6. — С. 21—22.
6. Емельянов Ю.В., Рогожин В.И. Электрохимическая очистка сточных вод // Мясная индустрия СССР. — 1982. — № 10. — С. 27—28.
7. Матов Б.М. Электрофлотационная очистка сточных вод. — Кишинев, 1982. — 170 с.

## ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ОСАДКОВ ПРОМЫВНЫХ МЕДЬСОДЕРЖАЩИХ СЕРНОКИСЛЫХ СТОЧНЫХ ВОД

Основным методом очистки промывных медьсодержащих стоков, образующихся в травильных отделениях кабельных заводов, является нейтрализация известковым молоком, в результате которой образуются осадки с высокой влажностью (не ниже 98...99 %) и низкой концентрацией сухого вещества. Перед вывозкой осадки должны подвергаться обработке. Для гидроксидных осадков наиболее распространенным и эффективным методом обезвоживания является вакуум-фильтрация на барабанных вакуум-фильтрах [1, 2]. Установлено, что в качестве методов интенсификации очистки промывных медьсодержащих стоков и обработки их осадков рекомендованы: добавка органических веществ (ацетон, этанол, н-пропанол), которые вводились в стоки перед нейтрализацией [3]; подогрев промывной воды и добавка в подогретую воду перед нейтрализацией н-пропанола [3]; подогрев сырого осадка и выдержка его при данной температуре в течение 5...15 мин [4]; добавка в сырой осадок органических веществ или твердых наполнителей (мел, гипс, сухой осадок) [5]. Как показали исследования [5], обезвоженный осадок после высушивания можно использовать в качестве интенсифицирующей добавки, так как в нем имеется кристаллический сульфат кальция, частички которого могут служить центрами кристаллизации, способствуя ускоренному выделению из раствора гипса. При обработке промывных вод предложенными методами [3...5] улучшаются параметры процесса обезвоживания: снижается влажность кека и удельное сопротивление осадков, уменьшается продолжительность фильтрования и возрастает производительность вакуум-фильтров. Отсутствие в литературе данных влияния подогрева в сочетании с ацетоном, а также совместной добавки сухого осадка и органических веществ на интенсификацию очистки промывных вод и обработку их осадков вызвало необходимость изучения влияния выше перечисленных факторов на кристаллизацию сульфата кальция и параметры процесса обезвоживания. Количество добавки сухого осадка изменялось от 6 до 30 г/л, органических веществ – от 5 до 30 мл/л, температура подогрева – от 40 до 80 °С. Методика проведения исследований и концентрация сульфата меди и серной кислоты в промывных водах приняты на основании [3, 4, 6, 7]. Результаты исследований приведены в табл. 1 и 2. Эффективность предложенных способов оценивалась в сравнении с контрольными опытами (без подогрева, добавки органических веществ и сухого осадка).

Анализ данных совместного влияния добавки сухого осадка и ацетона (или н-пропанола) показывает, что по сравнению с контрольными опытами влажность осадка для обоих составов промывной воды снижается на 2...10%, а влажность кека на 9...20%. Продолжительность фильтрования осадков сокращается в два-четыре раза для первого и в 5...17 раз для второго состава промывной воды. Уменьшение удельного сопротивления осадков в 3...21 раз для первого и 13...71 раз для второго состава промывной воды дает возможность увеличить производительность вакуум-фильтра в 5...25 и 9...43 раза со-

ответственно для первого и второго составов промывной воды.

Анализ данных влияния подогрева и добавки ацетона показывает, что по сравнению с опытами в обычных условиях влажность осадка для обоих составов промывной воды снижается на 1...5 %, влажность кека — на 1,3...19 %. Продолжительность фильтрования осадков сокращается в 1,4...8 раз для первого и 1,5...17 раз для второго состава промывной воды. Уменьшение удельного сопротивления осадков в 1,5...13 раз для первого и 2...18 раз для второго состава воды дает возможность увеличить производительность вакуум-фильтра в среднем в 2...14 раз для обоих составов воды.

Уменьшение влажности и удельного сопротивления осадков, а также увеличение производительности вакуум-фильтра при добавке сухого осадка и *n*-пропанола (или ацетона) позволяет сократить требуемую поверхность фильтрации вакуум-фильтров и соответственно их количество и производственную площадь для установки обезвоживающего оборудования. Так, обезвоживание суточного объема осадка в контрольных опытах для обоих составов промывной воды возможно на двух вакуум-фильтрах (поверхность фильтрации 5 м<sup>2</sup>), работающих по 24 ч в сутки. Добавка же в стоки перед нейтрализацией сухого осадка и *n*-пропанола (или ацетона) позволяет сократить количество вакуум-фильтров до одного. При этом весь суточный объем осадка обезвоживается за 10...15 ч для первого и 5...9 ч для второго составов промывной воды (расчет выполнен для расхода промывной воды травильного отделения — 140 м<sup>3</sup>/сут).

Была отмечена эффективность обезвоживания осадков при подогреве и добавке ацетона в стоки перед нейтрализацией. При этом объемы осадков для обоих составов промывной воды сокращаются в среднем в 1,2...11 раз по сравнению с контрольными опытами, а объем кека — в 1,3...3,4 и в 2,3...6 раз соответственно для первого и второго составов промывной воды. Если в опытах без подогрева и добавки ацетона для обезвоживания суточного объема осадка для первого состава промывной воды потребуется установка двух вакуум-фильтров с поверхностью фильтрации 3 м<sup>2</sup>, работающих по 19 ч в сутки каждый, а для второго состава — трех вакуум-фильтров, работающих по 23 ч в сутки каждый, то подогрев до 80 °С и добавка 30 мл/л ацетона позволяют сократить количество вакуум-фильтров до одного. Время работы для первого состава воды сокращается до 1,5 ч в сутки, для второго — до 2,2 ч (расчет выполнен для расхода промывной воды 140 м<sup>3</sup>/сут).

Органические вещества [8] вводят под уровень жидкости, хранят в виде водных растворов. Может применяться также регенерированный ацетон [9]. Расход органических веществ при максимальной концентрации 30 мл/л — 1...10 м<sup>3</sup>/сут, подача промывной воды — 140...1200 м<sup>3</sup>/сут. В полном количестве они вводятся только на первом цикле системы оборотного водоснабжения, а на всех последующих — с учетом восполнения потерь с осадком и летучестью. В качестве подогрева можно использовать отработанный пар и тепло.

Таким образом, совместное введение сухого осадка и органических веществ, а также подогрев в сочетании с ацетоном — эффективные методы интенсификации процесса очистки медьсодержащих серноокислых промывных вод и обезвоживания их осадков. При этом сухой осадок, образующийся на стадиях нейтрализации, может быть использован для стабилизации качественных показателей оборотной воды. Преимуществом предложенных способов,

Т а б л и ц а 1

## Результаты исследований влияния добавки сухого осадка и органических веществ

| Промывная вода, г/л |                                | Добавка, мл/л                                  |            | Добавка осадка, г/л | Влажность, % |      | Продолжительность фильтрования, мин | Удельное сопротивление, $10^{10}$ см/г | Производительность вакуум-фильтра, кг/(м <sup>2</sup> ·ч) |
|---------------------|--------------------------------|--|------------|---------------------|--------------|------|-------------------------------------|--|---|
| CuSO <sub>4</sub>   | H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | ацетон   | н-пропанол |                     | осадка       | кека |                                     |  |   |
| Первый состав       |                                | Опыт без добавки осадка и органических веществ |            |                     | 98,8         | 82,6 | 14,7                                | 112,8                                  | 2,0   |
| 2,5                 | 1,5                            | —  | 5          | 6                   | 97,0         | 74,0 | 8,8                                 | 29,8                                   | 11,0  |
|                     |                                | —  | —          | 6                   | 97,3         | 78,3 | 9,0                                 | 33,4                                   | 9,7   |
|                     |                                | —  | 30         | 30                  | 90,0         | 65,0 | 4,1                                 | 5,4                                    | 47,0  |
|                     |                                | 30   | —          | 30                  | 92,0         | 69,0 | 5,3                                 | 6,7                                    | 36,5  |
| Второй состав       |                                | Опыт без добавки осадка и органических веществ |            |                     | 98,4         | 82,0 | 17,0                                | 71,3                                   | 3,0   |
| 3,5                 | 2,5                            | —  | 5          | 6                   | 94,5         | 72,0 | 2,8                                 | 2,0                                    | 51,2  |
|                     |                                | —  | —          | 6                   | 96,0         | 73,0 | 3,2                                 | 5,5                                    | 24,8  |
|                     |                                | —  | 30         | 30                  | 88,0         | 62,0 | 1,0                                 | 1,0                                    | 125,5   |
|                     |                                | 30   | —          | 30                  | 90,0         | 66,0 | 1,3                                 | 2,0                                    | 78,5  |

Результаты исследований влияния подогрева и добавки ацетона на процесс обезвоживания осадков

| Содержание в стоках сульфата меди, г/л | Температура подогрева, °С            | Добавка ацетона, мл/л | Влажность, % |      | Продолжительность фильтрования, мин | Удельное сопротивление осадков, $10^{10}$ см/г | Производительность вакуум-фильтра, кг/(м <sup>2</sup> ·ч) |
|--|--------------------------------------|-----------------------|--------------|------|-------------------------------------|--|---|
|  |                                      |                       | осадка       | кека |                                     |  |   |
| 1,5 (первый состав)                    | Опыт без подогрева и добавки ацетона |                       | 98,9         | 82,7 | 9,9                                 | 63,7   | 2,4   |
| 3,5 (второй состав)                    | То же                                |                       | 98,4         | 84,2 | 13,3                                | 54,2   | 3,3   |
| 1,5                                    | 40                                   | 5                     | 98,9         | 80,5 | 7,2                                 | 42,0   | 4,5   |
| 3,5                                    | 40                                   | 5                     | 98,5         | 82,9 | 8,6                                 | 25,0   | 6,7   |
| 1,5                                    | 80                                   | 5                     | 96,7         | 70,0 | 1,5                                 | 7,0  | 19,0  |
| 3,5                                    | 80                                   | 5                     | 94,7         | 70,0 | 1,5                                 | 9,0  | 23,0  |
| 1,5                                    | 40                                   | 30                    | 98,2         | 76,0 | 5,8                                 | 22,0   | 7,7   |
| 3,5                                    | 40                                   | 30                    | 97,8         | 78,0 | 6,0                                 | 18,0   | 9,6   |
| 1,5                                    | 80                                   | 30                    | 93,8         | 67,0 | 1,3                                 | 5,0  | 34,0  |
| 3,5                                    | 80                                   | 30                    | 93,2         | 65,0 | 0,8                                 | 3,0  | 46,3  |

П р и м е ч а н и е. Концентрация серной кислоты во всех опытах постоянна – 1 г/л.

кроме того, является легкий съём осадка с фильтрующей ткани и меньший расход воды и ингибированной кислоты (на 25...35 %) на ее промывку.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бахрах И.М., Иванов Г.В. Обезвоживание осадков сточных вод гальванических цехов // Исследования по водоснабжению и канализации. — 1966. — № 50. — С. 127.
2. Пышкин А.Н., Хаятин М.Г. Обезвоживание осадков сточных вод цехов гальванических покрытий на вакуум-фильтрах // Проектирование водоснабжения и канализации. — М., 1970. Сер. IV. — Вып. 6 (67). — С. 6.
3. Чернявская В.А. Интенсификация процессов очистки и обезвоживания осадков медьсодержащих сернокислых сточных вод // Водоотведение и охрана вод. — 1982. — С. 118.
4. Чернявская В.А. Влияние подогрева на процесс обезвоживания осадков промывных медьсодержащих сернокислых сточных вод // Водоотведение и оценка качества поверхностных вод. — Мн., 1983. — С. 146.
5. Будека Ю.Ф., Чернявская В.А. А.с. СССР 827424, 1981.
6. Чернявская В.А. Современное состояние и задачи очистки сточных вод травильных отделений на кабельных заводах // Проблемы охраны природных и использование сточных вод. — Мн., 1974. — С. 143.
7. Асс М.И., Виноградова И.Г., Фадеева И.Г. Очистка сточных вод кабельного завода // Санитарная техника. Водоснабжение и канализация. — 1974. — № 87. — С. 86.
8. СНиП 11.106-79. Нормы проектирования. — М., 1980, — 24 с.
9. Лукин В.Д., Анцыпович И.С. Рекуперация летучих растворителей в химической промышленности. — Л., 1981. — С. 37.

УДК 626.863

Е.М. ИШУТИНОВ, Н.В. ШЕВЦОВ

### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ ОРОСИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Орошение земель с помощью насосных станций широко применяется в практике мелиоративного строительства. На оросительных системах страны эксплуатируется свыше 10 тыс. насосных станций. На все орошаемые земли Белоруссии вода подается также с их помощью.

До 1985 г. на стационарных насосных станциях устанавливалось насосно-силовое оборудование, не допускающее затопления. В зависимости от величины колебания уровня воды в водоисточнике здания насосных станций строились наземного, полузаглубленного или заглубленного типов.

Строительство станций на водоисточниках с колебаниями уровня воды, значительно превышающими высоту всасывания устанавливаемых насосов, требует больших капитальных и эксплуатационных затрат. В связи с этим проектировщики стали искать решения, позволяющие снизить эти затраты. Одним из таких решений явилось использование на оросительных насосных станциях в качестве основного оборудования погружных насосов [1], которые не требуют строительства специальных помещений и могут устанавливаться непосредственно в водозаборных колодцах или на откосе аванкамеры. Все это позволило существенно упростить конструкцию узла сооружений насосной станции, но стоимость строительства все же оставалась значительной. Основная причина заключается в том, что при проектировании насосных станций с по-

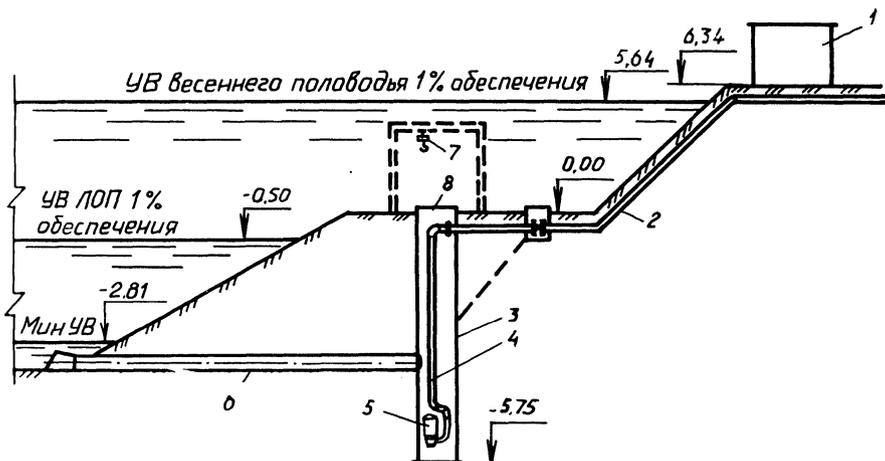


Рис. 1. Схема насосной станции с водозабором, незатапливаемым в летне-осенние паводки на объекте "Свислочь" Гродненской области:

1 – электротехнический бокс; 2 – напорный трубопровод; 3 – колодец; 4 – водо-подъемная труба; 5 – погружной электронасос; 6 – подводный трубопровод; 7 – складываемое подъемно-транспортное устройство; 8 – герметичная монтажная крышка.

гружными насосами разработчики по-прежнему придерживались СНиП 2.06.03–85 (пункт 5.3, табл. 9), по которому отметка верха водозабора в зависимости от категории объекта назначается выше уровня воды весеннего половодья 1, 3 или 5 % обеспеченности, хотя очевидно, что в этот период года полив не требуется и допустимо временное затопление водозабора. На наш взгляд, вполне достаточно, чтобы водозаборное сооружение не затапливалось только летне-осенними паводками (ЛОП), и то не всегда, так как летне-осенние паводки вызваны значительными осадками, выпадающими на обширной территории, и полив земель в этот период не требуется. В каждом конкретном случае необходимо учитывать длительность затопления и допустимые сроки перерыва в поливе для возделывания культур.

При таком подходе следует подумать только о сохранности подъемно-транспортного и электротехнического оборудования.

Одним из решений этого вопроса является размещение электротехнического оборудования и трансформаторной подстанции на незатапливаемых отметках местности, а подъемно-транспортное оборудование должно изготавливаться с возможностью его складирования в период паводка в защитную нишу (рис. 1).

Для определения эффективности предлагаемого варианта проанализирован уреченный режим около 2000 рек в разных регионах страны. Определены [2] амплитуды превышений максимальных уровней воды (как правило, уровни весеннего половодья) над минимальными и амплитуды только за по-ливной период [3]. Амплитуды колебания уровней воды были разбиты на ровные интервалы (через 2 м), и для различных регионов страны определено число рек, амплитуды колебания которых входят в эти выбранные интервалы.

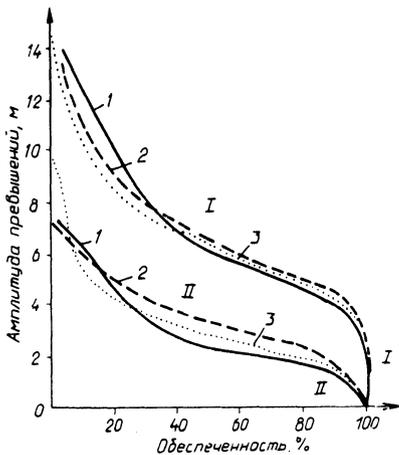


Рис. 2. Кривые обеспеченности амплитуд превышений максимальных уровней над наинизшим уровнем воды рек:

I — максимальных весеннего половодья 1 % обеспеченности; II — наибольших за поливной период; 1 — Белоруссия; 2 — Прибалтика; 3 — Украина.

На основании сделанных выборок установлены амплитуды колебания уровней различной обеспеченности.

Дополнительно проанализирована продолжительность стояния уровней воды в годы с выдающимися паводками, когда наибольшие уровни воды за поливной период превышали на 6 м и более наименьший уровень открытого русла. Данные наблюдений по рекам Прибалтики и Белоруссии показывают, что выдающиеся паводки формируются в годы с выпадением осадков по обширной территории и в этот период орошения не требуется.

Для Украины и Молдавии амплитуды превышений наибольших уровней воды за поливной период над наименьшим уровнем более 6 м отмечаются на реках Тиса, Днестр, Прут и Северский Донец. Однако продолжительность стояния уровней 10 % обеспеченности, как правило, не превышает двух дней.

Кривые обеспеченности превышений максимальных уровней весеннего половодья и наибольших уровней за поливной период над наименьшим уровнем открытого русла рек, протекающих по территории республик Прибалти-

Т а б л и ц а 1

Технико-экономические показатели строительства насосной станции с затопляемыми и незатопляемыми водозаборами

| Показатель  | Варианты незатопляемого водозабора          |   |
|---|---|---|
|   | при весеннем половодье 5 %-й обеспеченности | при летне-осенних паводках 5 %-й обеспеченности |
| Подача насосной станции, м <sup>3</sup> /с                        | 0,5   | 0,5   |
| Напор, м  | 100   | 100   |
| Бетон и железобетон, м <sup>3</sup>                               | 921   | 128   |
| Стоимость строительно-монтажных работ (прямые затраты), тыс. руб. | 175   | 71  |
| Трудовые затраты, чел.-дн.  | 2240  | 1250  |

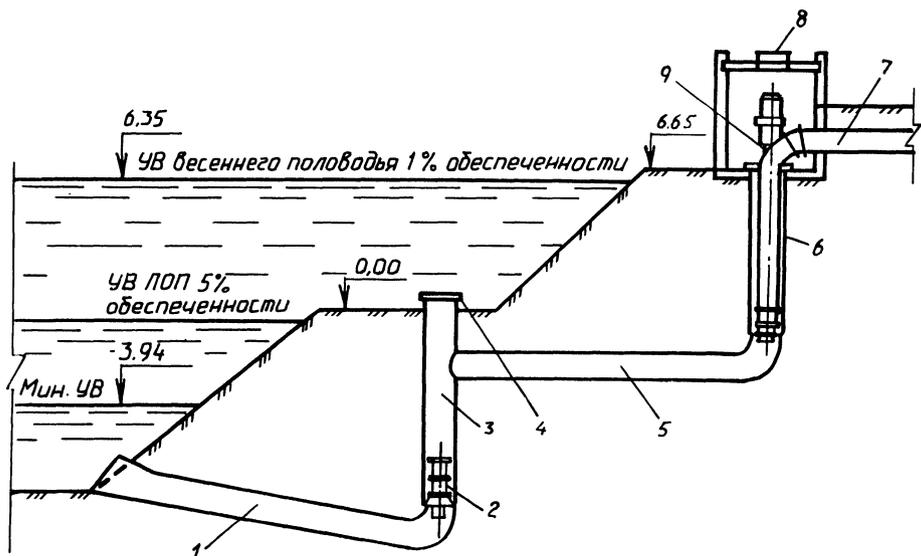


Рис. 3. Двухподъемная насосная станция на объекте "Ташкентский" Новгородской области:

1,5 – подводящие трубопроводы; 2 – осевой погружной электронасос ОПВ 2500-4,2; 3 – колодец станции первого подъема; 4 – герметичная монтажная крышка; 6 – колодец станции второго подъема; 7 – напорный трубопровод; 8 – монтажная крышка; 9 – осевой вертикальный моноблочный насос ОВ5-47МБ.

ки, Белоруссии и Украины (рис. 2), показывают возможность сокращения вертикальных размеров водозаборов в полтора-два раза, при этом (табл. 1) расход бетона и железобетона уменьшается более чем в семь, трудозатраты – в два, а стоимость строительства – в два с половиной раза.

Экспериментальная проверка нового решения при строительстве и последующей эксплуатации насосной станции на оросительной системе в совхозе "Свислочь" Гродненской области подтвердила ее высокую эффективность.

Если же вода подается на относительно небольшую высоту при больших подачах насосов, на водоисточниках с высокими колебаниями уровня воды можно использовать техническое решение, приведенное на рис. 3. Стоимость строительно-монтажных работ двухподъемной насосной станции "Ташкентская" в Новгородской области снижена на 116 тыс. руб.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И ш у т и н о в Е.М., С о р о к и н В.Л. Создание и внедрение высокоэкономичных мелиоративных насосных станций. – Мн., 1987. – 129 с.
2. Каталог отметок наивысших уровней воды рек и озер СССР. – Л., 1970. – 147 с.
3. Ресурсы поверхностных вод СССР. Основные гидрологические характеристики // Белоруссия и Верхнее Поднепровье. – Г. 5. – Л., 1974. – 431 с.

## ВЫБОР ОТМЕТКИ ОСИ РАБОЧЕГО КОЛЕСА ЛОПАСТНЫХ НАСОСОВ МЕЛИОРАТИВНЫХ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ

На надежность работы насосных установок (НУ) существенно влияет кавитация насосов. Она допустима лишь в незначительных количествах, не вызывающих экономически неоправданной эрозии элементов проточной части и не влияющих на энергетические параметры и нормальную эксплуатацию насосного агрегата.

Возникает кавитация при падении давления в потоке перекачиваемой жидкости до давления ее парообразования. Поэтому во избежание кавитации необходимо создать избыточное давление на входе в рабочее колесо насоса (рис. 1), представляющее собой минимально допустимое превышение полной удельной энергии жидкости над энергией, соответствующей давлению парообразования перекачиваемой жидкости, и называемое кавитационным запасом:

$$\Delta h = E_1 - \frac{P_n}{\rho g} = \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + h_1 - \frac{P_n}{\rho g}, \quad (1)$$

где  $\Delta h$  — кавитационный запас, м;  $E_1$  — полная удельная энергия жидкости на входе в рабочее колесо насоса относительно его оси, м;  $P_n$  — давление парообразования перекачиваемой жидкости, Па;  $\rho$  — плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $P_1$  и  $v_1$  — соответственно давление и скорость жидкости в точке 1 на входе в рабочее колесо, Па, м/с;  $h_1$  — превышение точки 1 над осью рабочего колеса, м.

Кавитационный запас является основной характеристикой кавитационных качеств насоса, но численное его значение не может быть вычислено по за-

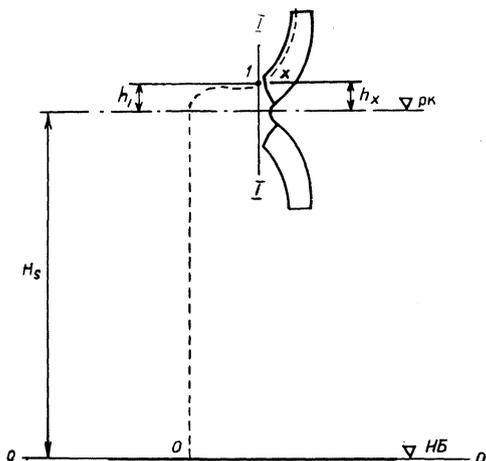


Рис. 1. Схема движения жидкости во всасывающей линии НУ с горизонтальным центробежным насосом: 0-0 — плоскость сравнения; I-I — сечение на входе в рабочее колесо насоса; ∇ НБ — отметка уровня воды в НБ; ∇ р.к. — отметка оси рабочего колеса насоса;  $H_s$  — геометрическая высота всасывания НУ; 0, 1 и x — точки, лежащие на одной линии тока;  $h_1$  и  $h_x$  — превышение точек 1 и x над осью рабочего колеса.

висимости (1), так как не известны ни положение точки  $I$ , ни значения давления и скорости в ней. Составим уравнения Бернулли относительно плоскости 0-0 нижнего бьефа (НБ) для точек 0,  $I$  и  $x$  проточного тракта, лежащих на одной линии тока (см. рис. 1):

$$\frac{P_0}{\rho g} + \frac{v_0^2}{2g} = \frac{P_1}{\rho g} + H_s + h_1 + \frac{v_1^2}{2g} + h_{w_{0-1}}; \quad (2)$$

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{w_1^2 - u_1^2}{2g} + H_s + h_1 = \frac{P_x}{\rho g} + \frac{w_x^2 - u_x^2}{2g} + H_s + h_x + h_{w_{1-x}}, \quad (3)$$

где  $P_0$  и  $v_0$  — атмосферное давление и скорость жидкости в НБ, Па, м/с;  $H_s$  — превышение оси рабочего колеса над уровнем воды в НБ, т.е. геометрическая высота всасывания НУ, м;  $h_{w_{0-1}}$  — потери напора от точки 0 до точки  $I$ , м;  $w_1$  и  $u_1$  — относительная и окружная скорости жидкости в точке  $I$ , м/с;  $P_x$ ,  $w_x$  и  $u_x$  — давление, относительная и окружная скорости жидкости в точке  $x$ , Па, м/с;  $h_x$  — превышение точки  $x$  над осью рабочего колеса, м;  $h_{w_{1-x}}$  — потери напора от точки  $I$  до точки  $x$ , м.

Точка 0 во всасывающей линии насоса на уровне НБ, и абсолютное движение жидкости в сечении 0-0 можно считать установившимся. Точка  $I$  — в сечении  $I-I$  при входе на рабочее колесо насоса, где при правильной конструкции всасывающего патрубка поток должен быть осесимметричным, т.е. установившимся как в абсолютной, так и в относительной системах координат. Точка  $x$  — точка минимального давления на входной кромке лопасти рабочего колеса, бесконечно близка к точке  $I$ . Сечение  $I-I$  позволяет из области всасывающего патрубка с установившимся абсолютным движением перейти в область рабочего колеса с установившимся относительным движением [1, 2].

Выразим из равенства (3) давление  $P_x/\rho g$  в точке  $x$ , полагая, что  $h_1 = h_x$ ,  $w_1 = w_x$  и  $u_1 = u_x$ , так как по условию точки  $I$  и  $x$  бесконечно близки друг другу:

$$\frac{P_x}{\rho g} = \frac{P_1}{\rho g} - h_{w_{1-x}}. \quad (4)$$

В зависимости (4) из равенства (2) подставим значение давления  $P_1/\rho g$ , пренебрегая скоростным напором  $v_0^2/2g$  ввиду малости абсолютной скорости движения жидкости в НБ, и вычтем из левой и правой частей полученного равенства  $P_n/\rho g$ :

$$\frac{P_x - P_n}{\rho g} = \frac{P_0}{\rho g} - \frac{P_n}{\rho g} - H_s - h_{w_{0-1}} - \frac{v_1^2}{2g} - h_{w_{1-x}} - h_1. \quad (5)$$

Учитывая, что при возникновении кавитации  $P_x = P_n$ , выражение (5) перепишем в виде:

$$\frac{P_0}{\rho g} - \frac{P_n}{\rho g} - H_s - h_{w_{0-1}} = \frac{v_1^2}{2g} + h_{w_{1-x}} + h_1, \quad (6)$$

Левая часть равенства (6) содержит параметры, относящиеся только к НУ, и определяет кавитационный запас НУ  $\Delta h_{н.у}$ , приведенный к оси рабочего колеса насоса (в чем легко убедиться, подставив в формулу (1) значение давления  $P_1/\rho g$  из равенства (2), пренебрегая скоростным напором  $v_0^2/2g$  в НБ). Следовательно, кавитационный запас НУ

$$\Delta h_{н.у} = \frac{P_0}{\rho g} - \frac{P_n}{\rho g} - H_s - h_{w_{вс}}, \quad (7)$$

где  $h_{w_{вс}} = h_{w_{0-1}}$  – потери напора во всасывающей линии НУ (всасывающий патрубок насоса, подводящий жидкость к рабочему колесу, выполняется постепенно уменьшающимися, сопротивление таких конфузورных каналов очень незначительно [1], и поэтому можно пренебречь потерями напора во всасывающем патрубке).

Правая часть равенства (6) содержит параметры, относящиеся к насосу, и определяет его кавитационный запас  $\Delta h_n$ , приведенный к оси рабочего колеса:

$$\Delta h_n = \frac{v_1^2}{2g} + h_{w_{1-x}} + h_1. \quad (8)$$

При возникновении кавитации на входе в рабочее колесо насоса, как видно из равенства (6), кавитационный запас НУ равен кавитационному запасу насоса:

$$\Delta h_{н.у} = \Delta h_n. \quad (9)$$

Зависимость кавитационного запаса насоса от его подачи  $\Delta h_n = f(Q)$  называется *кавитационной характеристикой насоса*, а зависимость кавитационного запаса НУ от подачи насоса  $\Delta h_{н.у} = f(Q)$  – *кавитационной характеристикой НУ*. Условие возникновения кавитации в насосе, согласно равенству (9), графически может быть представлено пересечением кавитационных характеристик НУ и насоса (точка 1, рис. 2).

В отличие от легко вычисляемого по формуле (7) кавитационного запаса НУ кавитационный запас насоса (8), зависящий от особенностей конструкции подвода и рабочего колеса, ориентировочно может быть найден лишь для режима работы насоса, соответствующего безударному входу потока на лопасти рабочего колеса [1, 2]. Поэтому для требуемых значений подачи насоса в пределах зоны его рекомендуемой работы для заданной частоты вращения вала рабочего колеса кавитационный запас насоса определяется опытным путем посредством специальных кавитационных испытаний. Суть последних заключается в изменении кавитационного запаса НУ при выбранном значении подачи насоса для получения режима (9), соответствующего моменту возникновения кавитации (см. точку 1, рис. 2). Однако при кавитационных испытаниях насоса из-за трудности обнаружения возникновения кавитации определяют не режим (9), а начало влияния кавитации на энергетические параметры насоса,

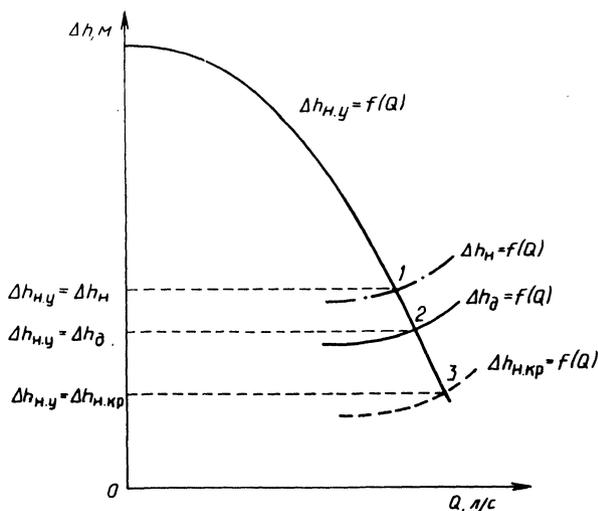


Рис. 2. Кавитационные режимы работы НУ:

1 – возникновение кавитации; 2 – срыв энергетических параметров насоса; 3 – допустимый по развитию кавитации режим работы НУ;  $\Delta h_{н.у} = f(Q)$  – кавитационная характеристика НУ;  $\Delta h_{н} = f(Q)$  – кавитационная характеристика насоса, соответствующая моменту возникновения кавитации;  $\Delta h_{н.кр} = f(Q)$  – критическая кавитационная характеристика насоса, соответствующая падению его напора на 2 % (ГОСТ 6134–71<sup>\*</sup>);  $\Delta h_{д} = f(Q)$  – кавитационная характеристика насоса, гарантирующая допустимое развитие кавитации в нем;  $\Delta h_{н.у}$  – кавитационный запас НУ;  $\Delta h_{н}$  – кавитационный запас насоса;  $\Delta h_{н.кр}$  – критический кавитационный запас насоса;  $\Delta h_{д}$  – допустимый кавитационный запас насоса.

Режим 2 (см. точку 2, рис. 2) – падение энергетических параметров насоса (согласно ГОСТ 6134–71<sup>\*</sup> – уменьшение на 2 % напора насоса) называют *критическим*. При этом

$$\Delta h_{н.у} = \Delta h_{н.кр},$$

где  $\Delta h_{н.кр}$  – критический кавитационный запас насоса.

Допустимый кавитационный запас  $\Delta h_{д}$  насоса, исключаяющий кавитационный срыв его параметров и опасную эрозию проточной части, вычисляется по формуле

$$\Delta h_{д} = A \Delta h_{н.кр},$$

где  $A$  – коэффициент запаса (ГОСТ 6134–71<sup>\*</sup>). Допустимый по развитию кавитации режим 3 работы НУ определяется условием (см. точку 3, рис. 2)

$$\Delta h_{н.у} = \Delta h_{д}. \quad (10)$$

Полученная в результате испытаний кавитационная характеристика насоса  $\Delta h_{д} = f(Q)$  наносится на его рабочую характеристику [3],

Высота всасывания НУ, а следовательно, и отметка оси рабочего колеса на-

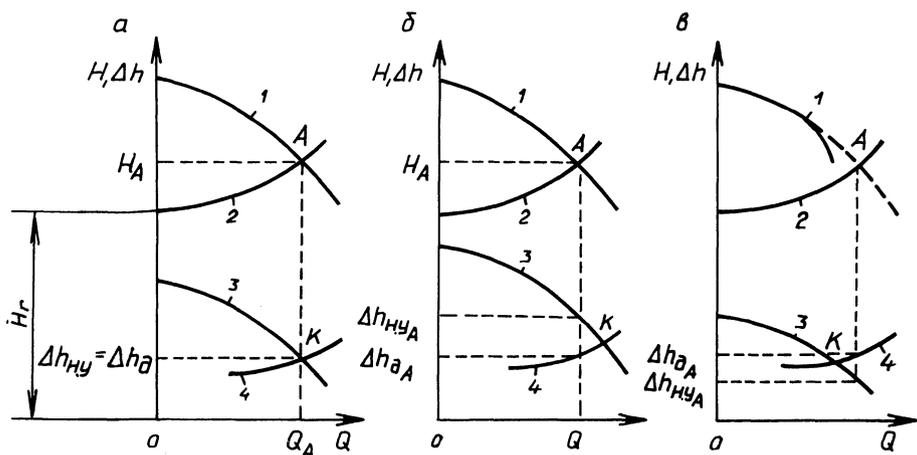


Рис. 3. Анализ режимов работы НУ при постоянных уровнях верхнего и нижнего бьефов: а и б – допустимые по развитию кавитации режимы работы НУ; в – недопустимый по развитию кавитации режим работы; 1 – напорная характеристика насоса,  $H = f(Q)$ ; 2 – характеристика НУ,  $H_{н.у} = f(Q)$ ; 3 – кавитационная характеристика НУ,  $\Delta h_{н.у} = f(Q)$ ; 4 – кавитационная характеристика насоса,  $\Delta h_{\delta} = f(Q)$ ;  $H_{Г}$  – геометрический напор НУ.

соса назначается на основании его кавитационной характеристики при анализе установившихся режимов работы НУ.

При постоянных уровнях воды в верхнем и нижнем бьефах геометрический напор и высота всасывания НУ также постоянны. Рассматриваемый установившийся режим системы насос – сеть, графически определяемый точкой А пересечения напорной характеристики насоса  $H = f(Q)$  с характеристикой НУ  $H_{н.у} = f(Q)$  (рис. 3), характеризуется подачей  $Q_A$ , равной расходу сети, и напором  $H_A$ , равным напору, потребляемому сетью. Для рассмотрения возможных по развитию кавитации режимов работы НУ на графики (см. рис. 3) нанесем характеристики кавитационного запаса НУ и насоса, обозначим точку пересечения этих характеристик буквой К:

1) точка А совместной работы насоса, его внешней сети и точка К лежат (см. рис. 3, а) на одной вертикали –  $Q_A = Q_K$  и  $\Delta h_{н.у.А} = \Delta h_{\delta.А}$ ;

2) точка К лежит (см. рис. 3, б) правее рабочей точки А, кавитация в проточном тракте насоса меньше допустимой ( $\Delta h_{н.у.А} > \Delta h_{\delta.А}$ ) или полностью отсутствует ( $\Delta h_{н.у.А} \gg \Delta h_{\delta.А}$ ); однако так как  $\Delta h_{н.у.А} > \Delta h_{\delta.А}$ , то заглубление насоса превышает необходимое, что, как правило, экономически нецелесообразно – с увеличением заглубления возрастает стоимость гидротехнического узла машинного водоподъема;

3) точка К лежит (см. рис. 3, в) левее заданной рабочей точки А,  $\Delta h_{н.у.А} <$

$< \Delta h_{\delta A}$  и НУ работает в недопустимом по развитию кавитации режиме. Последний должен исключаться еще на стадии проектирования насосной станции при уточнении подбора основных насосов. Режим *A* в этом случае вообще невозможен, так как из-за кавитации произойдет срыв энергетических параметров насоса и требуемые напор  $H_A$  и подача  $Q_A$  не будут обеспечены.

При колебаниях уровней воды в верхнем и нижнем бьефах меняются геометрические высоты подъема и всасывания НУ, а следовательно, и режим ее работы. Поэтому для назначения отметки оси рабочего колеса важно проанализировать возможные режимы работы НУ и высоту всасывания  $H_s$  (или  $\nabla_{p.k.}$ ) определять по режиму, требующему наибольшего кавитационного запаса насоса, т.е. наибольшего его заглубления.

Для нахождения геометрической высоты всасывания НУ в большинстве случаев нет необходимости исследовать возможные кавитационные режимы работы по кавитационной характеристике НУ. На основании равенства (10) для расчетного режима можно вместо кавитационного запаса  $\Delta h_{h.y.}$  НУ подставлять равное ему значение допустимого кавитационного запаса  $\Delta h_{\delta}$  насоса, снимаемого с его кавитационной характеристики  $\Delta h_{\delta} = f(Q)$ , и, согласно выражению (7), вычислять  $H_s$  по формуле

$$H_s = H_a - H_n - \Delta h_{\delta} - h_{w_{bc}},$$

где  $H_a = P_0 / \rho g$  – напор воды, эквивалентный атмосферному давлению, м;  $H_a$  принимается по данным метеорологических наблюдений, справочным данным [4] или вычисляется по формуле  $H_a = 10,33 - \frac{\nabla}{900}$ , где 10,33 – величина  $H_a$  на уровне моря, м;  $\nabla$  – отметка НБ насосной станции относительно уровня моря, м;  $\frac{\nabla}{900}$  – член формулы, учитывающий изменение атмосферного давления в зависимости от расположения насосной станции относительно уровня моря, м;  $H_n = P_n / \rho g$  – напор воды, эквивалентный давлению парообразования, м (при температуре перекачиваемой воды 0...25 °С  $H_n = 0,06...0,32$  м).

В практических расчетах при обычных температурах воды, перекачиваемой мелиоративными насосными станциями,

$$H_s = 10,0 - \frac{\nabla}{900} - \Delta h_{\delta} - h_{w_{bc}}.$$

В технической и справочной литературе наряду с рекомендуемой ГОСТ 6134–71\* кавитационной характеристикой  $\Delta h_{\delta} = f(Q)$  применяются и другие типы кавитационных характеристик насоса и соответствующие им формулы для вычисления  $H_s$  [2, 5].

По геометрической высоте всасывания НУ вычисляют отметку оси  $\nabla_{p.k.}$  рабочего колеса насоса (см. рис. 1):

$$\nabla_{p.k.} = \nabla_{НБ_{min}} + H_s,$$

где  $\nabla_{НБ_{min}}$  – расчетная отметка минимального уровня воды в НБ, м.

При определении геометрической высоты всасывания НУ и назначении отметки оси рабочего колеса насоса наряду с вышеизложенными общими положениями следует учитывать особенности работы проектируемой насосной станции: обеспечение нормальной работы насосов оросительных насосных станций при их пуске и эксплуатации при минимальных уровнях НБ; возможности эксплуатации насосов вне зоны их рекомендуемой работы на оросительных автоматизированных насосных станциях подкачки; пуск в работу насосов осушительных насосных станций при максимальных уровнях НБ.

Геометрическая высота всасывания является не только кавитационной, но и строительной характеристикой НУ; уменьшение ее ведет к заглублению насосов и удорожанию всего узла машинного водоподъема. Анализ возможности возникновения кавитации с целью максимального использования положительной высоты всасывания насоса, выполненный для осушительных насосных станций, оборудованных низконапорными лопастными насосами, обладающими большой положительной высотой всасывания, превышающей колебания уровней в НБ, показал, что во многих случаях насосы можно заглублять не под минимальный уровень НБ, как это сейчас делается, а под максимальный. Это позволит сократить стоимость насосной станции и улучшить условия эксплуатации основных насосов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Л о м а к и н А.А. Центробежные и осевые насосы. — М.; Л., 1966. — 364 с. 2. К а р е л и н В.Я. Кавитационные явления в центробежных и осевых насосах. — М., 1975. — 336 с. 3. Насосы осевые типа "О", "ОП" и центробежные вертикальные типа "В" // Каталог-справочник. — М., 1970. — 52 с. 4. Насосы центробежные и осевые / Минводхоз СССР. — М., 1972. — 72 с. 5. Насосы. Каталог-справочник. Главхиммаш, ВИГМ. — М., 1953. — 552 с.

УДК 639.2.061:621.65

А.Ф. АВДОНЬКИН, К.Ф. ЗЕЙДАЛЬ

#### УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОТВОДА РЫБЫ ОТ РЫБОЗАЩИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Исследования эффективности рыбозащиты на действующих сетчатых рыбозащитных сооружениях (РЗС) показали, что они удовлетворительно выполняют свою функцию только в том случае, если рыба, попавшая в сооружение, непрерывно выводится из него через рыбоотвод. Перекрытие рыбоотвода даже на некоторое время приводит к прижатию молоди к сетке и гибели [1, 2, 3]. Обеспечить течение воды в рыбоотводе можно несколькими способами, но при этом должно выполняться главное требование: устройство для отвода воды с рыбой (рыбонасос) не должно повреждать рыбу.

В ряде стран мира для гидротранспорта рыбы применяются центробежные, вихревые, канальные, шнековые, эрлифтные и струйные насосы [4...9].

Корпус многих известных типов центробежных рыбонасосов (ЦРН) выполнен в форме улитки, внутри которой находятся вал и рабочее колесо с одной, двумя или тремя лопастями. В СССР аналогичными являются насосы марок РБУ-150-2НП-2-ВН, РБУ-200АП, РБУ-250, РУП-3, А8-ИРЗП и др.

Рыбонасос РБУ-150-2НП-2-ВН предназначен для бессетового лова рыбы, отвода живой рыбы от РЗС, откачки рыбной молоди из выростных прудов. Корпус насоса снабжен двумя патрубками, ротор – трехлопастный, скорость вращения ротора – регулируемая. Максимальная длина перекачиваемой рыбы  $l_p$  при диаметре всасывающего патрубка  $d_b = 150$  мм составляет 0,3 м, максимальная ширина рыбы  $b = 0,075$  м, допустимая объемная концентрация рыбы в потоке воды  $c \leq 30$  %.

Погружной рыбонасос РБУ-200АП имеет двухлопастный ротор, размещенный в корпусе, выполненном из сплава АЛ-2.

На базе РБ-200 был разработан насос РУП-3, отличающийся от прототипа тем, что его ротор выполнен из алюминиевого сплава, а корпус из стеклопластика. Использование легких и прочных материалов позволило уменьшить массу насоса.

Насос А8-ИРЗП сконструирован на основе РБ-200. Поверхность чугунного корпуса покрыта эпоксидной смолой.

Однако перечисленные центробежные рыбонасосы сильно повреждают рыбу (отрыв головы, надлом хвоста, сбой чешуи, разрыв плавательного пузыря), которая получает удары со стороны входных частей лопастей, вращающихся с большой скоростью, бьется о выступ корпуса (так называемый "язык"), трется о внутреннюю поверхность корпуса, подвергается воздействию вихрей в напорном патрубке. Умеренный процент поврежденной рыбы  $\Pi = 5...6$  % возможен лишь в том случае, когда ЦРН работает в режиме с максимальным КПД. Отклонение от него ведет к росту повреждаемости до 10...23 [10] и даже до 56 % [11].

В значительной степени (до 20...28 %) повреждают рыбу и вихревые насосы марки ЭРНО-250.

Наряду с ЦРН фирмы США и Японии изготавливают насосы, рабочее колесо которых имеет спиральный канал, примыкающий одним концом вплотную к всасывающему патрубку. Вследствие отсутствия лопастей и тщательного изготовления проточной части корпуса насосы повреждают незначительную долю перекачиваемой рыбы ( $\leq 2...3$  %).

Практически не травмируют рыбу разработанные в Перу насосы со шнековым ротором (рис. 1), способные перекачивать рыбу на расстояние до 1500 м. Однако насосы с канальными и шнековыми роторами в СССР не производятся.

Эрлифтный насос (ЭН) включает напорный трубопровод, на нижнем конце которого имеется перфорированная зона, заключенная в кожух с патрубком. Воздух в полость кожуха подается воздуходувкой, регулируется вентилем. Напор, развиваемый ЭН, определяется глубиной погружения напорного трубопровода и расходом воздуха через перфорацию. ЭН не содержит вращающихся или вибрирующих частей и поэтому минимально повреждает рыбу ( $\Pi \leq 1...2$  %).

Недостатки ЭН: необходимость в воздуходувке или компрессоре, низкий напор, громоздкость, ограниченная область применения, обусловленная тем, что нижний конец напорной трубы ЭН, развивающего напор (например, 2,5...3,0 м), должен находиться на глубине примерно 11...15 м [7]. Обычно же глубина аванкамер, в которых устанавливаются РЗС, не превышает 4...5 м.

Научные исследования и практика [2, 3, 4] показали, что для отвода рыбы от сеток РЗС наиболее целесообразно применять струйные насосы с кольце-

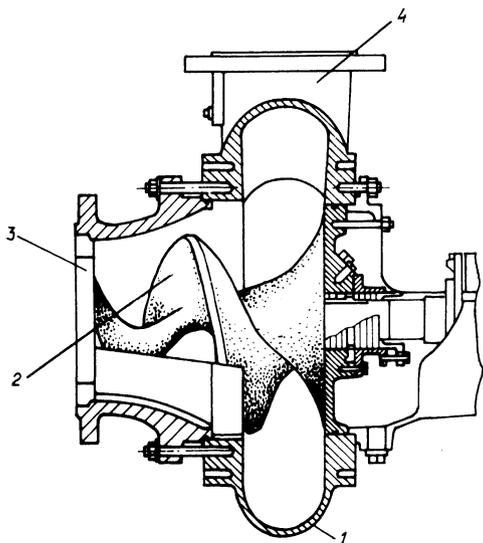


Рис. 1. Схема рыбонасоса со шнековым ротором:  
1 – корпус; 2 – шнек; 3 – всасывающий патрубок; 4 – напорный патрубок.

выми соплами (СНКС), повреждаемость перекачиваемой рыбы ( $P \leq 0,1\%$ ) [12]. Насосы могут работать от автономного рабочего насоса или, что особенно важно, за счет подвода воды из напорной линии насосной станции. Хороший эффект наблюдается при подаче в сопло СНКС одновременно с рабочей водой воздуха под давлением. Эта смесь образует пенообразную среду, предохраняющую рыбу от повреждений в процессе перекачки и обеспечивающую хорошие условия для рыбы при ее транспортировке на расстояния 1000...2000 м [7].

Основные недостатки СНКС – отсутствие приспособлений для регулирования режима работы и низкие допустимые напоры – 3...4 м [9]. При увеличении последних разность скоростей воды  $\Delta v$  в сопле  $v$  и во всасывающем патрубке  $v_{\text{в}}$  превосходит допустимую  $\Delta v^* = 8...12,5 \text{ м/с}$ , что приводит к высокой повреждаемости рыбы.

В Белорусском политехническом институте разработан ряд конструкций СНКС, в которых устранены отмеченные недостатки [13...15]. Примером может служить насос, представленный на рис. 2 [16]. Он состоит из корпуса 1 с крышкой 7 и патрубками 12 и 9, всасывающего патрубка 16, жестко связанной с крышкой 7 камеры смешения 2, снабженной конфузурой 20, и диффузора 5. Внутри корпуса 1 находится подвижное кольцо 11, в центре которого закреплен конический патрубок 18, образующий с конфузурой 20 сопло 19. Приспособление для регулирования режима работы насоса включает винты 3 с шестернями 8, взаимодействующими с зубчатым колесом 6, охватывающим камеру 2 и имеющим возможность вращаться вокруг нее. Между кольцом 11 и дном 17 расположена камера 15, а между патрубками 16 и 18 – кольцевой канал 10. Патрубок 12 снабжен задвижкой 14 и трубопроводом 13. Зубчатая передача закрыта крышкой 4.

Рабочая вода, нагнетаемая в полость корпуса 1 через патрубок 9, создает на срезе сопла 19 и патрубка 16 разрежение, под действием которого в камеру смешения 2 по патрубку 16 РЗС поступает вода с рыбой, а по кольцевому

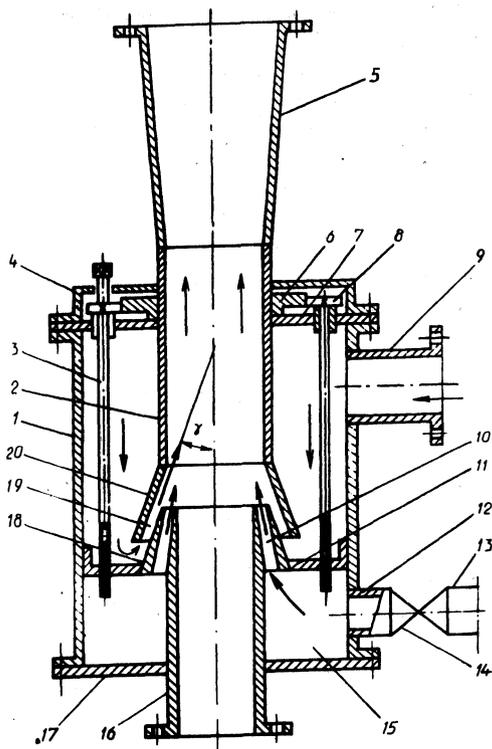


Рис. 2. Схема струйного насоса с буферным потоком.

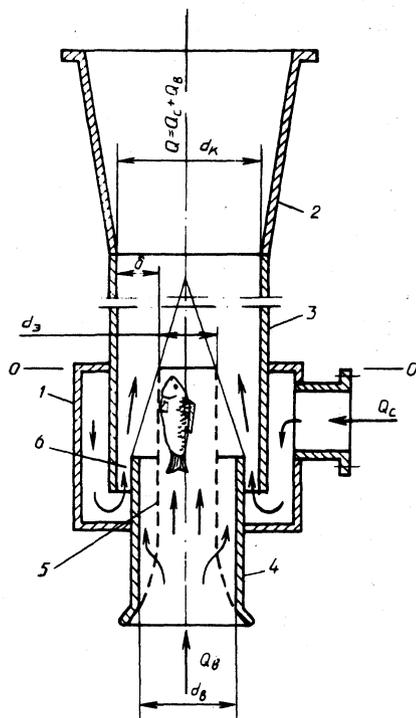


Рис. 3. Расчетная схема струйного насоса с буферным потоком:

1 – корпус; 2 – диффузор; 3 – камера смешения; 4 – всасывающий патрубок; 5 – экран; 6 – сопло.

зазору 10 – вода из камеры 15, куда она засасывается по трубе 13. Все три потока смешиваются между собой в камере смешения 2, из которой общий поток с усредненной скоростью поступает в диффузор 5, а затем в напорный трубопровод.

Поток воды, поступающий в камеру смешения 2 из зазора 10, выполняет роль кольцевого буферного потока, так как вытекающая из сопла 19 струя, прежде чем войти в поток, содержащий рыбу, смешивается с ним, существенно теряя свою первоначальную скорость. Такая струя оказывает на рыбу меньшее травмирующее действие.

Режим работы рыбонасоса для получения максимального КПД регулируется вращением винтов 3. Вращение винтов перемещает (вверх или вниз) кольцо 11 и связанный с ним патрубок 18, изменяя ширину сопла 19 и расход воды.

Используя задвижку 14, можно установить такой расход воды в зазоре 10, при котором скорость потока, смешивающегося непосредственно с водорыб-

ным потоком, будет соответствовать допустимым значениям для того или иного вида рыбы.

Расчеты показывают, что для СНКС с напором 7,5 м, но без буферного потока, разность скоростей  $\Delta v$  в месте встречи рабочего потока с рыбой равна 19...20 м/с (является недопустимой), а при наличии буферного потока, вытекающего из зазора  $l_0$  шириной всего 10...12 мм,  $\Delta v = 9...12$  м/с, т.е. лежит в допустимых пределах.

Наличие буферного потока снижает коэффициент полезного действия СНКС не более чем на 3...4 %. Однако это несущественно, если СНКС должен иметь напор в два раза больший, чем у используемых насосов такого типа. Предложенный насос может применяться для отвода рыбы от РЗС и извлечения ее из рыбоуловителей.

Расход воды в кольцевом канале шириной  $\delta$  (рис. 3)

$$Q_{0-0}^* = Q_c + Q_B = v^* \frac{\pi (d_K - d_3)^2}{4}, \quad (1)$$

где  $Q_c$  – расход рабочей воды через сопло, м<sup>3</sup>/с;  $Q_B$  – расход воды через кольцевой канал шириной  $(d_B - d_3)/2$ ;  $v^*$  – средняя скорость потока воды в канале шириной  $\delta$ , м/с;  $d_K$ ,  $d_B$ ,  $d_3$  – соответственно диаметры камеры смешения, наружного и внутреннего всасывающих патрубков, м.

Расход воды через кольцевой канал

$$Q_\delta = Q_B - v_B \frac{\pi d_3^2}{4}, \quad (2)$$

где  $Q_B$  – расход воды через всасывающий патрубок, м<sup>3</sup>/с;  $v_B$  – скорость потока во всасывающем патрубке, м/с.

Расход воды на срезе диффузора

$$Q = Q_c + Q_B. \quad (3)$$

После подстановки (2) и (3) в (1) получим формулу для расчета величины  $d_3$  в виде

$$d_3 = 0,56K \left[ \frac{\pi (v_B + \Delta v^*) d_K^2 - 4Q}{\Delta v^*} \right]^{0,5},$$

где  $\Delta v^* = v^* - v_B = 8...12,5$  м/с – допустимая разность скоростей  $v^*$  и  $v_B$ , определяемая видом и возрастом перекачиваемой рыбы;  $K = f(\xi)$  – коэффициент, учитывающий гидравлическое сопротивление потоку в кольцевом канале шириной  $(d_B - d_3)/2$ . Величина  $K$  определяется экспериментально и находится в пределах 0,8...0,9; а величины  $Q_c$ ,  $Q_B$ ,  $d_K$ ,  $v_B$  и другие, характеризующие геометрические и режимные параметры СНКС, – по методике, изложенной в данном сборнике (см. с. 47).

Описанные в статье конструкции отечественных рыбонасосов, применяемых в настоящее время, несовершенны и нуждаются в дальнейшем улучше-

нии. Струйные насосы, разработанные в БПИ, могут найти применение в рыбоводствах БССР и других республиках.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Цыпляев А.С. Исследования рыбозащитного сооружения в водозаборе Краснодарского рыбоводного завода // Рыбное хозяйство. — 1979. — № 6. — С. 23–24.
2. Малевая А.Н., Б.С., Никоноров И.В. Рыбопропускные и рыбозащитные сооружения. — М., 1984. — С. 256.
3. Порядин А.Ф. Устройство и эксплуатация водозаборов. — М., 1984. — С. 184.
4. Зарубежный опыт биологического и инженерного обоснования конструкций рыбозащитных устройств водозаборных сооружений / Обзорная информация ЦБНТИ. — 1982. — Вып. 7. — С. 56.
5. Кадников В.Б., Цыбушкин М.Б., Братковский В.А. Погружная рыбонасосная установка РУП-1 // Рыбное хозяйство. — 1971. — № 4. — С. 48–51.
6. Ковалев В.М., Волошко А.А. Эрлифты в рыбном хозяйстве. — М., 1978. — С. 64.
7. Рыбонасосная установка "Foamflo" / Экспресс-информация ЦНИИТЭИРХ. Рыбное хозяйство. Сер. Промышленное рыболовство. — 1984. — Вып. 9. С. 15.
8. Гриб В.К., Морев А.Н. Комплексная механизация прудового рыбоводства. — М., 1973. — С. 309.
9. Авдонькин А.Ф., Зейдаль К.Ф., Свистунов В.К. Расчет струйного рыбонасоса с кольцевым соплом // Водное хозяйство и гидротехн. стро-во. — 1985. — Вып. 16. — С. 41–45.
10. Фонарев А.Л. Оптимальные режимы работы лопастных рыбонасосов, особенности движения рыбы в канальных насосах // Тр. КТИРПИХ. — 1982. — Вып. 100. — С. 3–26.
11. Пинчук М.А. Исследования повреждаемости объектов лова центробежными рыбонасосами при последовательной работе на сеть // Тр. КТИРПИХ. — 1982. — Вып. 100. — С. 30–36.
12. Докучкин М.М., Муравенко Т.А. Струйный аксиальный насос // Рыбное хозяйство. — 1985. — № 9. — С. 65–66.
13. А.с. 4274129/31-13 СССР. Рыбонасос / А.Ф. Авдонькин, К.Ф. Зейдаль.
14. А.с. 4286136/25-29 СССР. Струйный насос / А.Ф. Авдонькин, Е.М. Иштуинов, К.Ф. Зейдаль.
15. А.с. 4286139/25-29 СССР. Рыбонасосная установка / А.Ф. Авдонькин, К.Ф. Зейдаль.

УДК 628.88

И.П. ВОПНЯРСКИЙ, А.Н. СИДОРОВ,  
А.В. МОЛОЧКО

### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО РЫБОЗАЩИТНОГО УСТРОЙСТВА

Задача очистки сетчатого полотна в процессе работы рыбозащитного устройства (РЗУ) конструктивно простыми, недорогими и эффективными средствами еще не решена.

Предлагаемое нами устройство (рис. 1) является по своей сути оптимальным вариантом гидравлической флейты, но фронт струи вдоль образующей непрерывный, не требует питательного насоса. Кроме того, нет сложного подвода жидкости к вращающимся частям устройства [1].

Очистным элементом цилиндрического рыбозащитного устройства (ЦРЗУ) является наклонная вращающаяся пластина 1, расположенная на минимальном расстоянии от сетчатого полотна 2 и укрепленная на валу 5. Фактически это укороченная лопатка динамического насоса. Наклонные пластины приводятся во вращение автономно внешним двигателем или турбинкой 4 с направляющим аппаратом 3, установленной на валу пластин и вращаемой потоком от-

фильтрованной жидкости. Последний привод экономичнее и компактнее, особенно в тех процессах, где расход фильтруемой жидкости изменяется, а поэтому будет изменяться и частота вращения лопаток (пластин) без ухудшения эффективности очистки сетки. Для уменьшения сопротивления движению лопатки к ней прикреплен закрылок *б*, ширина которого равна ширине лопатки.

Наклонные пластины, вращаясь, сообщают жидкости импульс количества движения, направленный навстречу основному потоку. В результате вокруг сетчатого полотна образуется вращающаяся волновая завеса, отпугивающая

рыбу и препятствующая прижатию молоди рыбы, мусора и других тел к сетчатому полотну [1].

В результате анализа взаимодействия твердой поверхности с потоком жидкости установлено, что причиной движения тел по сетке в направлении, противоположном вращению вала очистного устройства, является кумулятивная струя, направленная вдоль лопатки к сетчатому полотну. Для рассмотрения этого явления применим принцип относительности движения, т.е. остановим лопатку, предполагая вращающийся с ее скоростью поток. На рис. 2 совмещены два треугольника скоростей. Вектор *a* есть сумма окружной скорости *u* и радиальной скорости потока на сетке:

$$v_R = Q/S,$$

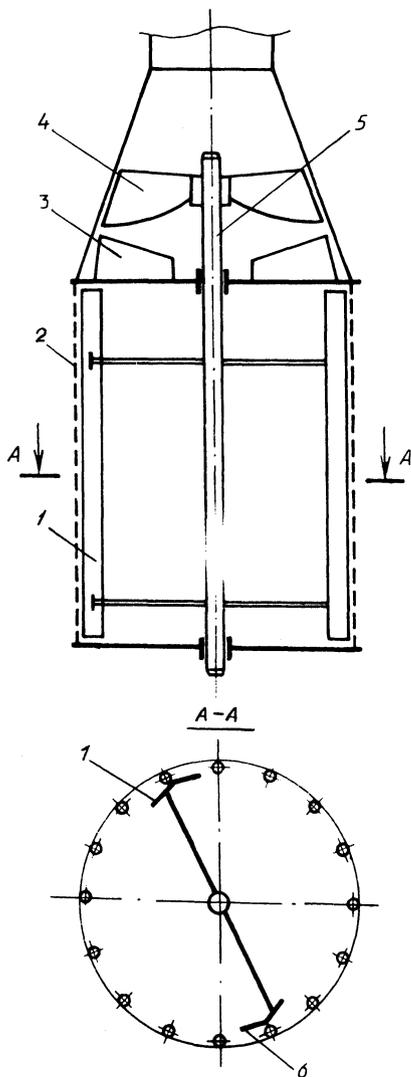


Рис. 1. Схема цилиндрического рыбозащитного устройства.

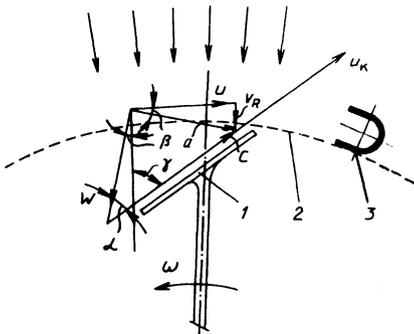


Рис. 2. Треугольники скоростей на лопатке очистного устройства.

где  $Q$  – расход фильтрующего потока,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $S$  – площадь сетчатого полотна,  $\text{м}^2$ .

При  $v_R = 0$  в обратном движении жидкость натекала бы на лопатку под углом  $\gamma$  (угол установки лопатки). Фильтрующийся же поток уменьшает  $< \gamma$  на величину угла  $\beta$ , т.е.  $\alpha = \gamma - \beta$ . Из верхнего треугольника скоростей имеем  $\beta = \arctg \left( \frac{v_R}{u} \right)$ . Выражая радиальную скорость через расход (1), а окружную  $\omega$  через частоту вращения  $n$ , получим

$$\beta = \arctg \left( 1,52 \frac{Q}{nR^2L} \right), \quad (2)$$

где  $R$  – максимальный радиус лопатки,  $\text{м}$ ;  $L$  – высота сетчатой поверхности фильтра (длина лопатки),  $\text{м}$ .

Из нижнего треугольника скоростей получено [1] выражение для определения скорости кумулятивной струи  $u_K$ , образующейся в результате взаимодействия потока, движущегося со скоростью  $a$  под углом  $\alpha$  к лопатке:

$$u_K = \omega R \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}, \quad (3)$$

где углом  $\alpha = \gamma - \beta$  учитывается радиальная скорость  $v_R$  фильтрующего потока.

Таким образом, скорость и кинетическая энергия кумулятивной струи увеличиваются с уменьшением угла  $\alpha$  и возрастанием скорости  $v_R$ . При этом уменьшается касательная составляющая на сетке, а следовательно, и увеличивается время движения тел по ней до сборного лотка  $Z$  (см. рис. 2) для отвода взвесей от фильтра.

Расход кумулятивной струи  $Q_K$  определим следующим образом. Объем кольца, описываемого радиальной проекцией лопатки за один оборот, составит

$$W = SL,$$

где  $S$  – площадь кольца ( $S = \pi B (D \sin \varphi - B)$ ),  $\text{м}^2$ ;  $B$  – ширина лопатки,  $\text{м}$ ;  $D$  – диаметр цилиндрического сетчатого полотна,  $\text{м}$ ;  $\varphi$  – угол между лопаткой и касательной к сетчатому полотну у выходной кромки лопатки:

$$\varphi = (90 - \gamma) + \arcsin \left( \frac{2B}{D} \sin \gamma \right).$$

Тогда

$$W = \pi BL (D \sin \varphi - B). \quad (4)$$

Теоретический расход при угловой скорости  $\omega$

$$Q = W\omega = \frac{\pi^2}{30} BLn (D \sin \varphi - B). \quad (5)$$

Сила взаимодействия кумулятивной струи с лопаткой равна изменению количества движения

$$P = \rho Q_K u_K (1 - \cos \varphi),$$

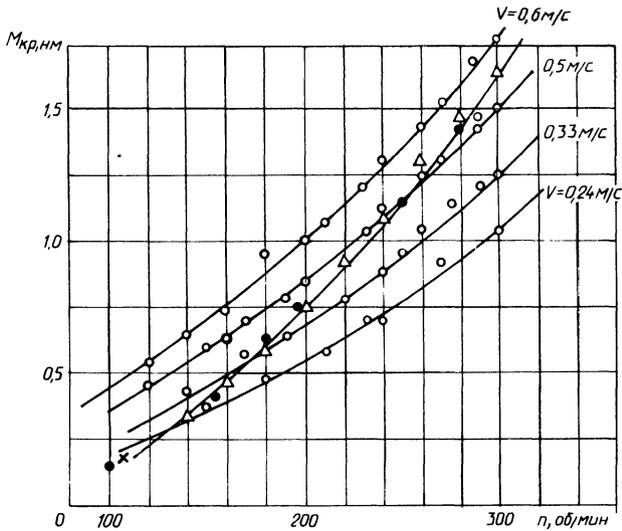


Рис. 3. Зависимость  $M_{кр}$  от частоты вращения лопаток и скорости фильтрующегося потока ( $\gamma = 35^\circ$ ,  $B = 30$  мм):

○ – с закрылками;  $\Delta$  – без закрылков; ● – по уравнению (7),

С учетом (3) и (5) вводим коэффициент потерь  $\mu$ . Отсюда

$$P = 1,67 \cdot 10^{-2} \mu \rho n^2 DBL (D \sin \varphi - B) (1 - \cos \varphi) \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} . \quad (6)$$

Крутящий момент  $M_{кр}$  на валу очистного устройства получим, умножив

$P$  на радиус центра тяжести лопатки  $R_0 = R - \frac{B}{2} \cos \gamma$  и на число лопаток  $z$ , т.е.

$$M_{кр} = \left[ 1,67 \cdot 10^{-2} \rho \mu n^2 DBL (D \sin \varphi - B) (1 - \cos \varphi) \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} \right] \times \\ \times \left( R - \frac{B}{2} \cos \gamma \right) z , \quad (7)$$

Экспериментальная установка ЦРЗУ состояла из цилиндрической сетки диаметром 0,19 и высотой 0,25 м, очистного устройства в виде двух вращающихся наклонных пластин, закрепленных на валу. Изменением частоты вращения двигателя постоянного тока достигалась переменная частота вращения очистного устройства. Конструкция установки предусматривала возможность изменения угла наклона и ширины лопаток, зазора между лопатками и сеткой, а также крутящего момента.

Значение крутящего момента определялось при помощи балансирно подвешенного двигателя постоянного тока, а частота вращения – тахогенератором со световой индикацией. Характеристики ЦРЗУ измерялись в нескольких

сериях опытов при различных геометрических параметрах наклонных пластин. Определение крутящего момента  $M_{кр}$  проводилось в пяти сериях опытов с различными углами установки лопаток ( $\gamma = 15, 30, 35, 45, 60^\circ$ ). В каждой серии по пять опытов с различными скоростями фильтруемого через сетку потока ( $v = 0,25 \dots 0,60$  м/с) в диапазоне частоты вращения  $n = 50 \dots 300$  об/мин. Для сравнения проведен опыт по изменению крутящего момента без закрылка при угле лопатки  $35^\circ$  и скорости  $0,4$  м/с. Величина и направление импульса кумулятивной струи регистрировались плоским датчиком, закрепленным на тензометрической балочке, поворачивающейся в вертикальной плоскости. Для уточнения направления кумулятивной струи применялся фотоэлемент ФД-3, регистрировавший опережение или запаздывание прохода кромки лопатки по сравнению с сигналом на основном датчике кумулятивной струи.

Определение импульса составляющих кумулятивной (нормальной  $A_n$  и тангенциальной  $A_t$ ) струи проводилось в зависимости от частоты вращения очистного устройства ( $100 \dots 300$  об/мин) и скорости фильтруемого потока ( $0,2 \dots 0,6$  м/с). Кроме того, в опытах фиксировалось затухание импульса в зависимости от расстояния от сетчатого полотна ( $0 \dots 100$  мм). Опытные данные определения импульса кумулятивной струи записывались на ленте самописца.

Из рис. 3 видно, что в диапазоне рабочих частот вращения  $200 \dots 300$  об/мин, при которых в опытах наблюдалась приемлемая скорость перемещения отфильтрованных тел по сетке, крутящий момент изменялся почти по линейному закону.

На рис. 3 приведены также значения  $M_{кр}$ , подсчитанные исходя из теории кумулятивной струи по (7) с коэффициентом потерь  $\mu = 0,45$ . Значение  $\mu$  получено при сравнении теоретических и опытных данных. Результаты опытов при лопатках с закрылками аппроксимируются кривыми, имеющими более пологий вид по сравнению с опытами без закрылков и теоретическими данными. Это объясняется меньшим сопротивлением лопаток с закрылками вследствие разделения зоны вакуума в следе лопатки с основным потоком, а следовательно, и меньшим  $M_{кр}$  на валу, что оправдывает использование лопаток с закрылками в предлагаемой конструкции очистного устройства.

Изменение амплитуды сигнала датчика, регистрирующего импульс кумулятивной струи, сходящей с выходной кромки лопатки, фиксировалось в зависимости от удаления датчика от сетчатого полотна фильтра. С целью определения направления абсолютной скорости кумулятивной струи датчик устанавливался нормально и тангенциально сетчатому полотну. Независимо от ориентации датчика амплитуда сигнала импульса струи на данном удалении от сетчатого полотна оставалась постоянной. Это свидетельствует о том, что возмущение, возникающее вследствие взаимодействия кумулятивной струи с фильтрующимся потоком, распространяется концентрически с большим градиентом затухания.

Как показали опыты, тела по сетчатому полотну приходят в движение под действием кумулятивной струи. Расстояние, на которое тела отходят от сетки, незначительно и составляет не более  $3$  мм [2, 3], тогда как датчик импульсов, используемый в опытах, фиксирует сигнал на расстоянии  $800$  мм.

По мере удаления датчика импульса от сетки направление струи на датчик

изменяется, так как вал с лопаткой повернулся на больший угол. Последний определяется с помощью фотоэлемента и диска с прорезями по окружности через  $45^\circ$ , закрепленного по валу очистного устройства. Первая прорезь на диске устанавливалась против фотоэлемента, а лопатка — на одном радиусе с датчиком импульса. Записывались сигналы двумя каналами самописца. Расстояние датчика импульсов от сетки изменялось от 0 до 100 мм. Полученные диаграммы указали на полное совпадение пика сигналов во времени при различных расстояниях, что свидетельствует о практически мгновенном распространении импульса.

Анализ взаимодействия встречной струи с потоком жидкости указал на возможность возникновения явления, подобного гидравлическому удару небольшой интенсивности. А скорость распространения ударной волны в воде, как известно, составляет 1420 м/с. По этой причине было решено увеличить расстояние от сетки до датчика и применить второй тензометрический датчик импульса, подобный первому, т.е. с теми же размерами и параметрами. Первый датчик устанавливался на расстоянии 50 мм от сетчатого полотна, второй — на 800 мм на одной линии с валом и лопаткой очистного устройства. Осциллограммы сигналов двух датчиков при скорости подачи бумаги 250 мм в секунду показали полное совпадение сигналов во времени и по форме. Максимум амплитуды совпадал с возможной точностью прибора до 1 мм, что при такой погрешности дает скорость распространения импульса в пределах 200 м/с.

Таким образом, можно считать, что сигнал, воспринимаемый датчиком на расстоянии 800 мм, является ударной волной, вызванной взаимодействием кумулятивной струи с потоком жидкости, а не самой струей, внедряющейся во встречный поток.

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований ЦРЗУ с очистным устройством в виде динамических лопаток можно сделать следующие основные выводы:

1. Предлагаемое очистное устройство отличается конструктивной простотой и надежностью в работе, малой приводной мощностью. Может эффективно применяться в РЗУ в фильтрах с другими (помимо цилиндрических) формами сетчатых полотен, а также в различных по назначению механизмах и аппаратах (например, рыбонасосах, центрифугах, сепараторах и др.).

2. Экспериментально выявлено и теоретически обосновано неизвестное ранее в теории динамических машин явление возникновения кумулятивной струи при взаимодействии лопатки с жидкостью.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Во п н я р с к и й И. П., В а р н а к о в Н. М., С и д о р о в А. Н., М о л о ч к о А. В. Рыбозащитное устройство с импульсной струйной очисткой сетки // Водное хоз-во и гидротехн. стр-во. — 1984. — Вып. 13. — С. 39–42.
2. В о п н я р с к и й И. П., С и д о р о в А. Н., М о л о ч к о А. В. Исследования и методика расчета двухконусного РЗУ с гидроимпульсной очисткой сетки // Водное хоз-во и гидротехн. стр-во. — 1987. — Вып. 16. — С. 95–99.
3. А. с. 1105547 СССР. Рыбозащитное устройство водозаборного сооружения / А. Н. Сидоров, Д. А. Козлов, И. П. Вопнярский, В. В. Петрашкевич.

## МЕТОДИКА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА СТРУЙНОГО НАСОСА С КОЛЬЦЕВЫМ СОПЛОМ

Струйные насосы (гидроэлеваторы) с центральным соплом (СНЦС) применяются в народном хозяйстве СССР для подъема воды из скважин, удаления воды из шахт, котлованов, при опускании кессонов, для добычи со дна водоемов нерудных материалов (песок, гравий), при гидротранспорте руды, угля и т.д. [1, 2, 3, 4]. Наметилась тенденция использования струйных насосов для отвода рыбы от сеток рыбозащитных сооружений и в составе гидромеханических рыбоподъемников (рис. 1) [5, 6, 7]. Широкому применению СНЦС в качестве рыбонасосов будет, в частности, способствовать создание простой и надежной методики их расчета и проектирования. Решению этого вопроса и посвящена данная статья.

Допустим, что наличие рыбы в воде, проходящей через насос, не снижает его напора  $H$  и подачи  $Q_B$  [4]. Тогда основная зависимость для расчета СНКС

$$h = f(q, K_c, K_b, \xi_c, \xi_b, \xi_k, \xi_d), \quad (1)$$

где  $h = H/H_c$  и  $q = Q_B/Q_c$  — соответственно относительные напор и расход (здесь и далее по тексту приняты индексы: в — всасывающий патрубок; с — сопло; к — камера смещения; д — диффузор);  $H, H_c$  — статические напоры струйного насоса и рабочего потока перед соплом;  $Q_B, Q_c$  — объемные расходы, м<sup>3</sup>/с;  $K_c = \omega_c/\omega_k$ ;  $K_b = \omega_b/\omega_k$  — коэффициенты сечения;  $\omega_c, \omega_b, \omega_k, \omega_d$  — площади поперечных сечений, м<sup>2</sup>;  $\xi_c, \xi_b, \xi_k, \xi_d$  — коэффициенты сопротивления ( $\sum \xi = \xi_k + \xi_d$ ).

Уравнение энергии для струйного насоса при отсутствии подпора или вакуума на входе во всасывающий патрубок может быть записано в виде

$$E_c = E_d + \Delta E_c + \Delta E_b + \Delta E_k + \Delta E_d + \Delta E_{см}, \quad (2)$$

где  $E_c, E_d$  — полные энергии рабочего потока на входе в сопло и на срезе диффузора, вт;  $\Delta E_c, \Delta E_b, \Delta E_k, \Delta E_d, \Delta E_{см}$  — потери энергии в элементах струйного насоса, вт;

$$E_c = \rho_c g Q H_c; \quad (3)$$

$$E_d = \rho_k g Q H; \quad (4)$$

$$\Delta E_c = \rho_c g Q_c \Delta h_c; \quad (5)$$

$$\Delta E_b = \rho_b g Q \Delta h_b; \quad (6)$$

$$\Delta E_k = \rho_k g Q_k \Delta h_k; \quad (7)$$

$$\Delta E_d = \rho_k g Q_k \Delta h_d. \quad (8)$$

В зависимостях (3) ... (8)  $\rho_c, \rho_b, \rho_k$  — плотности потоков, движущихся через сопло, всасывающий патрубок и камеру смещения;  $\Delta h_c, \Delta h_b, \Delta h_k, \Delta h_d$  — потери напора в элементах струйного насоса, м.

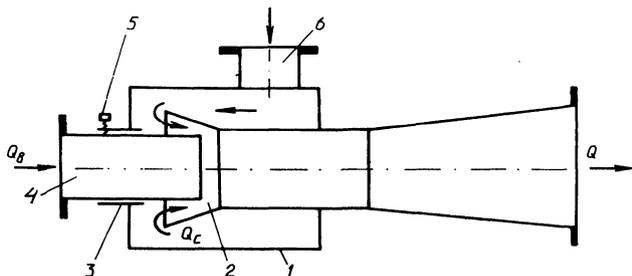


Рис. 1. Принципиальная схема струйного насоса с кольцевым соплом:

1 – корпус; 2 – сопло; 3 – направляющий элемент; 4 – всасывающий патрубок; 5 – стопорный винт; 6 – патрубок для ввода рабочей воды.

Для определения потерь энергии на смешение потоков можно использовать зависимость, приведенную в [4], представив ее в виде

$$\Delta E_{\text{см}} = \rho_c \frac{Q_c^3}{2\omega_c^2} + \rho_B \frac{Q_B^3}{2\omega_B^2} + \rho_K \frac{Q_K^3}{2\omega_K^2} - \rho_c \frac{Q_c^2 Q_K}{\omega_c \omega_K} - \rho_B \frac{Q_B^2 Q_K}{\omega_B \omega_K} \quad (9)$$

Введем в (2) зависимости (3)...(9) и разделим левую и правую части на произведение  $\rho_c g Q_c$ :

$$\begin{aligned} \frac{\rho_c g Q_c H_c - \rho_K g Q_K H}{\rho_c g Q_c} &= \left( \frac{\rho_c g Q_c \Delta h_c + \rho_B g Q_B \Delta h_B}{\rho_c g Q_c} + \right. \\ &+ \frac{\rho_K g Q_K \Delta h_K + \rho_K g Q_K \Delta h_{\text{д}} + \rho_c \frac{Q_c^3}{2\omega_c^2} + \rho_B \frac{Q_B^3}{2\omega_B^2}}{\rho_c g Q_c} + \\ &\left. + \frac{\rho_K \frac{Q_K^3}{2\omega_K^2} - \rho_c \frac{Q_c^2 Q_K}{\omega_c \omega_K} - \rho_B \frac{Q_B^2 Q_K}{\omega_c \omega_K}}{\rho_c g Q_c} \right). \quad (10) \end{aligned}$$

Величины  $\Delta h_c$ ,  $\Delta h_B$ ,  $\Delta h_K$  и  $\Delta h_{\text{д}}$  можно представить в виде следующих выражений:

$$\Delta h_c = \xi_c \frac{Q_c^2}{2g\omega_c^2}; \quad \Delta h_K = \xi_K \frac{Q_K^2}{2g\omega_K^2}; \quad (11)$$

$$\Delta h_{\text{в}} = \xi_{\text{в}} \frac{Q_{\text{в}}^2}{2g \omega_{\text{в}}^2}; \quad \Delta h_{\text{д}} = \xi_{\text{д}} \frac{Q_{\text{к}}^2}{2g \omega_{\text{к}}^2},$$

Введем в (10) зависимости (11), а также отношения

$$Q_{\text{в}}/Q_{\text{с}} = q; \quad Q_{\text{к}}/Q_{\text{с}} = (Q_{\text{с}} + Q_{\text{в}})/Q_{\text{с}} = 1 + q; \quad \rho_{\text{в}}/\rho_{\text{с}} = \rho'; \quad \rho_{\text{к}}/\rho_{\text{с}} = \rho''$$

для случая, когда  $\rho_{\text{с}} = \rho_{\text{в}} = \rho_{\text{к}}$  и  $\rho' = \rho'' = 1$ , получим:

$$\begin{aligned} H_{\text{с}} - (1 + q)H = \frac{1}{2} \left( \xi_{\text{с}} \frac{Q_{\text{с}}^2}{g \omega_{\text{с}}^2} + \xi_{\text{д}} q \frac{Q_{\text{в}}^2}{g \omega_{\text{в}}^2} + (1 + q) \frac{Q_{\text{к}}^2}{g \omega_{\text{к}}^2} (\xi_{\text{к}} + \right. \\ \left. + \xi_{\text{д}}) + \frac{Q_{\text{с}}^2}{g \omega_{\text{с}}^2} + q \frac{Q_{\text{в}}^2}{g \omega_{\text{в}}^2} + (1 + q) \frac{Q_{\text{к}}^2}{g \omega_{\text{к}}^2} - \frac{2Q_{\text{с}} Q_{\text{к}}}{g \omega_{\text{с}} \omega_{\text{к}}} - \right. \\ \left. - q^2 \frac{2Q_{\text{в}} Q_{\text{к}}}{g \omega_{\text{в}} \omega_{\text{к}}} \right), \end{aligned} \quad (12)$$

Разделим (12) на зависимость, полученную в [8]:

$$H_{\text{с}} = \frac{Q_{\text{с}}^2}{2g \omega_{\text{с}}^2} (1 + \xi_{\text{с}}) - \frac{Q_{\text{в}}^2}{2g \omega_{\text{в}}^2} (1 + \xi_{\text{в}}), \quad (13)$$

Умножим числитель и знаменатель полученной дроби на  $(\omega_{\text{к}}/Q_{\text{с}})^2$  и, используя безразмерные параметры  $h$ ,  $K_{\text{с}}$ ,  $K_{\text{в}}$  и выражение  $Q_{\text{к}} = Q_{\text{с}} + Q_{\text{в}}$ , получим функцию (1) в окончательном виде:

$$h = \frac{1}{1 + q} \left( 1 - \frac{A}{B} \right), \quad (14)$$

где

$$\begin{aligned} A = \frac{1 + \xi_{\text{с}}}{K_{\text{с}}^2} + \frac{1 + \xi_{\text{в}}}{K_{\text{в}}^2} q^3 + (1 + \Sigma \xi) (1 + q)^3 - \\ - 2 \left( \frac{1}{K_{\text{с}}} + \frac{q^2}{K_{\text{в}}} \right) (1 + q); \quad B = \frac{1 + \xi_{\text{с}}}{K_{\text{с}}^2} - \frac{1 + \xi_{\text{в}}}{K_{\text{в}}^2} q^2. \end{aligned}$$

Коэффициент полезного действия насоса (по рыбе)

$$\eta_{\text{р}} = \frac{\rho_{\text{р}}}{\rho_{\text{в}}} c q h,$$

где  $\rho_{\text{р}}$  — плотность рыбы во всасывающем патрубке, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  — концентрация рыбы во всасывающем патрубке:  $c = 0, 10, \dots, 0,4$ .

Графические зависимости  $h = f(q)$ , построенные по формуле (14),

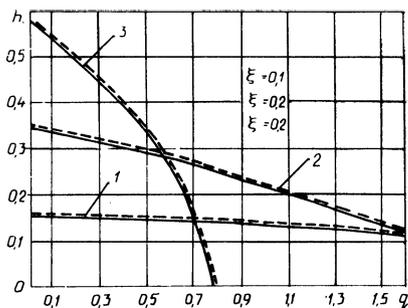


Рис. 2. Зависимость  $h = f(q)$ :  
 1 -  $K_c = 0,1$ ; 2 -  $K_c = 0,25$ ; 3 -  
 $K_c = 0,5$ . Сплошные линии - расчеты  
 по (14); пунктирные - расчеты по  
 [8]  $\xi_B = 0,1$ ;  $\xi_c = 0,2$ ;  $\Sigma\xi = 0,2$ .

имеются на рис. 2. Для сравнения там же представлены и результаты расчетов, выполненных по формуле, рекомендованной для расчета эжекторных грунтозаборов землесосных снарядов [8] при  $\xi_c = 0,2$ ;  $\xi_B = 0,1$ ;  $\Sigma\xi = 0,2$ .

**Пример. Исходные данные:**

$H = 3$  м;  $Q_B = 190$  м<sup>3</sup>/ч ( $52,8 \times 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/с);  $c = 0,4$ ; допустимая безопасная для рыбы разность скоростей  $\Delta v^* = v_c - v_B = (8 - 12,5)$  м/с.

Расчетные параметры:  $d_B$  - внутренний диаметр всасывающего патрубка насоса;  $d_K$  - внутренний диаметр камеры смешения насоса;  $l_K$  - длина камеры смешения;  $\delta_c$  - ширина кольцевого сопла;  $d_D$  - максимальный внутренний диаметр диффузора;  $v_B$ ;  $v_c$ ;  $\Delta v$ ;  $v_K$ ;  $Q_c$ ;  $Q_K$ ;  $\eta_p$ .

**Решение.** Основываясь на данных [ 1, 2, 5 ], принимаем  $K_c = 0,25$ ;  $K_B = 1 - K_c = 0,75$ ;  $\xi_B = 0,1$ ;  $\xi_c = 0,2$ ;  $\Sigma\xi = 0,2$ ;  $q = 0,7$ . По формуле (14) находим  $h = 0,253$ . Из соотношений  $h = H/H_c$  и  $q = Q_B/Q_c$  определяем, что  $H_c = 11,9$  м и  $Q_c = 75,5 \times 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/с;  $= 270$  м<sup>3</sup>/ч;  $Q_K = Q_c + Q_B = 128,5 \times 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/с = 460 м<sup>3</sup>/ч.

Величину  $\omega_K$  рассчитываем по формуле

$$\omega_K = \frac{1}{K_c K_B} \left( \frac{(1 + \xi_c) K_B^2 Q_c^2 - (1 + \xi_B) K_c^2 Q_B^2}{2gH_c} \right)^{0,5},$$

которую нетрудно получить из (13), имея в виду, что  $\omega_c = K_c \omega_K$ ;  $\omega_B = K_B \omega_K$ . Тогда

$$\omega_K = 2,11 \times 10^{-2} \text{ м}^2; \omega_c = 0,53 \times 10^{-2} \text{ м}^2; \omega_B = 1,58 \times 10^{-2} \text{ м}^2; d_K = \sqrt{\frac{4\omega_K}{\pi}} =$$

$$= 0,164 \text{ м}; d_B = \sqrt{\frac{4\omega_B}{\pi}} = 0,142 \text{ м}; \delta_c = \frac{d_K - d_B}{2} = 0,011 \text{ м}; v_K = \frac{Q_K}{\omega_K} = 6,09 \text{ м/с};$$

$$v_B = \frac{Q_B}{\omega_B} = 3,32 \text{ м/с}; v_c = \frac{Q_c}{\omega_c} = 14,6 \text{ м/с}; \Delta v = v_c - v_B = 11,28 \text{ м/с} < v^*; d_D = \sqrt{\frac{4Q_K}{\pi v_D}} =$$

$$= 3,28 \times 10^{-1} \text{ м, где } v_D \text{ принимаем равной } 1,5 \text{ м/с}; l_D = \frac{d_D - d_K}{2 \operatorname{tg} 4^\circ} = 1,17 \text{ м}; l_K = 4 \frac{d_K}{K_c} =$$

$$= 0,66 \text{ м}; \eta = 0,4 \cdot 0,7 \cdot 0,253 = 0,072.$$

Мощность потока воды, проходящего через сопло,

$$N_c = \rho_B g Q_c H_c = 8,83 \text{ кВт.}$$

Мощность электродвигателя рабочего насоса (без учета потерь энергии в подводящих трубах)

$$N = N_c / \eta_n = 8,83 : 0,7 = 12,61 \text{ кВт,}$$

где  $\eta_n$  – КПД рабочего насоса.

$$\begin{aligned} \text{Максимальная длина перекачиваемой рыбы } l &= 1,8 d_B = 1,8 \cdot 0,142 \approx 0,28 \text{ м; } b = \\ &= 0,8 d_B \approx 0,8 \cdot 0,142 = 0,11 \text{ м.} \end{aligned}$$

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Фридман Б.Э. Гидроэлеваторы. – М., 1960. – 321 с. 2. Каменев П.Н. Гидроэлеваторы в строительстве. – М., 1970. – 415 с. 3. Гриб В.К., Морев А.Н. Комплексная механизация прудового рыбоводства. – М., 1973. – 309 с. 4. Терентьев А.В., Миллер Б.Н., Чернигин Н.Ф. Гидравлическая механизация в рыбной промышленности. – М., 1956. – 300 с. 5. Минкин Ю.В., Мускевич Г.Е. Выживаемость молоди рыб в эжекторных рыбоподъемниках // Рыбное хозяйство. – 1982. – № 9. – С. 28–30. 6. Докукин М.М., Муравенко Т.А. Струйный аксиальный насос // Рыбное хозяйство. – 1985. – № 9. – С. 65–66. 7. Мускевич Г.Е., Минкин Ю.В. К выбору оптимальных размеров и формы кольцевого сопла гидроэлеваторов – рыбоподъемников в рыбозащитных комплексах водозаборных сооружений // Вопросы повышения эффективности существующих оросительных систем. – Новочеркасск, 1981. – Вып. 14. – С. 28–32. 8. Мустафин Х.Т. Расчет эжектора на воде и гидросмеси // Нерудные строительные материалы. – Тольятти, 1968. – Вып. 24. – С. 16–20.

УДК 532.526

И.В. ПОВОРОТНЫЙ, Д.А. ПРОКОПЧУК

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕЧЕНИЯ ЧАСТИЧНО ОГРАНИЧЕННЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУЙ

Несмотря на практическое применение частично ограниченных турбулентных затопленных струй, формируемых осесимметричным источником в струйных завесных системах, закономерности их распространения являются тем не менее малоизученными как в теоретическом, так и в экспериментальном аспектах.

Среди немногочисленных публикаций по данному вопросу наиболее актуальной по полученным результатам является работа [1], в которой были исследованы параметры течения частично ограниченных затопленных струй в диапазоне отстояния струеформирующего источника от плоской стенки  $h = (0 - 3,5) d$  на расстояниях  $X \approx 60$  калибров.

Однако практическое приложение таких типов течения требует знания закономерностей их развития на более значительном удалении от источника истечения порядка  $X = (200 - 400) d$  и при больших величинах отстояния –  $h$ .

В работах [ 4, 5] представлены результаты исследования пристенных и частично ограниченных струйных течений в диапазоне  $h = (0...12,5)d$ . Приведенные данные позволили судить о закономерностях развития таких типов течения в плоскости  $X$  при различных значениях чисел Рейнольдса и выходного диаметра струеформирующего устройства. Для полного представления о характере развития частично ограниченных струйных течений необходимо иметь экспериментальные данные их распространения по всем трем координатам  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ .

Цель настоящей работы — исследование характеристик течения частично ограниченных струй в пространстве. При этом ставилась задача получения результатов на расстоянии от источника  $X > 100$  калибров в значительном диапазоне изменения величины отстояния источника от поверхности —  $h$ .

Исследования затопленных частично ограниченных струй производились на специальном гидродинамическом стенде для изучения струйных течений, конструкция и параметры которого достаточно полно изложены в работе [3]. В ней же описана и применявшаяся в экспериментах электрохимическая методика измерения полей скорости струйных потоков. Струеформирующими источниками истечения являются конически сходящиеся насадки с углом конусности  $\alpha = 14^\circ$ , отношением  $l/d = 4$  и выходными диаметрами  $d = 1; 2; 3,5$  и  $4,5$  мм. Истечение струй обеспечивалось в диапазоне чисел Рейнольдса  $Re = (0,3-10)10^4$  при  $h = (0...12,5)d$ .

Для выявления тенденций развития истекающих частично ограниченных затопленных струй проведена их визуализация и фотографирование. Эксперименты по визуализации проходили в рамках гидродинамического стенда с подачей в качестве истекающей жидкости раствора красителя, которым являлся насыщенный водный раствор марганцевокислого калия ( $KMnO_4$ ). Фотографирование производилось для струй, истекающих из насадков с диаметрами выходного отверстия  $d = 1$  и  $4,5$  мм при  $h/d = 0; 1,2; 2,5; 5,0; 7,5; 10$  и  $12,5$ .

Полученные данные могут быть представлены в виде графика изменения угла расширения струи —  $\Theta^\circ$  в зависимости от относительного отстояния  $h/d$  (рис. 1). В каждом конкретном случае отстояния источника  $h$  формируемая им струя имеет присущие только ей тенденции развития, выражающиеся в изменении угла расширения струи  $\Theta$  (рис. 1, а). Эти закономерности определяются безразмерным параметром  $h/d$ , а зависимость носит нелинейный характер (рис. 1, б). При  $h/d > 12,5$  угол расширения струи оказывается практически равным углу расширения свободной затопленной турбулентной струи ( $h = \infty$ ).

Дальнейшим этапом исследований являлось экспериментальное определение характеристик струйного потока, позволяющих судить о тенденциях его развития в пространстве. Такими характеристиками принято считать полуширину струи в направлении  $Z - z_{0,5}$ , а по оси  $Y$  — полутолщину струи  $y_{0,5}$  и параметр  $y_m$ , соответствующий ординате  $y$  (в фиксированном сечении  $X$ ), при которой скорость равна максимальной ( $U = U_m$ ).

Для получения данных о параметрах  $z_{0,5}$ ,  $y_m$  и  $y_{0,5}$  были выполнены многочисленные экспериментальные исследования частично ограниченных струй, формируемых насадками диаметром  $d = 1; 2$  и  $4,5$  мм при величине отстояния  $h$ , варьируемой в диапазоне  $h = (0 - 12,5)d$ . В результате эксперимен-

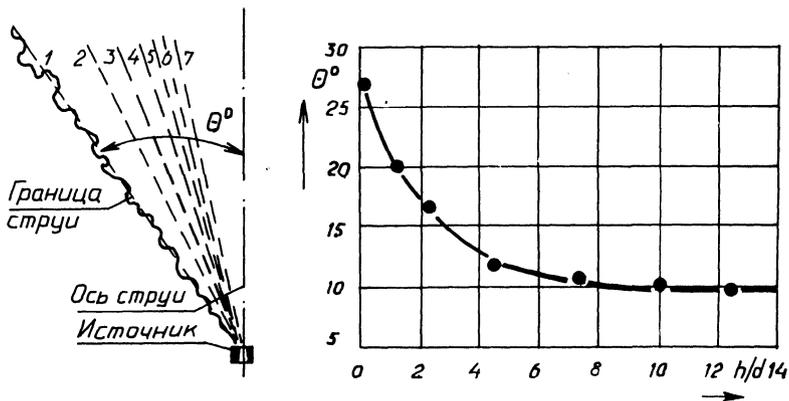


Рис. 1. Схема и график изменения угла расширения струи  $\theta = f(h/d)$ :  
 1 -  $h/d = 0$ ; 2 -  $h/d = 1,2$ ; 3 -  $h/d = 2,5$ ; 4 -  $h/d = 4,5$ ; 5 -  $h/d = 7,5$ ; 6 -  $h/d = 10$ ;  
 7 -  $h/d = 12,5$ .

тов, проведенных на основании электрохимической методики исследования скоростного поля течения, при помощи клинового электрохимического датчика-зонда, имеющего три степени свободы и вводимого в изучаемый струйный поток, были получены эпюры скорости по осям  $Y$  и  $Z$  в восьми фиксированных сечениях, удаленных от источника истечения на расстояние  $X = (0...400)d$ .

Результаты обработки полученных эпюр по оси  $Z$  представляют собой график  $U/U_m = f(z)$  для каждого из восьми сечений и позволяют определить значения параметра  $z_{0,5}$  - координаты точки, соответствующей значению скорости  $U = 0,5U_m$ . На основании этих данных был построен график изменения полуширины струи  $z_{0,5}/d$  вдоль по потоку для различных случаев отстояния  $h/d$  (рис. 2). Анализ результатов показал, что в плоскости  $Z$  каждой из рассмотренных частично ограниченных струй присущ свой характер и темп развития. Темп роста полуширины струи, представленный в безразмерном виде, по-

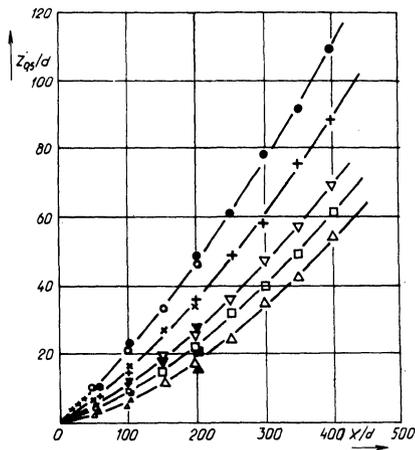


Рис. 2. График изменения полуширины частично ограниченных струй вдоль по потоку  $z_{0,5}/d$ :

●○ -  $h/d = 0$ ; +×  $h/d = 2,5$ ; ▼▽ -  $h/d = 5,0$ ; ■□ -  $h/d = 7,5$ ; ▲△ -  $h/d = 12,5$ .

зволяет заключить, что основным фактором, определяющим тенденцию его нарастания по потоку, является значение величины относительного отстояния  $h/d$  струеформирующего осесимметричного источника от плоской стенки, вдоль которой происходит ее развитие, и не зависит от величины начального выходного отверстия источника.

Применение насадков выходными диаметрами  $d = 1$  и  $2$  мм делает возможным получить данные на значительном удалении от источника истечения (порядка 400 калибров) и представление о характере развития границ самого потока, которые оказываются явно не линейными для всех рассмотренных случаев истечения. Все это не подтверждает гипотезы о прямолинейности границ частично ограниченных струйных потоков, выдвинутой на основании полученных данных [1], имеющих незначительный диапазон исследования  $x/d \leq 60$ .

Обработка эпюр скорости потока по оси  $Y$ , представляющих собой график  $U/U_m = f(y)$  для каждого фиксированного сечения  $x/d$ , позволяла получить

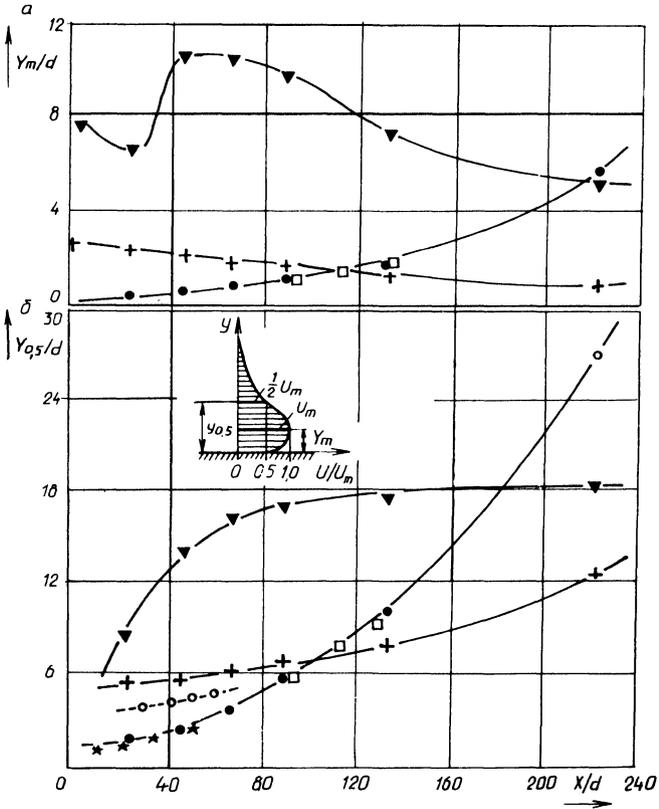


Рис. 3. Изменение характеристик течения струй в плоскости  $Y$ :

$a$  - параметра  $y_{0,5}/d$ ;  $b$  - полутолщины струи  $y_{0,5}/d$ ; ● -  $h/d = 0$ ; + -  $h/d = 2,5$ ; ▼ -  $h/d = 4,5$ ; □ - из работы [2]; ●, ★ - из работы [1].

значения характеристик течения  $y_m$  и  $y_{0,5}$ , используя которые были построены графики, приведенные на рис. 3, соответствующие трем случаям отстояния источника  $h/d = 0; 2,5; 7,5$ . Кроме того, на рис. 3, а и 3, б приведены экспериментальные данные для пристенной [2] и частично отстоящей струи с  $h/d = 2,0$  [1].

Анализируя графики, можно отметить следующее. В случае развития пристенной струи ( $h/d = 0$ ) наблюдается ярко выраженный экспоненциальный рост как параметра  $y_m$ , так и параметра  $y_{0,5}$  с увеличением расстояния  $X$  от выходного сечения. При этом получено хорошее согласование с данными по характеристикам пристенной струи [1, 2].

Что касается развития частично ограниченных струй, то здесь картина изменения рассматриваемых параметров  $y_m$  и  $y_{0,5}$  существенно отличается от случая распространения пристенной струи. Так, в случае развития струи, отстоящей на  $h = 2,5d$ , имеем, что величина  $y_m$  непрерывно уменьшается в рассмотренном диапазоне  $0 \leq X \leq 220d$ , при постоянном нарастании полутолщины струи  $y_{0,5}$ .

При варианте отстояния струеформирующего насадка  $h = 7,5d$  для параметра  $y_m$  присуще несколько этапов развития. Так, на участке  $0 \leq X \leq 20d$  наблюдается уменьшение  $y_m$ , на участке  $20d < X \leq 40d$  – временное возрастание, а на  $X > 40d$  – опять дальнейшее уменьшение.

Такое немонотонное изменение ординаты  $y_m$  обусловлено перестройкой течения самой струи в окрестностях точки присоединения ее к рабочей поверхности. При малом отстоянии источника ( $h \leq 2,5d$ ) присоединение струи к поверхности происходит на небольшом участке  $X$ , что приводит к быстрому растеканию струи по самой поверхности и постоянному смещению максимума скорости в направлении присоединения. Тем не менее влияние отстояния все же сказывается на снижении темпа нарастания полутолщины  $y_{0,5}$  по сравнению с пристенной струей.

В случае, когда источник отстоит на большем удалении от рабочей поверхности ( $h \geq 7,5d$ ), развитие частично ограниченной струи существенно изменяется. Вначале она развивается как свободная осесимметричная струя, а искривление траектории в сторону рабочей поверхности приводит к уменьшению параметра  $y_m$ . Затем, когда нижний край струи, взаимодействуя с поверхностью, начинает затормаживаться, струя некоторое время стремится "оттолкнуться" от преграды в противоположную сторону и  $y_m$  временно возрастает. При дальнейшем развитии струя растекается по поверхности, вызывая смещение максимума скорости в сторону самой поверхности, приводящее к повторному уменьшению  $y_m$ . Что касается изменения полутолщины струи –  $y_{0,5}$ , то здесь имеется область резкого роста ее значения ( $X \leq 80d$ ) и последующая область медленного стабилизированного нарастания значения  $y_{0,5}$  ( $X > 80d$ ).

Таким образом, в данной работе были экспериментально получены данные о характеристиках течения частично ограниченных турбулентных струй в плоскостях развития  $Y$  и  $Z$ . Все это свидетельствует о следующих моментах:

получены визуальные данные по развитию частично ограниченных струйных течений;

подтверждена гипотеза авторов [4,5] о том, что в случае распространения частично ограниченных течений закономерности их развития в пространстве определенным образом зависят от величины отстояния струеформирующего осесимметричного насадка от поверхности, вдоль которой они распространяются;

для всех рассмотренных случаев частично ограниченных струй в диапазоне  $h = (0..12,5)d$  и  $X = (0..400)d$  по оси  $Z$  отмечен нелинейный характер изменения полуширины струи, темп нарастания которой определяется величиной отстояния  $h/d$ ;

темп нарастания полутолщины рассмотренных типов течения также оказывается нелинейным. Причем изменение параметров  $y_m$  и  $y_{0,5}$  также зависит от  $h/d$ , оказывающего влияние на картину перестройки течения струи в окрестности преграды в вертикальной плоскости.

Приведенные в статье материалы были использованы при обосновании выбора оптимальных режимов работы системы защиты от биологического обрастания объектов, основанных на струйной подаче токсичного для обрастателей реагента.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Davis M.R., Winarto H. Jet diffusion from a circular nozzle above a solid plane // J. of Fluid Mechanics. — 1980. Vol. 101, N 1. — P.p. 201–220.
2. Newman B.G., Patel R.P., Savage S.B., Tjio H.K. Three-Dimensional Wall Jet Originating from a Circular Orifice // J. Aeronautical Quarterly. — 1972. — Vol. 23, N 3. — P.p. 188–200.
3. Поворотный И.В., Прокочук Д.А., Козлов Д.А. Влияние параметров насадков на развитие турбулентных затопленных струй // Водное хоз-во и гидротехн. стр-во. — Мн., 1987. — № 16. — С. 89–94.
4. Прокочук Д.А., Поворотный И.В., Козлов Д.А. Развитие турбулентной осесимметричной струи, распространяющейся вдоль плоской стенки // Реофизика полимерных и дисперсных жидкостей. — Мн., 1986. — С. 126–132.
5. Поворотный И.В., Прокочук Д.А., Козлов Д.А. Пристенная турбулентная струя, истекающая из осесимметричного источника // Водное хоз-во и гидротехн. стр-во. — М., 1988. — № 17. — С. 85–89.

УДК 532.522

А.В. КАРПЕЧЕНКО, В.В. КУЛЕБЯКИН,  
В.В. ТОВЧИГРЕЧКО

#### О ВЛИЯНИИ ПОЛИМЕРНЫХ ДОБАВОК НА ИМПАКТНУЮ СТРУЮ

Исследования импактных течений обусловлены их широким использованием в мойке и очистке деталей, в гидромониторном бурении — там, где определяющим технологическим фактором является воздействие струи на преграду. Сложность гидродинамической ситуации, когда одновременно представлены участок невозмущенного движения, область разворота и радиальная пристенная зона [1], затрудняет теоретическое решение задачи. Отсутствие общепринятой концепции воздействия полимерных добавок на механизм тур-

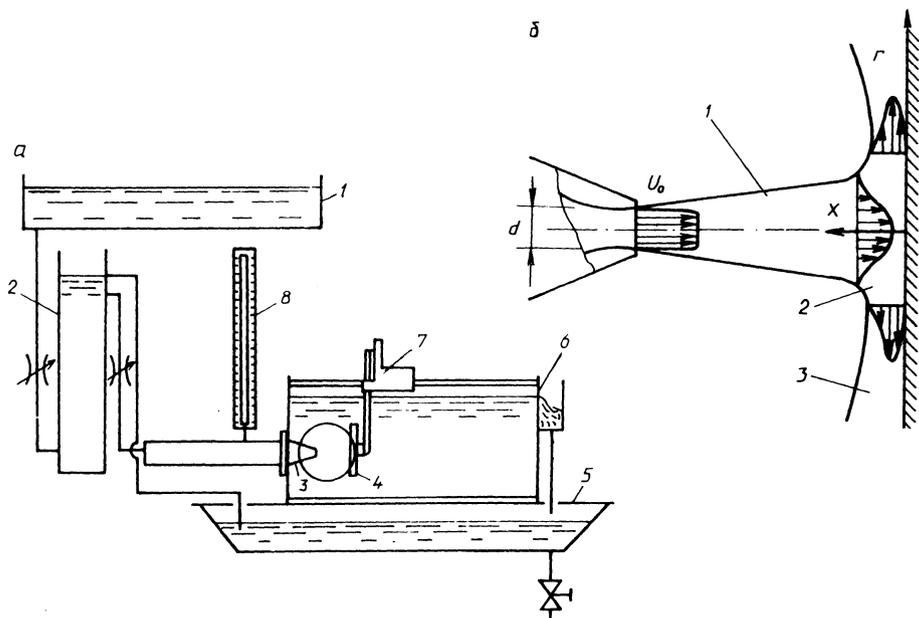


Рис. 1. Безнасосная установка:

*a* – принципиальная схема; 1 – основной бак; 2 – бак постоянного уровня; 3 – насадок; 4 – преграда; 5 – сливной бак; 6 – ювета; 7 – координатник; 8 – пьезометр; *б* – гидродинамическая картина при натекании струи на преграду: 1 – область невозмущенного движения; 2 – разворот; 3 – радиальная пристенная струя.

булентного течения делает экспериментальный путь исследования предпочтительным. Цель настоящей работы – определить влияние водорастворимых полимеров на осредненные и пульсационные характеристики давления и трения в области соударения.

Осесимметричная затопленная струя формировалась соплом диаметром  $d = 3$  мм и с начальной скоростью  $U_0 = 4,8$  м/с натекала на плоскую преграду в виде диска диаметром 135 мм под прямым углом (рис. 1). Для сведения к минимуму деградации полимерных растворов эксперименты выполнялись на безнасосной установке. Кроме того, осуществлялся контроль их состояния по снижению гидродинамического сопротивления при напорном течении в круглой трубе. На лицевой стороне диска размещались приемное отверстие, платиновый микрорезистор-катод и пьезокерамический датчик диаметрами соответственно 0,8; 0,4; 1,4 мм. В состав оборудования входили пьезометры, аппаратура для измерения среднего и пульсационной составляющей поверхностного трения электрохимическим, а также пульсаций давления пьезоэлектрическим методами. Рабочими средами служили свежеприготовленные растворы полиэтиленоксида (ПЭО) WSR-301, полиакриламида Сепаран AP 273 (ПАА) концентрацией  $C = 0,01$  % вес и вода.

Рассмотренный тип течения характеризуется переходом кинетической энергии затопленной струи в потенциальную в области торможения, называе-

Распределения осредненного давления вдоль преграды

| поперечная | Безразмерная координата |                       |                       |                       |                        |                        |
|------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
|            | продольная              |                       |                       |                       |                        |                        |
|            | 1,67                    | 3                     | 5                     | 10                    | 20                     | 30                     |
| 0          | $\frac{1}{1}$           | $\frac{1}{0,931}$     | $\frac{0,884}{0,849}$ | $\frac{0,349}{0,6}$   | $\frac{0,104}{0,108}$  | $\frac{0,0484}{0,052}$ |
|            | $\frac{0,891}{0,697}$   | $\frac{0,807}{0,61}$  | $\frac{0,56}{0,569}$  | $\frac{0,264}{0,462}$ | $\frac{0,097}{0,104}$  | $\frac{0,047}{0,0415}$ |
| 1          | $\frac{0,1}{0,115}$     | $\frac{0,111}{0,092}$ | $\frac{0,152}{0,112}$ | $\frac{0,148}{0,259}$ | $\frac{0,079}{0,0806}$ | $\frac{0,042}{0,0305}$ |
|            | $\frac{0,023}{0,02}$    | $\frac{-}{0,012}$     | $\frac{-}{0,023}$     | $\frac{0,05}{0,095}$  | $\frac{0,061}{0,052}$  | $\frac{0,036}{0,0225}$ |
| 2          | $\frac{-}{0,005}$       | $\frac{-}{-}$         | $\frac{-}{0,006}$     | $\frac{0,007}{0,046}$ | $\frac{0,038}{0,033}$  | $\frac{0,028}{0,016}$  |
|            | $\frac{-}{-}$           | $\frac{-}{-}$         | $\frac{-}{-}$         | $\frac{-}{0,008}$     | $\frac{0,011}{0,0101}$ | $\frac{0,0125}{0,007}$ |

Пр и м е ч а н и е. В числителе – вода, в знаменателе – ПАА. Пропуски соответствуют нулевым значениям.

мой окрестностью критической точки. Последующий разворот потока сопровождается его ускорением и обратной трансформацией энергии. Поэтому объяснимым выглядит экспериментально полученное распределение осредненного давления вдоль преграды, отнесенного к динамическому напору на выходе из сопла  $P_0$  (табл. 1) с максимумом на оси и последовательным уменьшением к периферии. Особенностью импактных струй с полимерными добавками является более узкий профиль с увеличением осевого значения при удалениях  $x/d \sim 10$ . Такое поведение вполне объясняется повышенной компактностью и дальнобойностью полимерных затопленных потоков [2]. После пяти калибров для обеих сред наблюдается автомодельность распределений давления, причем в случае полимерных растворов он более заполнен в приосевой области.

Во многом аналогичны рассмотренным профили пульсаций давления  $P'$ , но только вблизи центра растекания, в то время как после разворота их величина асимптотически приближается к нулевому значению. Максимум в критической точке (рис. 2) объясняется прежде всего торможением потока с высокой интенсивностью турбулентности – на основном участке затопленной струи она достигает десятков процентов. Примечательно, что при малых удалениях преграды профиль пульсаций имеет локальный минимум, соответствующий потенциальному ядру набегающего потока. В качестве особенности укажем

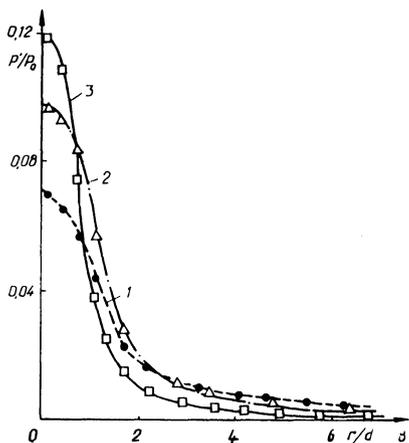


Рис. 2. Профили пульсаций давления на преграде:  
 $x/d = 10$ ,  $d = 3$  мм;  $U_0 = 4,8$  м/с; 1 – вода;  
 2 – ПЭО; 3 – ПАА.

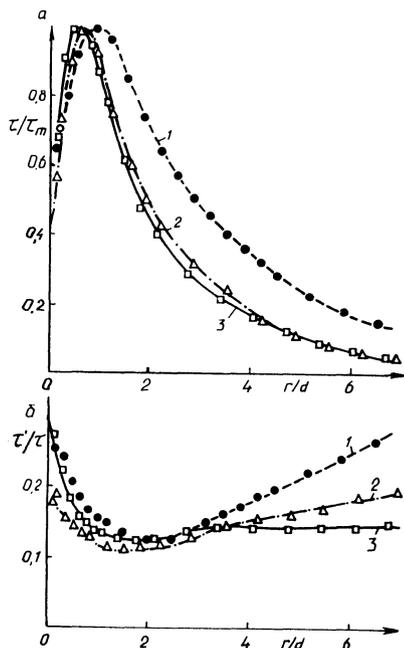


Рис. 3. Изменение поверхностного трения вдоль преграды:  
 а – осредненные значения; б – среднеквадратичные значения пульсаций;  
 $x/d = 10$ ,  $d = 3$  мм;  $U_0 = 4,8$  м/с; 1 – вода; 2 – ПЭО; 3 – ПАА.

резкий рост пульсаций давления в области торможения с вводом полимеров. Адекватного объяснения этому пока нет. Помимо влияния полимерных добавок на затопленную струю, данный эффект может быть связан с механизмом взаимодействия потока и находящихся в нем частиц. Согласно одной из наиболее обоснованных гипотез, агрегаты макромолекул полимера при прохождении сопла – области резкого роста скорости сдвига – испытывают интенсивные растягивающие напряжения, что заставляет их из клубков вытягиваться в нити, преодолевая упругие силы. В момент столкновения с препятствием запасенная энергия высвобождается, а сами агрегаты ведут себя подобно твердым частицам, после чего стремятся перейти в свое обычное состояние и в зоне радиальной пристенной струи их влияние сказывается в снижении сопротивления как при продольном обтекании пластины полимерным раствором.

Вывод о существенности предыстории течения – в данном случае области, где струя развивается как обычная затопленная, – подтверждается и измерениями поверхностного трения  $\tau$  (рис. 3, а,  $\tau_m$  – максимальное в данном сечении значение  $\tau$ ). Шлихтинг [3] определил для окрестности критической точки линейную зависимость касательных напряжений на стенке от поперечной координаты, что подтвердилось в наших опытах для малых удалений прегра-

ды. Отличие от теории состоит в ненулевом значении трения на оси течения при набегании полностью развитых турбулентных струй. Такое отклонение может быть объяснено спецификой электрохимического метода и рассматриваемого типа движения — конечными размерами датчика, интенсивным воздействием на него крупномасштабных вихревых образований. Максимум поверхностного трения в случае полимерных растворов на начальных калибрах смещается от центра, а профиль в сравнении с водой принимает более заполненный вид в периферийной области. С удалением преграды на  $x/d \geq 5$  максимум распределения сдвигается к оси, а в зоне радиального растекания струй с добавками наблюдается снижение касательных напряжений. Отметим, что ввод полимеров способствует росту  $\tau_m$  в пределах начального участка и уменьшению максимального трения с последующим удалением по сравнению с водой. Распределения основных гидродинамических параметров становятся подобными после  $x/d \sim 10$  для обоих типов сред. Отмеченная тенденция на воде сохраняется для чисел Рейнольдса, рассчитанных по скорости истечения из сопла  $Re_0 = = 3,8 \cdot 10^4$ .

Измерения среднеквадратичных значений пульсаций трения подтвердили практически ламинарный характер движения с весьма малой толщиной пристенного пограничного слоя в области критической точки при непосредственном воздействии потенциального ядра на преграду. Интенсивность турбулентности затопленных струй на начальном участке [2] невысока и растет с удалением от сопла, что выражается в появлении локального максимума пульсаций в критической точке (рис. 3, б). Вблизи  $r/d \sim 2$  флуктуации трения минимальны и по мере удаления от оси возрастают, причем растекание полимерных струй сопровождается подавлением турбулентности, вследствие чего темп роста  $\tau/\tau$  в этом случае заметно ниже.

Предельная относительная погрешность изменялась от 14 (поверхностное трение) до 1,8 % (его флуктуации).

Анализируя результаты экспериментов, можно сделать следующие основные выводы относительно влияния полимерных добавок на рассматриваемый тип движения:

1. Вследствие повышения компактности и дальнобойности на основном участке прослеживается локализация воздействия на поверхность, из-за чего смещается максимум трения к оси и резко усиливается амплитуда пульсаций в окрестности критической точки на основном участке.

2. Область радиальной пристенной струи характеризуется заметным эффектом снижения гидродинамического сопротивления.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ю д а е в Б.Н., М и х а й л о в М.С., С а в и н В.К. Теплообмен при взаимодействии струй с преградами // М., 1977. — 248 с. 2. Ш у л ь м а н З.П., П о к р ы в а й л о Н.А., К о в а л е в с к а я Н.Д., К у л е б я к и н В.В. Об измерении структуры турбулентных затопленных струй полимерных растворов // ИФЖ. — 1973. — Т. 25, № 6. — С. 977–986.
3. Ш л и х т и н г Г. Теория пограничного слоя. — М., 1974. — С. 98–100.

**ВЫДЕЛЕНИЕ НЕТРАНЗИТНЫХ ЧАСТЕЙ ВОДОТОКОВ СЛОЖНЫХ СЕЧЕНИЙ**

Одномерные математические модели используются не только как средство обоснования эффективных инженерных решений при проектировании водохозяйственных объектов, но и как инструмент, с помощью которого можно находить эффективное оперативное управление водными ресурсами в существующих системах. Расширение области их применения позволит выполнить расчеты движения воды в сложных водотоках и системах водотоков с выходом потока на пойму. Сечение водотока при этом становится сложным с неоднородной по периметру шероховатостью и существенно различной глубиной в русле и на частях поймы. Анализ аэрофотоснимков и непосредственные измерения показали, что при определенных уровнях воды течение осуществляется на отдельных, обычно вытянутых вдоль водотока, пониженных частях поймы с относительно небольшими коэффициентами шероховатости. В таких случаях значительная часть сечения является нетранзитной, так как скорость течения в ней практически равна нулю. Поэтому нет основания для учета ее в площади живого сечения, так как следствием было бы неверное определение следующих гидравлических характеристик: площади живого сечения, смоченного периметра, гидравлического радиуса и модуля расхода. Указанные особенности движения воды на поймах неоднократно отмечались многими исследователями [1, 2]. Белгипроводхозом (аэрофотосъемка) и ЦНИИКИВРом выполнено экспериментально исследование движения воды на широкой пойме р. Припяти (табл. 1). Нетранзитные части сечения при определенных уровнях воды достигали  $2/3$  ширины водного сечения. Аналогичное положение возникает и при эксплуатации водохозяйственных систем, особенно в аварийных ситуациях.

Естественно было бы использовать в таких случаях двухмерные математические модели [3, 4], но при расчете водотоков большой протяженности процесс вычислений усложняется, так как требует большого количества детальной исходной морфометрической и гидравлической информации, которая обычно отсутствует. Вместе с тем при обосновании многих инженерных решений необходимо и достаточно решение задачи в одномерной постановке. Однако как предположения о том, что все водное сечение поймы является живым сечением, так и исключение из него всей площади потока над поймой [15], приводит к результатам, существенно отличающимся от наблюдаемых [5]. Поэтому необходим более детальный учет возникновения нетранзитных зон на поймах.

Воспользуемся следующими физическими предпосылками. Неустановившееся движение воды на пойме является медленно изменяющимся и характеризуется плавными подъемами и спадами уровней. Это значит, что локальные и конвективные составляющие сил инерции малы по сравнению с силами сопротивления. Поэтому силы тяжести и силы сопротивления и определяют в основном движение воды. В соответствии с гипотезой квазистационарности при

Наблюденные и расчетные размеры транзитных частей сечения

| Способ получения исходных данных | Максимальная глубина, м | Полная ширина $B_0$ , км | Транзитная ширина $B_1$ , км |           |
|----------------------------------|-------------------------|--------------------------|------------------------------|-----------|
|                                  |                         |                          | экспериментальная            | расчетная |
| Аэрофотосъемка                   | 5,7                     | 24,7                     | 7,5                          | 10,6      |
| То же                            | 5,0                     | 29,4                     | 10,2                         | 10,7      |
| Измерения на пойме               | 5,0                     | 14,1                     | 3,5                          | 3,0       |

неравномерном и неустановившемся течении в спокойных потоках силы сопротивления движению определяются по зависимостям для равномерного течения. Лишь при высокой степени нестационарности [6], недостижимой при неустановившемся движении в открытых водотоках, гидравлические сопротивления отличаются от таковых при равномерном течении. Исследования полей продольных скоростей при неустановившемся течении [7, 8, 9] подтверждают предположение о том, что в спокойных потоках при неустановившемся и неравномерном течении при невысокой степени нестационарности и неоднородности по длине поля продольных скоростей, как и гидравлические сопротивления, незначительно отличаются от полей скоростей при равномерном течении. Это позволяет предложить методику выделения нетранзитных частей сечения, основанную на сравнении местных поверхностных скоростей над каждым элементом периметра водотока со средней в сечении скоростью. Естественно считать нетранзитными части сечения над теми элементами периметра, для которых местная осредненная поверхностная скорость мала по сравнению со средней в сечении, т.е. выделение нетранзитных частей периметра выполнять по критерию

$$r_i \geq u_{\text{пов}} / v, \quad (1)$$

где  $u_{\text{пов}}$  — поверхностная скорость над элементом (или его частью) периметра сложного сечения, м/с;  $v$  — средняя в сечении скорость, м/с.

Для определения поверхностной скорости над каждым элементом периметра можно воспользоваться полуэмпирической формулой расчета поля продольных скоростей в сечениях сложной формы с неоднородной по периметру шероховатостью [10]:

$$u = v + Lv_y(x) \left( 1 + \frac{\sqrt{q}}{\kappa C_y(x)} \left( 1 + \ln \frac{D_B(x, y)}{H(x)} \right) \right) + \\ + Mv_x(y) \left( 1 + \frac{\sqrt{q}}{\kappa C_x(y)} \left( 1 + \ln \frac{D_\Gamma(x, y)}{B(y)} \right) \right) - S,$$

где  $D_B(x, y)$ ,  $D_\Gamma(x, y)$  — расстояние от ближайшей границы до точки в сечении

по вертикали и горизонтали, м;  $B(y), H(x)$  – расстояние от границы соответственно до ближайшей гидродинамической оси и поверхности, м;  $C_y(x), C_x(y)$  – коэффициенты Шези;  $v_y(x), v_x(y)$  – средние скорости плоских потоков по вертикали и горизонтали, м/с;  $\kappa$  – постоянная Кармана;  $g$  – ускорение силы тяжести, м<sup>2</sup>/с;  $L, M, S$  – параметры, учитывающие влияние на поле продольных скоростей границ сечения [10].

По статистической оценке [11] погрешности вычисления продольных скоростей с помощью (2) практически во всем сечении, кроме окрестностей границ, не превышали 2%, а с надежностью 0,95 – 3%.

Структура формулы (2) такова, что местная осредненная скорость прямо пропорциональна корню квадратному из уклона. Следовательно, в (1) уклоны в числителе и знаменателе сокращаются и параметр  $r_i$  не зависит от них. Размеры нетранзитных частей зависят только от формы сечения и распределения по периметру шероховатости. Они изменяются с глубиной наполнения и могут быть определены до выполнения расчетов неустановившегося движения воды на стадии создания математической модели водного объекта.

Структуру эмпирической зависимости для  $r_i$  можно получить на основе следующих соображений. Чем больше отношение ширины к глубине потока и неоднородность распределения скоростей в сечении, тем большая вероятность того, что над каким-то элементом периметра возникнет нетранзитная часть сечения. Отношение ширины к глубине и неоднородность распределения по сечению скоростей желательно характеризовать безразмерными отношениями, соответственно  $B/H$  и  $u_{\max}/v$ , где  $B$  и  $H$  – ширина и глубина потока, м;

$u_{\max}$  – максимальная поверхностная скорость, м/с.

Функция  $r_i = f\left(\frac{B}{H}, \frac{u_{\max}}{v}\right)$  должна быть плавно изменяющейся в

широких диапазонах изменения аргументов. Этим требованиям удовлетворяет зависимость

$$r_i = \frac{u_{\max}}{v} \operatorname{th}\left(c \frac{B}{H}\right), \quad (3)$$

где  $c$  – параметр, определяемый по экспериментальным данным. Например, для поймы р. Припяти  $c = 6,5 \cdot 10^{-5}$ . Результаты выделения нетранзитных частей сечений при указанном значении  $c$  представлены в табл. 1. Расчетная ширина транзитного потока отличается от экспериментальной. Однако, учитывая сложность задачи и ограниченность технических возможностей выделения нетранзитных частей сечения как по материалам аэрофотосъемки, так и по данным непосредственных измерений полей скоростей в потоках, ширина которых достигает нескольких десятков километров, можно считать, что вычисленная ширина транзитного потока удовлетворительно согласуется с наблюдаемой.

С целью придания большей универсальности описанной методике алгоритм выделения нетранзитных частей усовершенствован. Для минимального  $k$ -го уровня вычисляется приведенный коэффициент шероховатости  $n_k$  [12]. Для каждого последующего уровня воды добавляются новые элементы

периметра со своими локальными значениями коэффициента шероховатости между  $k$ -м и  $(k+1)$ -м уровнями и вычисляется приведенный коэффициент шероховатости  $n_{k+1}$ . Выделение нетранзитных частей в сечении начинается при значении параметра  $c = 6,5 \cdot 10^{-5}$ . Если на  $(k+1)$ -м уровне приведенное значение коэффициента шероховатости увеличивается (уменьшается) вместе с увеличением (уменьшением) оставшихся локальных значений коэффициентов шероховатости на участках периметра между  $k$ -м и  $(k+1)$ -м характерными уровнями, то константа выбрана правильно. Если предыдущие условия не выполняются, то параметр  $c$  подобран неточно, он автоматически уменьшается (увеличивается) на 5 % и расчеты повторяются до одновременного увеличения (уменьшения) локальных и приведенных значений коэффициентов шероховатости.

На границе транзитных и нетранзитных частей существуют значительные градиенты скоростей, интенсивные пульсационные движения, приводящие к большим касательным напряжениям, а при их схематизации — к большим коэффициентам шероховатости. Численное значение коэффициента шероховатости на границе транзитных и нетранзитных зон (0,04) принято на основании экспериментальных данных [13].

В работе [13] экспериментально изучалось течение воды в круглой трубе с тонкими диафрагмами одинакового диаметра. Диафрагмы были установлены на таком расстоянии, чтобы поток, проходя через одну из них и расширяясь, лишь коснувшись боковой стенки, сужался перед входом в следующую диафрагму. Таким образом, поток, проходя через систему диафрагм, на всем протяжении взаимодействовал с нетранзитными частями сечения и через них — с жесткими границами. В экспериментах детально измерялось распределение по длине давления, что позволило определить величину гидравлических сопротивлений и вычислить среднее значение коэффициента шероховатости, которое оказалось близким к 0,04. Эта величина и принята в качестве приближенного значения коэффициента шероховатости на границах транзитных и нетранзитных частей сечений водотока. Если для элемента периметра выполнялось условие (1), то с его концов проводились вертикальные линии до пересечения с поверхностью и на них как на границах нетранзитных частей назначался коэффициент шероховатости  $n = 0,04$ . Часть сечения между упомянутыми вертикальными линиями принималась нетранзитной, и эта часть исключалась из общей ширины. Аналогично поступали и с выделением нетранзитной части площади. Таким образом, транзитная часть принимала измененные очертания по сравнению с полным сечением.

После выделения нетранзитных частей для оставшегося сечения определялись площадь, смоченный периметр и модуль расхода, вычислялось приведенное значение коэффициента шероховатости [12], которые затем и использовались при создании одномерных математических моделей водных объектов сложных сечений. Для реализации предложенного алгоритма написана программа с автоматическим выделением нетранзитных частей сечения, с помощью которой создаются математические модели водных объектов. Результаты расчета водного режима, выполненные при ее применении, были удовлетворительными [14].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Розенберг Л.И., Русинов М.И. Особенности в схематизации пойменных русел при расчетах неустановившегося движения воды // Тр. ГГИ. — 1967. — Вып. 140. — С. 83–90. 2. Федосеев В.А. Одномерная схематизация неустановившегося движения при изоляции русла и поймы // Тр. ГГИ. — 1969. — Вып. 173. — С. 3–33. 3. Шугрин С.М. Соединение одномерной и двухмерной (плановой) моделей течения воды // Водные ресурсы. — 1987. — № 5. — С. 5–15. 4. Шеренков И.А. Прикладные плановые задачи гидравлики открытых потоков. — М., 1978. — 240 с. 5. Никифоровская В.С. О численных моделях неустановившихся течений в руслах с поймами // Динамические задачи механики сплошных сред. — Новосибирск, 1978. — Вып. 35. — С. 89–98. 6. Попов Д.Н. Нестационарные гидромеханические процессы. — М., 1982. — 240 с. 7. Шабрин А.М. Швидкісна структура відкритих потоків при несталеному русі // Доповіді АН УРСР. — 1963. — № 11. — С. 1448–1451. 8. Шабрин А.Н. Исследование скоростей структуры неустановившегося открытого потока: Автореф. ... канд. техн. наук. — Киев, 1964. — 17 с. 9. Богданович М.И. Анализ влияния неравномерности и нестационарности движения на распределение продольных осредненных скоростей // Водное хоз-во и гидротехн. стр-во. — Мн., 1985. — Вып. 14. — С. 81–85. 10. Рогунович В.П., Богданович М.И. Распределение продольных скоростей в руслах неправильной формы сечения // Водное хоз-во и гидротехн. стр-во. — Мн., 1984. — Вып. 13. — С. 56–62. 11. Богданович М.И. Метод расчета продольного компонента осредненной скорости в равномерных потоках неправильной формы поперечного сечения // Динамика и термика рек, водохранилищ и эстуариев. — М., 1984. — Т. 1. — С. 21–23. 12. Рогунович В.П. Определение приведенного коэффициента шероховатости // Метеорология и гидрология. — 1986. — № 3. — С. 81–88. 13. Бампи С.А. Определение коэффициента шероховатости на границе транзитного потока и водоворотной зоны в круглой трубе с диафрагмами // Изучение и использование водных ресурсов. — М., 1980. — С. 105–110. 14. Рогунович В.П., Вап Ю.И., Бампи С.А., Шнипов Ф.Д. Математическая модель системы водотоков бассейна р. Припять в естественном состоянии и при обваловании // Проблемы Полесья. — 1982. — № 8. — С. 75–92. 15. Abbott M.B., Verhoeg F.A. Data reversible sustems for flood routing // 13 th Congr. Internat. Assoc. Hydraul. Res. Kyoto, 1969. — Vol. 1. — P. 305–312.

УДК 532.543

Ф.Д. ШНИПОВ

### К ВОПРОСУ О ГЕНЕРАЦИИ ПОПЕРЕЧНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ОТКРЫТЫХ РУСЛАХ

Изучению трехмерного движения воды в прямолинейных руслах некруглой формы уделяется большое внимание. Исследования проводятся в двух тесно взаимосвязанных направлениях: теоретическом, посвященном созданию математических моделей, и экспериментальном, направленном на углубленное изучение механизма турбулентных течений в каналах ограниченных размеров и получение данных для обоснования разрабатываемых математических моделей. Однако все достигнутое относится в основном к простейшим видам течений, в частности трубам прямоугольной формы [1].

Важным аспектом турбулентного движения воды в руслах некруглой формы являются поперечные течения, существование которых доказано теорети-

чески [2] и экспериментально [3, 4]. Они оказывают значительное влияние на различные процессы (устойчивость сечений, транспорт наносов, тепло- и массоперенос и т.д.). Нами рассматривается механизм формирования этих течений в прямолинейных руслах, причем основное внимание уделено потокам со свободной поверхностью. По мнению О.Ф. Васильева [5], это одна из актуальных задач гидродинамики русл.

Для изучения механизма возникновения поперечных течений в прямолинейных потоках используют уравнение баланса завихренности осредненного движения. Применяя операцию  $rot_{x_1} \bar{F}$  к проекциям на оси  $x_2, x_3$  параболизированного уравнения сохранения количества движения, получим

$$\begin{aligned} \underbrace{\frac{\partial W_1}{\partial t}}_{P_1} + \underbrace{\bar{v}_1 \frac{\partial W_1}{\partial x_1}}_{P_2} + \underbrace{\bar{v}_2 \frac{\partial W_1}{\partial x_2}}_{P_3} + \underbrace{v_3 \frac{\partial W_1}{\partial x_3}}_{P_4} &= \underbrace{\nu \Delta W_1}_{P_4} + \underbrace{W_1 \frac{\partial \bar{v}_1}{\partial x_1}}_{P_5} + \\ + \underbrace{W_2 \frac{\partial \bar{v}_1}{\partial x_2} + W_3 \frac{\partial \bar{v}_1}{\partial x_3}}_{P_6} - \underbrace{\frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial x_3} (\bar{v}_3^2 - \bar{v}_2^2)}_{P_7} - \\ - \underbrace{\left( \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} - \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} \right) (-\bar{v}_2' \bar{v}_3')}_{P_8}, \end{aligned}$$

где  $x_1, x_2, x_3$  – декартовы координаты (продольная, вертикальная и горизонтальная),  $\bar{v}_i, W_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) – компоненты соответственно осредненной скорости и завихренности осредненного движения:

$$W_1 = \frac{\partial \bar{v}_3}{\partial x_2} - \frac{\partial \bar{v}_2}{\partial x_3}; \quad W_2 = \frac{\partial \bar{v}_3}{\partial x_1} - \frac{\partial \bar{v}_1}{\partial x_3}; \quad W_3 = \frac{\partial \bar{v}_1}{\partial x_2} - \frac{\partial \bar{v}_2}{\partial x_3}.$$

Из уравнения (1) следует, что в трехмерном нестационарном турбулентном потоке, имеющем преимущественно вдоль  $x_1$  направление движения, существуют два источника генерации поперечных течений: генерация, обусловленная градиентами турбулентных напряжений  $P_7, P_8$ ; генерация, обусловленная поперечными градиентами продольной осредненной скорости  $P_6$  и так называемым растяжением продольной компоненты вихря  $P_5$ . Изменение интенсивности поперечной циркуляции может происходить также за счет локального  $P_1$  и конвективного  $P_2, P_3$  переносов завихренности  $W_1$ , а также вязкой диффузии  $P_4$ . Конвективные слагаемые (1) не создают и не уничтожают поперечные течения, они могут лишь перемещать их из областей высокой в области низкой интенсивности, причем  $P_2$  направляет завихренность вниз по по-

току, а  $P_3$  выравнивает ее в поперечном сечении. Аналогичное действие оказывает и диффузионное слагаемое  $P_4$ .

В различных областях потока знаки слагаемых  $P_5, P_6, P_7, P_8$  могут быть разными и, следовательно, будут входить в уравнение завихренности или в виде источника, или в виде стока, т.е. формируют поперечную циркуляцию противоположного направления. В областях с одинаковыми знаками источников членов интенсивность поперечных течений увеличивается, с различными — уменьшается.

Простейшей идеализацией турбулентного течения в прямолинейных руслах ограниченных размеров является продольно-однородный поток, в котором все параметры по длине водотока не изменяются. Для этого случая уравнение баланса завихренности (1) имеет вид

$$P_3 = P_4 + P_7 + P_8, \quad (2)$$

т.е. единственным источником генерации поперечных течений являются градиенты турбулентных напряжений. Поскольку в ламинарном продольно-однородном потоке  $P_7$  и  $P_8$  равны нулю, поперечная циркуляция возникнуть не может.

Количественная оценка вклада слагаемых уравнения (1) в баланс завихренности осредненного движения может быть дана лишь на основе экспериментальных данных. Однако измерение турбулентных характеристик (напряжений Рейнольдса, поперечных скоростей и компонентов вихря) в трехмерном нестационарном потоке представляет собой задачу чрезвычайной сложности и требует малоинерционных приборов и высокой степени автоматизации эксперимента. Поэтому существующие оценки выполнены применительно к стационарным потокам: пограничному слою [6] и продольно-однородному движению в трубах [3, 7]. В руслах другой формы и особенно в потоках со свободной поверхностью, роль слагаемых уравнения баланса завихренности может быть иной.

Особый интерес при изучении механизма поперечной циркуляции вызывает распределение источниковых слагаемых, знак и величина которых определяют направление и интенсивность поперечных течений. Следует отметить, что, согласно оценкам [3, 7],  $P_7$  в уравнении (2) значительно превосходит  $P_8$  и продукция завихренности с высокой степенью точности оценивается величиной смешанной производной от разности турбулентных нормальных напряжений.

С целью изучения трехмерной кинематической структуры потока в открытых руслах трапециевидальной формы автором с помощью термоанемометрической системы постоянной температуры "DISA" проведены экспериментальные исследования [8], позволившие выявить основные закономерности распределения по сечению трехмерного поля осредненных скоростей, турбулентных напряжений, в том числе разности  $(\bar{v}_3'^2 - \bar{v}_2'^2)/v_*^2$ , а также основного члена генерации поперечных течений  $P_7$ .

Прежде чем приступить к обсуждению результатов исследования (рис. 1, 2, 3), целесообразно на основе анализа физических закономерностей течения в трубах и открытых руслах сделать некоторые общие выводы о характере из-

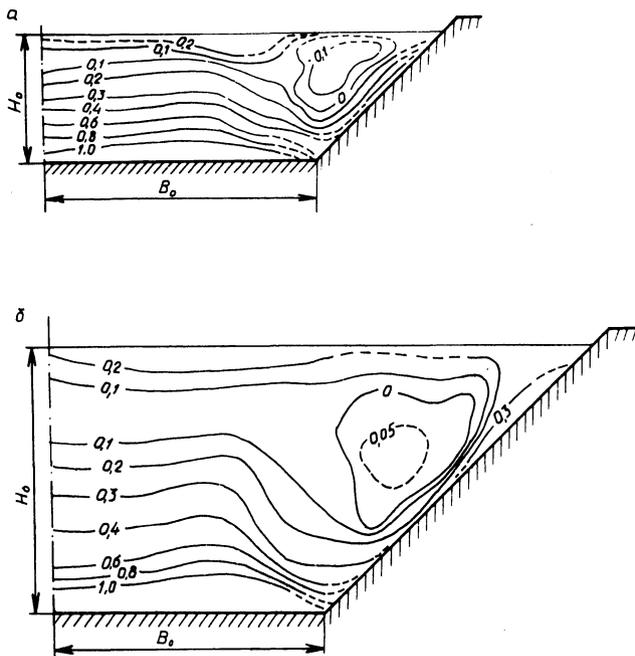


Рис. 1. Линии равных значений разности нормальных напряжений Рейнольдса  $(\bar{v}_3'^2 - \bar{v}_2'^2)/v_*^2$  в открытом трапециевидальном русле с  $B_0 = 0,075$  м:  
 $a - H_0 = 0,036$  м;  $б - H_0 = 0,075$  м.

менения величины  $(\bar{v}_3'^2 - \bar{v}_2'^2)$ .

Известно, что границы потока оказывают демпфирующее влияние на пульсации по нормали к ним, увеличивая их значения в других направлениях. Физически это можно представить следующим образом. Из уравнения баланса турбулентной энергии следует, что энергия осредненного движения непосредственно передается только продольным пульсациям, а поперечные получают ее от продольных посредством пульсации давления [9]. Поэтому как только пульсирующий объем жидкости проявляет свою индивидуальность, перемещаясь со скоростью  $\bar{v}'_1$  в направлении  $x_1$ , возникают пульсации давления  $p'$ , вызывающие перемещение объема в поперечных направлениях  $x_2, x_3$ . Граница потока (жесткая или свободная) ограничивает движение пульсирующего объема по нормали к ней ( $\bar{v}'_2$ ) и, как следует из условия неразрывности  $dv'_i/dx_1 = 0$  ( $i = 1, 2, 3$ ), усиливает его в двух других направлениях ( $v'_1, v'_3$ ). Поэтому в потоке между двумя бесконечно широкими горизонтальными пластинами разность нормальных турбулентных напряжений вдоль границы  $\rho \bar{v}_3'^2$  и по нормали к ней  $\rho \bar{v}_2'^2$  положительна и изотропность достигается на оси симметрии. Нетрудно показать, что в потоке между двумя бесконечно ши-

роками наклонными под углом  $\alpha$  к оси  $x_3$  пластинами нормальные напряжения Рейнольдса вдоль  $x_2, x_3$  связаны с нормальными напряжениями вдоль стенки  $\rho \bar{v}'^2_{\Pi}$  и по нормали к ней  $\rho \bar{v}'^2_{\text{пр}}$  соотношениями:

$$\rho \bar{v}'^2_2 = \rho \bar{v}'^2_{\Pi} \sin \alpha + \rho \bar{v}'^2_{\text{пр}} \cos \alpha;$$

$$\rho \bar{v}'^2_3 = \rho \bar{v}'^2_{\Pi} \cos \alpha + \rho \bar{v}'^2_{\text{пр}} \sin \alpha$$

и

$$\rho (\bar{v}'^2_3 - \bar{v}'^2_2) = \rho \bar{v}'^2_{\Pi} (\cos \alpha - \sin \alpha) + \rho \bar{v}'^2_{\text{пр}} (\sin \alpha - \cos \alpha). \quad (3)$$

Аналогичные выражения могут быть получены при рассмотрении напряжений вдоль главных осей эллипсоида деформаций.

Из (3) следуют предельные переходы: у горизонтальной стенки ( $\alpha = 0$ )  $\bar{v}'^2_3 - \bar{v}'^2_2 > 0$ , вертикальной — ( $\alpha = 90^\circ$ )  $\bar{v}'^2_3 - \bar{v}'^2_2 < 0$ . Течение вдоль двугранных углов формируется под влиянием двух пересекающихся плоскостей и является трехмерным. Поэтому соотношение (3) можно использовать лишь для предварительных оценок. В прямоугольных трубах на биссектрисе угла демпфирующее влияние границ на поперечные пульсации одинаково (это следует также из (3)), поэтому она разделяет две области с различными по знаку значениями  $\bar{v}'^2_3 - \bar{v}'^2_2$ , т.е. независимые области поперечных течений с различным направлением циркуляции: у вертикальной стенки — против хода часовой стрелки, у горизонтальной — по ходу [3]. Нетрудно показать, что на биссектрисе угла в трапециевидальной трубе равенство нормальных напряжений Рейнольдса не выполняется ( $\bar{v}'^2_3 - \bar{v}'^2_2 > 0$ ) и положение линии, разделяющей независимые области поперечной циркуляции, зависит от соотношения поперечных размеров и угла наклона боковых стенок [10]. В области у боковых откосов (не слишком близко к углу) с уменьшением  $\alpha$  демпфирующее влияние границы на вертикальные пульсации возрастает, а на горизонтальные — уменьшается. Из (3) следует, что при  $\alpha = 45^\circ$  оно приблизительно одинаково — в этой области должна иметь место зона с близкими к нулю значениями  $(\bar{v}'^2_3 - \bar{v}'^2_2)$ . Дальнейшее уменьшение угла наклона, очевидно, приведет к положительной разности напряжений Рейнольдса во всем сечении трубы с приуменьшенными ее абсолютными значениями в области боковых откосов.

В открытых потоках турбулентность формируется как под воздействием жестких границ, так и свободной поверхности. Хотя о влиянии последней на характеристики турбулентности известно сравнительно мало, она, по-видимому, действует аналогично жестким границам [1, 11, 12]. Однако ограничивающее действие свободной поверхности значительно слабее, чем жесткой стенки, и пульсирующий объем, получивший вертикальное движение  $\bar{v}'_2$ , как бы "выскакивает" за границу. Поэтому свободная поверхность имеет неустойчивое, пульсирующее положение и представляет собой некоторую область вихревых образований воды и спутного воздуха с перемежающимся характером движения. Экспериментальные данные показывают, что у свободной границы

увеличиваются  $\sqrt{\bar{v}_1'^2}$ ,  $\sqrt{\bar{v}_3'^2}$ , продукция и диссипация кинетической энергии турбулентности, уменьшается  $\sqrt{\bar{v}_2'^2}$ , турбулентная вязкость [1, 11, 12].

Таким образом, свободная поверхность усиливает анизотропность турбулентности даже в отсутствие внешних воздействий (например, ветровых), и, следовательно, ее нельзя отождествлять с осью симметрии закрытого потока. Именно ее влияние обуславливает увеличение размеров и интенсивности области с положительными значениями разности нормальных напряжений Рейнольдса [13], что приводит соответственно к изменению характера поперечных течений — в прямоугольных открытых руслах размер и интенсивность вихря у свободной границы возрастают и биссектриса угла уже не играет, как в трубах, столь определяющую роль [4, 12, 13].

Полученные данные о распределении  $(\bar{v}_3'^2 - \bar{v}_2'^2)/v_*^2$  в продольно-однородных открытых потоках трапецидальной формы (см. рис. 1) подтверждают вышеизложенные выводы. В частности, в большей части сечения значения  $(\bar{v}_3'^2 - \bar{v}_2'^2)/v_*^2$  положительные и лишь в области над боковым откосом имеет место зона небольших (близких к нулю в пределах доверительного интервала экспериментальных данных) отрицательных величин. Сложное взаимодействие свободной, горизонтальной и наклонной границ вызывает появле-

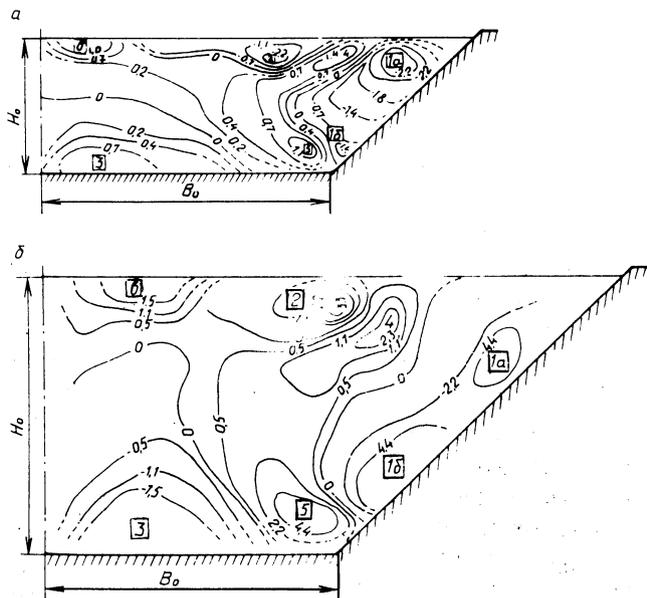


Рис. 2. Распределение основного члена генерации поперечных течений

$$\frac{R^2}{v_*^2} \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial x_3} x$$

$\times (\bar{v}_3'^2 - \bar{v}_2'^2)$  в открытом трапецидальном русле с  $B_0 = 0,075$  м:

$a - H_0 = 0,036$  м;  $b - H_0 = 0,075$  м.

ние положительных значений разности нормальных напряжений Рейнольдса в придонной части откоса. Свободная поверхность увеличивает  $(\bar{v}'_3 - \bar{v}'_2)/v_*^2$ , а также  $\bar{v}'_1/v_*^2$ , подтверждая тем самым предположение о демпфирующем ее влиянии на вертикальные пульсации, однако более слабо, чем жесткая стенка. Минимальные, близкие к нулю значения разности нормальных напряжений Рейнольдса находятся на расстоянии  $(0,1...0,3)H_0$  от поверхности, что удовлетворительно согласуется с данными в прямоугольных руслах [13].

Вычисление экспериментального распределения основного члена генерации поперечных течений  $P_7$  вызывает определенные трудности из-за необходимости дифференцирования опытных кривых  $(\bar{v}'_3 - \bar{v}'_2)$ , имеющих некоторый разброс. Поэтому, как правило, ограничиваются анализом распределения  $(\bar{v}'_3 - \bar{v}'_2)$  и по сгущению линий равных значений этой величины делают выводы о характере изменения источникового слагаемого [10]. Привлечение аппарата сглаживающих сплайнов позволило (для условий опытов автора) получить численные значения последнего (см. рис. 2).

Распределение по сечению основного члена генерации поперечных течений  $P_7$  в открытых продольно-однородных потоках трапецеидальной формы с  $m = 1,0$  имеет более сложный характер, чем в прямоугольных трубах и открытых руслах. Если в первом случае существуют две располагающиеся в биссектрисе области генерации завихренности [3], в прямоугольных руслах — три, причем области у свободной границы и вертикальной стенки имеют одинаковые знаки [12, 13], то в полусечении трапецеидального канала имеют место

шесть областей  $\frac{R^2}{v_*^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial x_3} (\bar{v}'_3 - \bar{v}'_2)$  с разными знаками ( см.

рис. 2), взаимодействие которых определяет трехмерную кинематическую структуру течения. Основные источники поперечных течений (1, 2, 4, 5) располагаются у бокового откоса, где вследствие сложного характера взаимодействия свободной, наклонной и горизонтальной границ наблюдается наибольшее сгущение линий равных значений  $(\bar{v}'_3 - \bar{v}'_2)/v_*^2$ . Из ранее выполненного анализа следует, что их расположение и интенсивности определяются соотношением поперечных размеров потока и величиной заложения откосов. Однако у боковых границ русла источники поперечных течений существуют при любых значениях  $B_1/H_0$  и  $m$  ( $B_1$  — полуширина русла поверху,  $H_0$  — глубина над горизонтальным дном,  $m$  — коэффициент заложения откосов), поскольку именно здесь наблюдается наибольшая в сечении анизотропность турбулентных характеристик. При больших отношениях  $B_1/H_0$  ( $> 5$ ) распределение последних в средней части русла аналогично плоскому потоку и, следовательно, источники завихренности в этой области отсутствуют. Однако это не означает отсутствие поперечной циркуляции. Экспериментальные данные показывают, что при больших отношениях  $B_1/H_0$  в средней части потока существуют вихри поперечных течений, индуцированные основными вихрями у откосов [14]. В наших исследованиях  $B_1/H_0$  было относительно небольшим ( $\leq 3$ ), поэтому

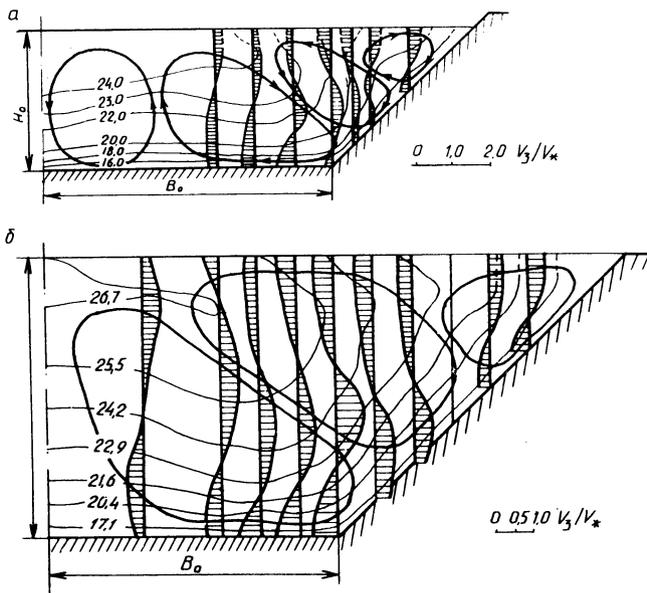


Рис. 3. Экспериментальные план изотех  $\bar{v}_1/v_*$  и эпюры поперечных осредненных скоростей  $\bar{v}_3/v_*$ :

$a - H_0 = 0,036$  м;  $b - H_0 = 0,075$  м;  $\rightarrow$  — направление поперечных течений.

у оси симметрии имеют место источники завихренности 3,6 небольшой интенсивности (см. рис. 1). Отметим, что аналогично течениям в прямоугольных и трапецидальных трубах в зоне сопряжения наклонной и горизонтальной стенок трапецидального канала вдоль линии, параллельной биссектрисе угла, располагаются области генерации завихренности 1б, 5.

Экспериментальное распределение  $\frac{R^2}{v_*^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial x_3} (\bar{v}_3'^2 - \bar{v}_2'^2)$  (см. рис.

2) позволяет прогнозировать качественную картину поперечной циркуляции. Если в уравнении (2) пренебречь конвективным членом  $P_3$ , не способным ни создать, ни уничтожить поперечные течения, и ввести функцию тока, то получим уравнение в частных производных четвертого порядка, аналогичное уравнению прогиба упругой пластины. Причем величина и знак свободного члена  $P_7$  характеризуют интенсивность и направление поперечной циркуляции (величину и направление прогиба пластины).

Аналогом физического процесса ее формирования является процесс прогиба упругой пластины с жестко закрепленными границами [15]. Тогда нетрудно показать, что области 1, 2 с отрицательным знаком источникового члена создают два вихря циркуляции с вращением против хода часовой стрелки, которые при определенных условиях объединяются, подавляя циркуляцию противоположного знака в области 4 (это следует из условия непрерывности прогиба пластины), и формируют первый основной вихрь поперечных течений

Парный с ним основной вихрь с циркуляцией по ходу часовой стрелки соз-

дает область 5 с положительным значением  $\frac{R^2}{v_*^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial x_3} (\bar{v}_3'^2 - \bar{v}_2'^2)$ .

Области 3 и 6 формируют поперечные течения небольшой интенсивности у оси симметрии, подавляемые при определенных значениях  $B_1/H_0$  основными вихрями. В прирусной части измерения турбулентных характеристик не выполнялись, но по аналогии с циркуляцией в треугольном канале можно предположить существование вихря с вращением по ходу часовой стрелки.

Таким образом, в полусечении открытого трапецидального канала с  $m = 1$  имеют место пять винтов поперечных течений, причем их размеры и интенсивности определяются величиной  $\frac{R^2}{v_*^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial x_3} (\bar{v}_3'^2 - \bar{v}_2'^2)$ . Прогнозируемый характер поперечных течений хорошо согласуется с непосредственными измерениями [8], частично представленными на рис. 3.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Р о д и В. Модели турбулентности окружающей среды // Методы расчета турбулентных течений. — М., 1984. — С. 227–322.
2. E i n s t e i n H.A., L i H. Secondary currents in straight channels // Trans Amer. Geoph. Unio, 1958. — Vol. 36. — N 6. — Pp. 1085–1088.
3. B r u n d r e t t E., V a i n e s W.D. The production and diffusion of vorticity in duct flow // J. Fluid. Mech., 1964. — Vol. 19. — Pp. 375–394.
4. Р о г у н о в и ч В.П. К экспериментальному изучению распределения осредненных скоростей в двухпараметрических прямолинейных потоках // Использование водных ресурсов. — Мн., 1969. — С. 100–196.
5. В а с и л ь е в О.Ф. Проблемы гидродинамики больших каналов // Динамика сплошной среды. Нестационарные задачи механики сплошной среды. — Новосибирск, 1985. — Вып. 70. — С. 63–71.
6. О с а к а Х., Я м а д а Х., Н а к а м у р а И. Трехмерная структура турбулентного следа за крестообразно пересекающимися круговыми цилиндрами // Трехмерные турбулентные пограничные слои. — М., 1985. — С. 216–227.
7. P e r k i n s H.J. The formation of streamwise vorticity in turbulent flow // J. Fluid. Mech. — Vol. 44. — Pp. 721–740.
8. Ш н и п о в Ф.Д. Экспериментальные исследования трехмерного поля осредненных скоростей и турбулентных напряжений в прямолинейных потоках трапецидального сечения // Гидравлика открытых русл. Сб. науч. тр. ЦНИИКИВР. — М., 1984. — С. 45–55.
9. М о н и н А.С., Я г л о м А.М. Статистическая гидромеханика. — М., 1965. — Ч. 1. — 640 с.
10. R o d e t E. Etude de L'ecoulement d'un Tunnel Prismaticque de Section Trapezoidale // Publications Scientifiques et Techniques du Ministere de L'air. — 1960. — N 369.
11. Н и к и т и н И.К. Особенности структуры турбулентного потока у его свободной поверхности // Гидротехника и гидромеханика. — Киев, 1964. — С. 3–6.
12. N e z u I., N a k a g a w a H. Investigation an three-dimensional turbulent structure in uniform open channel and closed duct flows // Добоку rakkaй romбунею, Proc. Jap. Soc. Civ. Eng., 1986. — N 369. — Pp. 89–98.
13. Т о м и н а г а А., Е з а к и К. An ex̄perimental study on three-dimensional turbulent structure in a rectangular open channel flow. // Добоку rakkaй romбунею, Proc. Jap. Civ. Eng., 1985. — N 357. — Pp. 81–88.
14. Б о г д а н о в и ч М.И., О с и п о в и ч А.А., Ц а ц у к Г.С., Ш н и п о в Ф.Д. Экспериментальные исследования полей осредненных скоростей в земляных каналах // Водное хоз-во и гидротехн. стр-во. — Мн., 1984. — Вып. 13. — С. 62–65.
15. C i r a y C. On secondary currents // IANR, 1967. — Pp. 408–413.

### К ОПРЕДЕЛЕНИЮ КОЭФФИЦИЕНТА ШЕРОХОВАТОСТИ ПРИ РАСЧЕТЕ РАЗМЫВА ГРУНТОВЫХ ВСТАВОК

В соответствии с разработанной ранее схемой [1, 2] размыв грунтовой вставки при переливе происходит в две стадии: на первой размывается низовая упорная призма при постоянной отметке верхнего бьефа; на второй — интенсивно снижается гребень под воздействием переливающегося потока. Уравнения деформации в окончательном варианте имеют следующий вид [2]:

для первой стадии

$$\frac{dM}{dt} = \frac{A i^{1,2} (d)^{0,8}}{n^{2,4}} m^{1,6} (z - y)^{2,4}, \quad (1)$$

для второй

$$\frac{dy}{dt} = -\sigma m^{0,43} \frac{B}{\rho_0} (z - y)^{0,6} \frac{dh}{dx}, \quad (2)$$

где  $M$  — масса размываемого грунта, кг;  $t$  — время, с;  $A$  — опытный безразмерный коэффициент (для песчаных грунтов  $A = 0,153$ );  $i$  — уклон низового откоса;  $n$  — коэффициент шероховатости размываемого грунта;  $m$  — коэффициент расхода;  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\sigma$  — коэффициент подтопления;  $z$  — уровень верхнего бьефа, м;  $y$  — отметка гребня вставки, м;

$$B = 6,77 (1 + \varphi) dg^{2,17} \left( \frac{5,64n \sqrt{2g}}{\varphi w} \right)^{3,33}, \quad (3)$$

$\rho_0$  — плотность грунта вставки, кг/м<sup>3</sup>;  $h$  — глубина потока на гребне вставки, м;  $x$  — продольная координата, м;  $d$  — диаметр частиц размываемого грунта, м;  $\varphi$  — параметр турбулентности [3];  $w$  — гидравлическая крупность частиц размываемого грунта, м/с.

Изменение уровня верхнего бьефа при истечении через размываемую вставку

$$\frac{dz}{dt} = \frac{Q_0 - mb\sqrt{2g} (z - y)^{1,5}}{F}, \quad (4)$$

где  $Q_0$  — приточность в верхнем бьефе, м<sup>3</sup>/с;  $F$  — площадь зеркала воды в верхнем бьефе, м<sup>2</sup>;  $b$  — ширина водослива, м.

Совместное решение уравнений (1)–(4) позволяет получить графики изменения во времени значений уровня верхнего бьефа, расхода воды через вставку и отметки гребня вставки. Однако возникает вопрос о величине коэффициента шероховатости размываемого грунта. Приводим ряд зависимостей по определению данного коэффициента применительно к размываемым песчаным грунтам, записанных в несколько преобразованном виде:

по формуле В.Н. Гончарова [3], при  $h/0,5d$  от 10 до 1000

$$n = 0,0461d^{0,167}; \quad (5)$$

при  $h/0,5d$  от 1000 до 4500

$$n = 0,0324d^{0,125}; \quad (6)$$

по формуле Г.С. Чекулаева [4],

$$n = 0,0420d^{0,109}; \quad (7)$$

по формуле А.В. Караушева [5],

$$n = 0,03d^{0,167}; \quad (8)$$

по формуле Штриклера [5],

$$n = 0,096d^{0,167}. \quad (9)$$

С целью установления возможности применения той или иной зависимости для определения коэффициента шероховатости при расчете размыва грунтовых вставок были решены уравнения (1)...(4), в которых коэффициент  $n$  рассчитывался поочередно по одной из формул (5)...(9). Результаты сравнивались с экспериментальными данными. Критерием оценки сходимости для первой стадии является время размыва низовой призмы, для второй – интенсивность снижения гребня вставки. Оба параметра выражаются графиком  $y = f(t)$ ; на первой стадии  $y = \text{const}$ . Начало снижения отметки гребня соответствует времени размыва низовой призмы (рис. 1).

Следует отметить, что формулы В.Н. Гончарова (5) и (6), несмотря на то что рекомендуются для различных соотношений  $n/d$ , в условиях размыва вставки дают близко совпадающие результаты. Поэтому в дальнейшем формула (5) не рассматривается.

Опыт (см. рис. 1) проведен на русловой площадке: высота вставки  $p = 0,8$  м; ширина по гребню  $S = 0,7$  м; ширина водослива  $b = 1,0$  м; заложение откосов 1:2,0; площадь зеркала воды в верхнем бьефе  $F = 20$  м<sup>2</sup>; грунт тела вставки – песок крупностью  $d = 0,1...1,0$  мм, средний диаметр частиц  $d_{50} = 0,3$  мм; приточность в верхнем бьефе  $Q_0 = 100$  л/с.

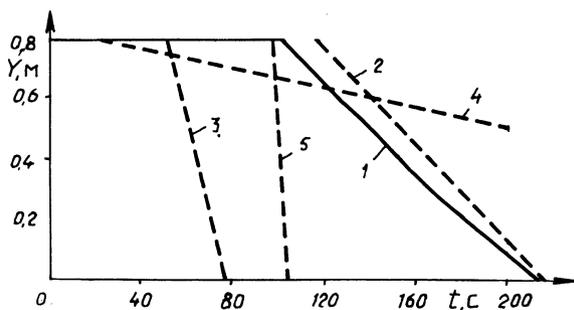


Рис. 1. Графики изменения  $y = f(t)$ :

1 – опытные данные; 2 – расчетные данные, полученные с использованием формулы В.Н. Гончарова; 3 – Г.С. Чекулаева; 4 – А.В. Караушева; 5 – Штриклера,

В соответствии с изложенными рекомендациями [5] коэффициент шероховатости определялся по диаметру  $d_{50}$ , где  $d_{50}$  — диаметр, мельче которого в данной смеси содержится 50 % частиц.

Из рис. 1 следует, что хорошее совпадение с опытными данными дает результат, рассчитанный по формуле (6). Такая же картина наблюдается и в других 30 опытах, которые были проведены на русловой площадке и в гидравлическом лотке на моделях из песчаных грунтов с диаметром частиц  $d \leq 0,5$  мм. Высота моделей — 0,4...1,1 м. Расхождение опытных и расчетных данных при применении формулы (6) составляет до 10...15 % относительно продолжительности второй стадии.

Для песчаных грунтов  $d > 0,5$  мм степень совпадения опытных и расчетных данных для первой стадии лучше при применении формулы (7). Вероятно, это объясняется некоторыми различиями в характере транспорта твердого стока — более крупные частицы тяготеют к влекомому движению. Кроме того, коэффициент шероховатости, вероятно, нельзя считать постоянным. По некоторым данным [4] он зависит не только от физической шероховатости, определяемой в данном случае крупностью частиц грунта, но и от состояния потока (мутность, глубина, характер движения твердого стока и др.). В рассматриваемом случае коэффициент шероховатости выражается более сложной зависимостью, учитывающей характеристики потока. Нахождение ее составит предмет дальнейших исследований. Полученный же в данной работе результат можно использовать в настоящее время с достаточной для практики точностью (см. выше).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Богославчик П.М., Филиппович И.В. К расчету размыва однородной плотины из песчаных грунтов при переливе через гребень / Изв. вузов СССР. Сер. Энергетика, 1983. — № 2. — С. 100–105.
2. Богославчик П.М. Резервные водосбросы с размываемыми грунтовыми вставками на малых водохранилищах и прудах гидромелиоративных систем. Автореферат дис. канд. техн. наук. Мн., 1986. — 22 с.
3. Гончаров В.Н. Динамика русловых потоков. — Л., 1962. — 373 с.
4. Лапшенков В.С. Прогнозирование русловых деформаций в бьефах речных гидроузлов. — Л., 1979. — 239 с.
5. Караушев А.В. Теория и методы расчета речных наносов. — Л., 1977. — 272 с.

УДК 627.8.034+627.18

В.Е. ЛЕВКЕВИЧ

### ВЛИЯНИЕ ГРУНТОВЫХ ВОД НА УСТОЙЧИВОСТЬ АБРАЗИОННЫХ БЕРЕГОВ ВОДОХРАНИЛИЩ БЕЛОРУССИИ

Наряду со многими факторами, уменьшающими устойчивость берегов водохранилищ, прудов, откосов дамб и т.д., определенное влияние может оказывать режим грунтовых вод в береговой зоне водоемов [1, 2].

В связи с тем что данный вопрос в литературе освещен недостаточно, нами на водохранилищах республики были проведены исследования с целью

оценки воздействия грунтовых вод на устойчивость берегов и определения ширины зоны влияния водных объектов на подтопление территорий.

В период 1977–1986 гг. было проведено несколько экспедиций, в результате которых получены данные о положении уровня грунтовых вод в береговой зоне водохранилищ Заславское, Дрозды, Криницы, Волковичи, Вяча, Петровичское, Смолевичское, Солигорское, Локтыши, Млынокское, Бобруйковское и др. (всего более 30 объектов). Для оценки режима подземных вод в береговой зоне водохранилищ производился выбор характерных (в морфологическом и геологическом смысле) участков, на которых выполнялась разбивка створов с отрывкой шурфов (глубина до 2 м) или бурением скважин (глубина 7,5...8 м) с последующей регистрацией положения водоносного горизонта и состава пород.

Обследования проводились на водохранилищах севера и северо-запада республики, берега которых представлены суглинками, супесями, песками, мелкообломочным материалом; в центральном районе с распространением моренных отложений и в районе Белорусского Полесья с преобладанием аллювиальных отложений. Детальные исследования по оценке влияния подземных вод на устойчивость склонов выполнялись на водохранилище Волковичи в период его полного опорожнения (1983 г.). Наблюдения осуществлялись по всему периметру водохранилища со съемкой ситуации на берегах, подвергающихся переработке, в частности на левом берегу (участок 2) по контрольным поперечникам с порядковыми номерами 1...11. Длина обследованного участка – 2,5 км. Берег сложен песчаными и супесчаными отложениями, в некоторых местах с прослоями гравия. Высота абразионного уступа – 2,6...16,0 м, а ширина подводной части береговой отмели – 3,0...5,0 м (табл. 1).

Грунт абразионного берега по условиям фильтрации может находиться в различных состояниях, которым соответствуют четыре зоны [3]:

первая – подводная часть склона, в которой фильтрационный поток направлен перпендикулярно к поверхности отмели. При высачивании воды в пределах подводной части отмели наблюдается (при наличии несвязных грунтов) фильтрационное взвешивание частиц;

вторая – охватывает участок высачивания, расположенный над урезом на высоте от 0,10...0,15 м (водохранилище Криницы) до 0,5...1,0 м (водохранилище Бобруйковское). Верхняя линия тока – кривая депрессии, выходит на откос под минимальным углом, что вызывает также взвешивание частиц грунта с последующим их выносом;

третья – соответствует участку капиллярного насыщения водой грунта; четвертая – характеризуется естественной влажностью грунта.

Потеря общей устойчивости берегового склона наиболее часто регистрировалась в первых двух зонах, где совместное воздействие волнового и грунтового потоков вызывает развитие абразии склона, его суффозию, разжижение и оплывание грунта. Классификация гидродинамических условий в береговой зоне водохранилищ показала, что возможны два случая: при фильтрации в водохранилище (рис. 1, а) или же из водоема (рис. 1, б). Невыгодным является первый случай, когда уровень грунтовых вод превышает уровень воды в водохранилище и кривая депрессии имеет уклон в сторону водоема. Величина градиентов зависит от геологических и гидрологических условий и изменяется от 0,0013 до 0,13 (табл. 2). Если градиент напора в несвяз-

Характеристики абразионных берегов водохранилища Волковичи  
(участок 2)

| Номер створа | Грунт                  | Переработка        |  | Высота обрыва $H_6$ , м | Ширина откоса $B_{\text{отк}}$ , м |
|--------------|------------------------|--------------------|--|-------------------------|------------------------------------|
|              |                        | линейная $S_r$ , м | объемная $Q_r$ , м <sup>3</sup> /пог.м |                         |                                    |
| 1            | Мелкий песок*          | 23,5               | 38,0                                   | 16,0                    | 3,0                                |
| 2            | То же                  | 20,5               | 31,5                                   | 13,0                    | 4,3                                |
| 3            | ”                      | 20,0               | 19,6                                   | 9,2                     | 4,0                                |
| 4            | Средний песок*, морена | 7,5                | 13,5                                   | 5,3                     | 3,5                                |
| 5            | Мелкий песок*, морена  | 22,0               | 37,5                                   | 12,0                    | 3,0                                |
| 6            | То же                  | 29,0               | 40,3                                   | 15,5                    | 5,0                                |
| 7            | Средний песок          | 14,0               | 22,5                                   | 5,0                     | 5,0                                |
| 8            | То же                  | 6,0                | 6,3                                    | 2,6                     | 3,5                                |
| 9            | Мелкий песок           | 14,0               | 21,0                                   | 3,6                     | 3,5                                |
| 10           | То же                  | 18,0               | 15,3                                   | 10,0                    | 3,5                                |
| 11           | ”                      | 18,0               | 22,5                                   | 9,5                     | 3,0                                |

\*Имеются включения мелкого гравия, а также глинистые прослои.

ных грунтах  $I_0$  в зоне выхода фильтрационного потока превышает  $I_{\text{кр}}$  [4] —

$$I_0 > I_{\text{кр}} \geq 0,3, \quad (1)$$

наблюдается суффозионный вынос грунтов из берегового склона. При значительной слоистости грунтов, чередовании песчаных несвязных отложений с песчано-гравийными включениями при градиенте фильтрационного потока

$$I_0 > I_{\text{кр}} \geq 1,3 \quad (2)$$

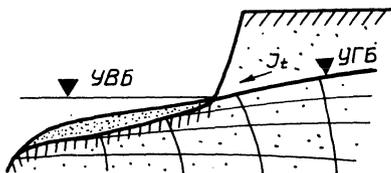
происходит контактный размыв с выносом мелкозернистого материала.

На режим грунтовых вод в береговой зоне водохранилищ наряду с составом водоносных грунтов значительное влияние оказывает характер и скорость сработки уровней в водоеме [5].

Понижение уровня верхнего бьефа в водохранилище относительно нормального подпорного уровня (НПУ) более чем на 2,0 м приводит к тому, что в береговых массивах происходят резкие изменения в гидродинамическом режиме.

При быстрой сработке водохранилища Волковичи выход кривой депрессии грунтовых вод на поверхность склона оказался выше или в некоторых случаях на линии уреза (рис. 2, а). В результате фильтрации воды из откоса создается гидродинамическое давление, равное при крутизине откосов 30° — 0,5 г/м<sup>2</sup> [1]. На некоторых створах (9, 10, 11) в результате увеличения скоростей фильтрационного потока это привело к суффозионным выносам

а



б

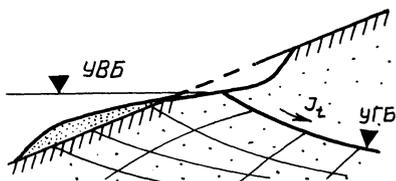


Рис. 1. Классификация гидродинамических условий в береговой зоне водохранилищ: а – подпор грунтовых вод; б – фильтрация из водохранилища.

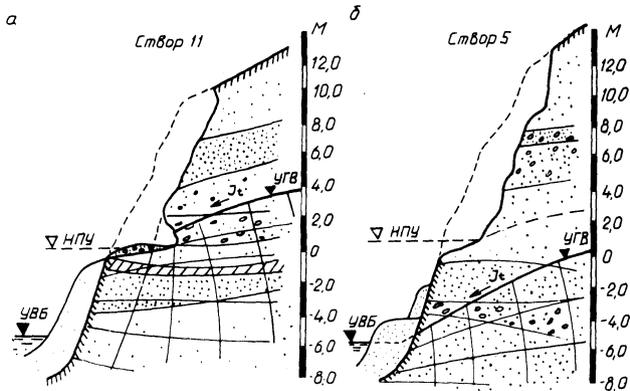


Рис. 2. Разрушение береговой отмели под действием грунтовых вод на водохранилище Волковичи:

а – створ 11, суффозионный вынос грунта; б – створ 5, оползание аккумулятивной части отмели.

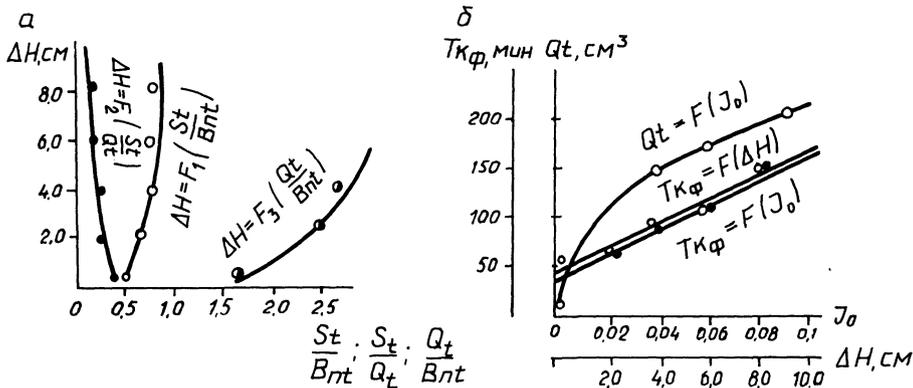


Рис. 3. Влияние грунтовых вод на устойчивость берегов водохранилищ:

а – графики вида:  $\Delta H = F_1 \left( \frac{St}{Bnt} \right)$ ;  $\Delta H = F_2 \left( \frac{St}{Qt} \right)$ ;  $\Delta H = F_3 \left( \frac{Qt}{Bnt} \right)$ ; б – графики ви-

да:  $T_{кф} = F(\Delta H)$ ;  $Q_t = F(J_0)$ ;  $T_{кф} = F(J_0)$ .

Т а б л и ц а 2

## Характеристики берегов обследованных водохранилищ

| Водохранилище    | Вид регулирования | Амплитуда колебаний уровней в безливневый период $A_{\text{бл}}$ , м | Берег, тип грунта     | Схема фильтрации | Градиент фильтрационного потока $I_0$ |
|------------------|-------------------|--|-----------------------|------------------|---------------------------------------|
| Заславское       | Сезонное          | 1,20   | Правый, крупный песок | I                | 0,008                                 |
| Криницы          | То же             | 0,20   | Левый, крупный песок  | I                | 0,007                                 |
| Волковичи        | ”                 | 0,20   | Левый, средний песок  | I                | 0,08                                  |
| Петровицкое      | ”                 | 0,70   | Левый, мелкий песок   | I                | 0,09                                  |
| Солигорское      | Многолетнее       | 1,0  | Правый, мелкий песок  | I                | 0,0028                                |
| Краснослободское | То же             | 1,0  | Левый, мелкий песок   | I                | 0,0025                                |
| Локтыши          | Сезонное          | 1,0  | Правый, мелкий песок  | II               | 0,0013                                |
| Меркуловичи      | То же             | 0,40   | То же                 | I                | 0,03                                  |
| Бобруйковское    | Глубокое сезонное | 0,30   | Левый, мелкий песок   | I                | 0,05                                  |
| Млынокское       | То же             | 0,20   | Правый, мелкий песок  | I                | 0,03                                  |
| Лешня            | Сезонное          | 0,40   | То же                 | I                | 0,05                                  |
| Загатье          | То же             | 0,50   | ”                     | II               | 0,225                                 |
| Красное озеро    | ”                 | 0,40   | Левый, мелкий песок   | II               | 0,07                                  |
| Головчицкое      | ”                 | 0,40   | То же                 | II               | 0,02                                  |
| Коммунар         | ”                 | 0,50   | То же                 | II               | 0,13                                  |
|                  |                   |  | Правый, средний песок |                  |                                       |

Т а б л и ц а 3

## Особенности подтопления побережий малых водохранилищ

| Группа водохранилища по колебанию уровней в ВБ в безливневый период. $A_{\text{бл}}$ , м | Полный объем, млн м <sup>3</sup> | Площадь, км <sup>2</sup> | Протяженность подтопленных берегов, % [10] |
|--|----------------------------------|--------------------------|--|
| Группа I, $A_{\text{бл}} \geq 0,5$ м   | 20–60                            | 10–40                    | 30–50                                      |
| Группа II, $A_{\text{бл}} < 0,5$ м   | до 20                            | до 10                    | до 20                                      |

грунта в основании абразионного берега. Аналогичная картина наблюдалась на водохранилище Криницы. В случае высокого положения водопора водоносный горизонт не испытывал подпора со стороны водохранилища и поэтому по склону наблюдался свободный выход грунтовых вод.

Данные съемок, выполненных на контрольных створах до понижения уровня в водохранилище, а затем их сравнение с материалами, полученными после опорожнения, позволили установить, что разрушение берегового склона происходит как в зоне выхода депрессионной кривой на поверхность отмели, так и ниже по склону. Так, на створах 1...5 и 8 выход грунтовых вод в аккумулятивной части отмели привел к тому, что при резкой сработке водохранилища произошло оплывание аккумулярованного в береговой зоне материала абразии, что вызвало уменьшение ширины отмели (рис. 2, б), а в ряде случаев — и ее полное разрушение.

Натурные и лабораторные исследования [2] показали — с увеличением уровня грунтовых вод (УГВ) в прибрежной зоне водохранилища возрастает как объем  $Q_t$ , так и величина линейной переработки берега  $S_t$ . Причем в условиях размываемой модели откоса, сложенной песками средней крупности ( $d_{50} = 0,35$  мм), с изменением УГВ наблюдается изменение соотношения морфометрических элементов профиля ( $S_t/B_{пт}$ ,  $S_t/Q_t$ ,  $Q_t/B_{пт}$ ,  $B_{пт}$  — ширина отмели), рис. 3, а. Увеличение размыва берегового склона при наличии перепада уровней сказывается на характере развития процесса переработки во времени (рис. 3, б). В частности, время выработки профиля равновесия  $T_{кф}$  значительно возрастает с увеличением градиента напора  $I_0$ , причем объем переработки увеличивается в 3,8 раза [2]. Следует также отметить, что на  $T_{кф}$  оказывают влияние и начальные уклоны кривой депрессии:

$$T_{кф} = F(I_0); \quad (3)$$

$$T_{кф} = 0,133I_0. \quad (4)$$

Данные натурных обследований также показывают, что увеличение сроков переработки и стабилизации абразионных берегов водохранилищ зависит как от волнового режима, так и режима сработки и наполнения водохранилища, вызывающего в свою очередь разрушение того равновесия в береговой зоне, которое складывается при стабилизации процесса. Пример опорожнения водохранилища Волковичи показал, что и на других водных объектах республики также недопустима быстрая сработка объема водоема, что, к сожалению, не принимается во внимание службой эксплуатации. Ибо, как показывают обследования других водоемов (Петровичское, Млыновское, Бобруйковское, Вяча), процесс переработки после наполнения начнет проявляться вновь с повышенной интенсивностью.

При оценке общей устойчивости береговых склонов водохранилищ необходимо прежде всего охарактеризовать режим грунтовых вод и распространение подпора в прибрежной зоне водоема. В условиях водохранилищ Белоруссии величина подпора зависит от грунтов, складывающих побережья. Так, на севере и в центральной части республики ширина зоны влияния водохранилищ

на уровень грунтовых вод ( $B_{\text{УГВ}}$ ), по данным съемок, а также анализу косвенных признаков (подтопление, заболачивание и т.д.), составляет 0,2...1,5 км. В районе Полесья – юга республики – зона влияния водоемов на уровень грунтовых вод 1,5...3,0 км [6]. Ширина зоны подпора для этих условий

$$B_{\text{УГВ}} = \sqrt{\frac{2\pi k_{\Phi} H_0 T_{0,t}}{\mu}}, \quad (5)$$

где  $\pi = 3,14$ ;  $k_{\Phi}$  – коэффициент фильтрации грунта, м/сут.

Если береговой склон представлен грунтами с количеством слоев не более 10, определяется средневзвешенный коэффициент фильтрации [7], значение которого затем подставляется в (5):

$$\bar{k} = \frac{k_{\Phi 1} m_1 + k_{\Phi 2} m_2 + \dots + k_{\Phi n} m_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n}. \quad (6)$$

где  $k_i$ ,  $m_i$  – коэффициенты фильтрации и мощности  $i$ -го слоя;  $H_0$  – положение уровня грунтовых вод в незарегулированном источнике, м;  $T_{0,t}$  – время от начала повышения уровня, сут;  $\mu$  – коэффициент водоотдачи грунта.

Материалы наблюдений за колебанием УГВ на Заславском и Краснослободском водохранилищах, а также Локтыши и Красная Площадь показали, что в прибрежной зоне изменение уровней в водоеме (до 0,5...1,5 м) вызывает колебания УГВ асинхронно в три-четыре дня. Таким образом, практически одновременное изменение уровней в водохранилище и в береговом склоне в незначительных пределах указывает на установившийся характер фильтрации на территориях, примыкающих к малым водохранилищам. В связи с этим величина напора  $H_{0,t}$  в любой точке определяется по формулам П.Г. Каменского для условий установившейся фильтрации [8].

В результате повышения УГВ в прибрежной зоне водоемов происходит изменение природных условий, режима образования почвогрунтов, свойств почв, состава травянистой и древесной растительности, микроклимата и т.д. В зависимости от характера регулирования и режима колебания уровней в водоеме [9] по площади подтопления выделяются две группы водохранилищ (табл. 3). Площадь подтопления на водохранилищах первой группы составляет до 30 % от площади водоема (Заславское, Краснослободское и др.), у водоемов второй группы – 5...10 % (Осиповичское, Волковичи, Млынокское, Бобруйковское и др.).

Таким образом, вопрос влияния грунтовых вод на устойчивость берегов водохранилищ не нашел достаточно полного отражения в современных исследованиях. Недостаток информации указывает на необходимость дальнейшего изучения комплексного влияния волнения и фильтрационных сил на устойчивость берегов. Одним из путей исследований несомненно будут натурные обследования конкретных объектов с возможно более широким спектром геологических, морфологических и гидрогеологических условий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Качугин Е.Г. Геологическое изучение динамики берегов водохранилищ. – М., 1975. – С. 147.
2. Левкевич Е.М. Лабораторные исследования реформирования

неукрепленных откосов земляных плотин под действием волн и фильтрационных сил / Известия высших учебных заведений. — Мн., 1971. — Вып. 8. — С. 98–102. 3. С о б о л е в с к и й Ю.А. Устройство откосов мелиоративных каналов. — Мн., 1965. — С. 212. 4. Гидротехнические сооружения. Справочник проектировщика. — М., 1983. — С. 543. 5. А в а к я н А.Б., Ш а р а п о в В.А. Водохранилища гидроэлектростанций СССР. — М., 1968. — С. 384. 6. Б у л а в к о А.Г., Я н к о в с к и й К.Ф. Определение ширины зоны влияния мелиоративной системы на горизонты грунтовых вод / Вопросы водохозяйственного строительства. — Мн., 1970. — С. 13–20. 7. К р у г л о в Г.Г. Методические указания к фильтрационным расчетам несовершенной придамбовой дрены. — Пинск, 1979. — С. 40. 8. Г а р м о н о в И.В., К о л о т о в И.Б., К р а ш и н И.И. Прогноз влияния равнинных водохранилищ на подпор, ресурсы и запасы подземных вод. — М., 1984. — С. 160. 9. Л е в к е в и ч В.Е. Уровненный режим водохранилищ БССР и его влияние на переработку берегов / Тр. конференции молодых ученых геологического факультета ПГУ. — Пермь, 1983 (Деп. ВИНТИ № 3696-83 от 6.07.83 г.), — С. 5. 10. Ш и р о к о в В.М., Л о п у х П.С. Формирование малых водохранилищ гидроэлектростанций. — М., 1986. — С. 144.

УДК 627.41

Е.М. ЛЕВКЕВИЧ, В.Н. МЕХЕДЬКИН

### КРЕПЛЕНИЕ НАПОРНОГО ОТКОСА ГРУНТОВОЙ ДАМБЫ ИЗНОШЕННЫМИ АВТОПОКРЫШКАМИ

Для крепления откосов грунтовых сооружений, берегов рек и водохранилищ, подвергающихся воздействию течений и волн [1–3], находят применение покрытия из бывших в употреблении автопокрышек. И хотя такие крепления сулят значительный экономический эффект, их внедрение в практику пока ограничено, так как еще не установлены достаточно точно условия, в которых они наиболее эффективны. Недостаточна также информация об опыте применения этих креплений.

Крепления из использованных автопокрышек были применены при строительстве грунтовой ограждающей дамбы на р. Даугава для защиты напорного откоса в соответствии с предложением проектной организации (рис. 1). Периодические наблюдения за работой крепления и специальные обследования в период паводка 1985 г., во время которых измерялись скорости потока у берега, брались пробы грунта на разных по высоте точках откоса, вскрывались крепления на некоторых участках и т.д., позволили выявить как положительные стороны этого способа защиты, так и его недостатки.

Дамба (рис. 1, а) отсыпана из мелкого песка, расположена вдоль русла реки; состоит из прямолинейной части длиной около 300 м и верховой и нижней частей, сопрягающих ее с коренным берегом. Ширина по гребню 10,0 м, заложение верхового откоса 1:3, низового — 1:2 (рис. 1, б). Крепление (рис. 1, в) состоит из автопокрышек, уложенных на откос и связанных друг с другом капроновым шнуром диаметром 5 мм. Для предотвращения сползания верхний ряд должен был крепиться к откосу через 1,0 м анкерами (стальной двенадцатимиллиметровый прут длиной 1,0 м). При строительстве от анкеров отказались в связи с наличием у подошвы дамбы горизонтального участка, на котором укладывалось четыре-пять рядов покрышек. Все покрышки-

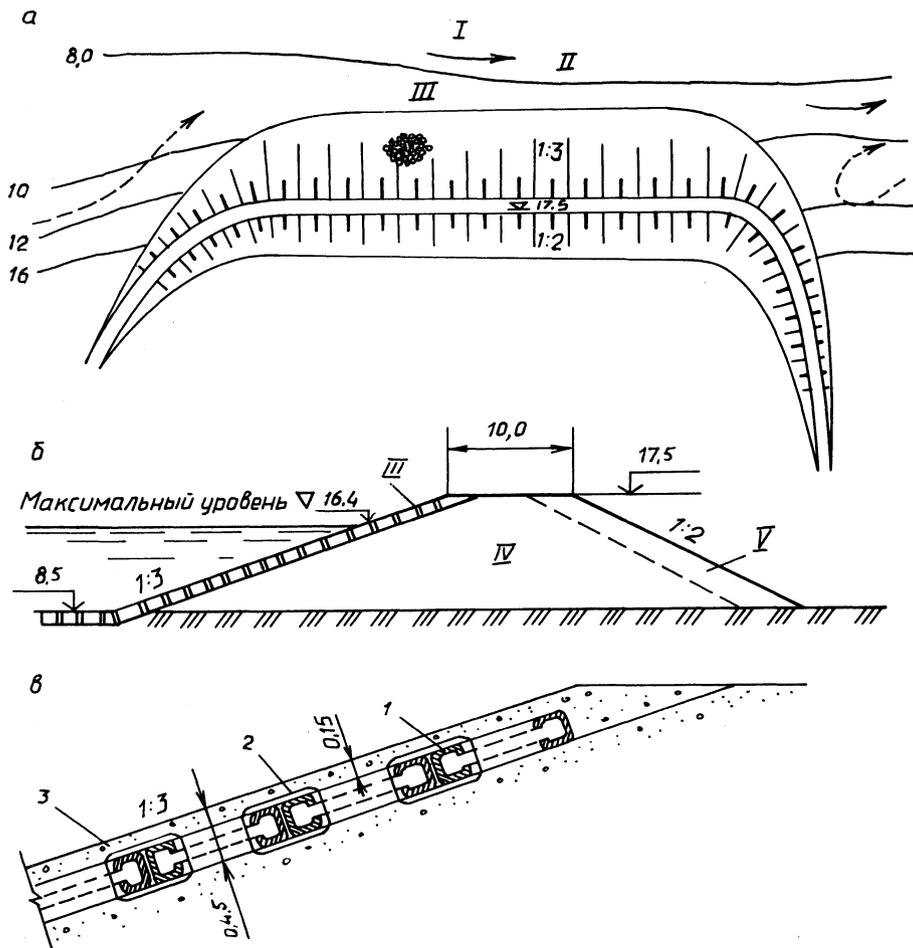


Рис. 1. Грунтовая ограждающая дамба:

*а* – план; *б* – поперечный разрез; *I* – река; *II* – берег меженного русла; *III* – крепление автопокрышками; *IV* – песок мелкий; *V* – песчано-гравелистый грунт; *в* – конструкция крепления; *1* – автопокрышка; *2* – капроновый шнур; *3* – песчано-гравелистый грунт.

ки были засыпаны песчано-гравелистым грунтом с содержанием гравия 40... 55 % слоем 15...20 см. Общая толщина крепления составила 40...45 см.

При устройстве крепления была принята следующая схема работ. После отсыпки тела дамбы производилась планировка откосов бульдозерами, заготовка покрышек и складирование их на гребне или верхнем откосе дамбы у места укладки. Покрышки вручную раскладывали по откосу, связывали капроновым шнуром, завозили из карьера гравелистый песок для засыпки покрышек и складировали в валики на гребне со стороны верхнего откоса. Песок слоем 15...20 см бульдозером распределялся по уложенным покрышкам.

При принятой конструкции крепления и способе производства работ сметная стоимость  $1 \text{ м}^2$  составила 2 руб. 26 коп.

Условия, в которых эксплуатируется дамба с уложенным на ней креплением, и воздействующие на него факторы характеризуются следующими данными. Дамба располагается в пойме реки, вследствие чего она подвергается воздействию потока только во время половодья длительностью 10...20 дней; ледоход проходит в течение 7...10 дней, при котором возможно воздействие на откос плавающих льдин. Наблюдения показали, что поток плавно обтекает дамбу, не изменяя существенно своей плановой структуры, только в верхнем примыкании к берегу образуется застойная зона, которая в период ледохода заполняется льдом, в результате чего поток и основная масса плывущих льдин отжимаются в сторону русла реки и к откосу подходят только отдельные случайные льдины. Поверхностные скорости течения воды вдоль дамбы, измеренные в пик паводка (обеспеченность которого была меньше расчетной), находились в пределах 0,7...0,8 м/с и только в головной и низовых частях достигали 1,0 м/с.

После окончания строительства дамбы и устройства на ней крепления прошло четыре паводка. В результате обследования установлено, что крепление находится в удовлетворительном состоянии и размывов напорного откоса не наблюдается. Только на отметках, соответствующих наиболее длительному состоянию уровней, имеются небольшие приплески, на которых начинает образовываться самоотмостка.

Таким образом, в рассматриваемых конкретных условиях принятый тип крепления явился достаточно надежным способом защиты напорного откоса дамбы от размыва. В данном случае устойчивости крепления способствует отсутствие вихревых зон у поверхности откоса и даже незначительное волнение.

Наряду с достоинствами имеются и некоторые недостатки, связанные с конструкцией крепления и принятой схемой производства работ. Так, внутренние полости покрышек оказались практически незаполненными, засыпка грунта в пазухи между ними и внутри производилась без уплотнения, в результате чего поверхность откоса рыхлая, плотность грунта значительно меньше, чем в теле дамбы, отчетливо прослеживаются контуры покрышек, образовавшиеся в результате естественного уплотнения грунта в пазухах. Отдельные покрышки вышли из плоскости откоса при движении по ним бульдозера во время планировки. В некоторых местах образовались промоины, направленные вниз по откосу, при стоке атмосферных осадков и талых вод.

Отмеченные недостатки в аналогичных условиях могут быть частично устранены внесением некоторых изменений и дополнений в конструкцию крепления и совершенствованием схемы производства работ, что также приведет и к удешевлению строительства.

Для того чтобы обеспечить местную устойчивость отдельных покрышек и общую устойчивость крепления, основания под покрышки (поверхность откоса) перед их укладкой надо надежно уплотнить. В случае необходимости повышения устойчивости крепления против сползания следует прикреплять к откосу не только верхний ряд, но и промежуточные ряды. Покрышки можно использовать и на более крутых откосах, так как они исключают оползание покрышек вниз к подошве сооружения практически при любой крутизне, какую можно придавать грунтовым откосам.

Укладывать покрывки на крутых откосах целесообразно укрупненно, пакетами, предварительно собранными на гребне дамбы с последующей транспортировкой их тракторами или бульдозерами, снабженными специальными навесными приспособлениями. Последнее позволит сократить сроки строительства, объем ручного труда и, как следствие, стоимость крепления. Загрузку и планировку грунта на тюфяке из покрывшек следует производить многократными проходками бульдозера с обязательным поливом грунта водой в количестве, обеспечивающем просадку его в полости покрывшек. При этом после каждого смачивания на поверхность откоса подаются новые порции грунта.

Крепление должно быть защищено от действия атмосферных вод, для чего необходимо по верху откоса устраивать небольшие кюветы с ливнепусками.

В случаях, аналогичных рассматриваемым, т.е. когда крепление подвергается только периодическим затоплениям, для дополнительного укрепления откоса рекомендуется посев трав на поверхности засыпки после первого затопления крепления и его выравнивания (повторной планировки).

Проведенные наблюдения показали, что в условиях руслового потока при скоростях течения до 1,0 м/с крепления откосов тюфяками из автопокрывшек с заполнением полостей песчано-гравелистым грунтом является достаточно надежным средством защиты их от размыва.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гидротехнические сооружения. Учебное пособие для вузов / Под ред. Н.П. Розанова. — М., 1978. — С. 648.
2. Х о м и ц к и й В.В. Природоохранные аспекты береговой гидротехники. — Киев, 1983. — С. 93.
3. Я к о в е н к о В.Г. Строительство берегоукрепительных сооружений. — М., 1986. — С. 208–213.

УДК 627.838

Н.В. СУРМА

### ВИДЫ И ПРИЧИНЫ ПОВРЕЖДЕНИЯ ПЛИТНЫХ КРЕПЛЕНИЙ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ МЕЛИОРАТИВНЫХ СИСТЕМ

Количество водорегулирующих и переездных сооружений в БССР составляет свыше 45 тыс., передвижных и стационарных насосных станций — более 2,5 тыс., при расходе монолитного и сборного железобетона на 100 га мелиорируемой площади — порядка 80...100 м<sup>3</sup>, в денежном выражении — 6,4...8,0 тыс. руб. [1].

Перечисленные гидротехнические сооружения включают в себя наряду с другими конструктивными элементами и плитные крепления дна и откосов, основные виды и назначение которых приведены в табл. 1.

Проектирование и строительство водосбросных, сопрягающих и водорегулирующих сооружений в основном выполняются по действующим типовым и частично по индивидуальным проектам. Количество их определяется конкретными условиями, оно максимально при подпочвенном увлажнении. Так, на мелиоративных системах УССР и БССР насчитывается до восьми типовых гидротехнических сооружений на 100 га увлажненной площади.

| Плиты   | Назначение  |
|---|---|
| Плоские бетонные и железобетонные по слою подготовки и без подготовки | Защищают дно и откосы от размыва  |
| Из пористого бетона без упора и с упором                              | Предохраняют откосы от оплывания и размыва в легких грунтах                                 |
| Ребристые железобетонные по слою подготовки                           | Предохраняют откосы и дно от размыва и оплывания, гасят гидравлическую энергию на перепадах |
| Железобетонные с подъемными боковыми стенками                         | Защищают дно и откосы от оплывания и размыва  |
| Бетонные двухслойные  | Защищают откосы от размыва и оплывания в песках и супесях                                   |
| Фильтрующие на основе синтетических смол                              | То же   |
| Железобетонные решетчатые   | Защищают откосы и дно от размыва и оплывания  |

Т а б л и ц а 2

Результаты обследования трубчатых сооружений некоторых хозяйств Московской области

| Сооружение   | Состояние на период обследования  | Причины неудовлетворительной работы  |
|--|---|--|
| Клинский район, водосброс на пруде р. Жерновка         | Сильно зарос нижний бьеф. Концевое крепление рисбермы подмыто и разрушено             | Отступление от проекта. Некачественное производство работ при строительстве. Отсутствие текущих эксплуатационных мероприятий |
| Клинский район, водосброс на водохранилище р. Студенка | Сильно заилена рисберма. Плиты крепления за водобойным колодезем деформировались      | Отступление от проекта. Швы и стыки между плитами не замонolithicены. Отсутствие текущих эксплуатационных мероприятий        |
| Загорский район, водосброс на пруде р. Талина          | Повреждены гасители энергии и плиты крепления, особенно в зоне переменного увлажнения | Плохое качество бетона. Небрежное производство работ. Зуб выполнен из некачественного материала                              |
| Коломенский район, водосброс на пруде руч. Хотенка     | Сильно зарос отводящий канал за монолитным креплением                                 | Отступление от проекта. Неудачное конструктивное решение   |

Любая попытка применения нетиповых конструкций [2...4] требует решения задачи по определению взаимодействия потока с элементами водопропускных и водозаборных сооружений, которые в большинстве случаев работают при сравнительно небольших расходах и напорах. Они в основном располагаются на слабых и структурно неустойчивых грунтах, что повышает требования к их надежности, особенно для водосборных сооружений.

Одной из причин, вызывающих повышение нагрузки на гидротехнические сооружения и способных вывести их из строя, может быть протекание значительных расходов. Приведенное положение подтверждается исследованиями [5], которые, раскрывая физическую сущность этого явления, указывают на неправильно выбранный режим потока в нижнем бьефе, недоучет особенностей структуры потока, создаваемой теми или иными и даже случайными условиями и др.

Наряду с другими факторами следует учитывать [3]: оптимальную компоновку и конструкции отдельных элементов гидротехнических сооружений с учетом возможных переформирований подводящего и отводящего русла в процессе эксплуатации; прогноз русловых процессов в верхних и нижних бьефах при каскаде гидроузлов и полном регулировании стока с учетом ледового режима и др.; регулирование пропусков воды в нижнем бьефе сооружений на каналах и др.

Русла каналов сооружаются в самых различных инженерно-геологических и гидрогеологических условиях, в зависимости от которых преобладают те или иные виды деформаций. В одних случаях — это оплывание поверхностного слоя откосов, вызываемое гидродинамическим давлением грунтовых вод, в других — размыв русла наземным потоком, в третьих — разрушение откосов под действием метеорологических факторов [6]. Для предотвращения приведенных деформаций во всех случаях необходимо устройство креплений.

По мнению некоторых авторов [7], основными причинами, вызывающими повреждение и разрушение креплений, являются вынос частиц грунта через тело крепления и слабая сопротивляемость крепления размывающему действию руслового и грунтового потоков.

Анализ аварий гидротехнических сооружений позволил сделать вывод [8], что деформация продольного профиля канала возможна вследствие внезапных пропусков воды большими расходами, устройства на каналах временных подпоров без достаточного крепления нижнего бьефа и т.д. В этом случае вода по каналу движется волнами, что способствует общему размыву его дна.

Разрушение отдельных конструктивных элементов и всего гидротехнического сооружения происходит, как правило, в случаях, когда прочность материала сооружения не отвечает действующим нагрузкам, его конструкция недостаточно устойчива к эксплуатационным и климатическим воздействиям, нарушены правила технической эксплуатации [9, 10] (табл. 2).

Нами были проведены натурные наблюдения за сооружениями, расположенными в ряде областей БССР. Основное внимание уделялось плитным креплениям дна и откосов нижних бьефов.

Натурные наблюдения проводились в основном по единой методике: первоначальное ознакомление с проектными и эксплуатационными данными (параметры сооружения, грунты основания, гидравлические и гидрологические

## Результаты обследования некоторых регулирующих сооружений

| Сооружение                               | Виды повреждений и места их образования  | Причины возникновения дефектов   |
|--|--|--|
| Паводковый водосброс на р. Сервечь       | Авария сооружения. Разрушение водобоя. Образовался проран глубиной 4 м в правобережной земляной плотине                    | В момент прохождения паводка были закрыты затворы водосброса и вода пошла поверх них. Выполнение водобоя из сборных железобетонных плит гражданского строительства |
| Шлюз-регулятор на р. Оресса              | Рисберма заилена, откосы заросли. Крепление рисбермы из плит сильно деформировано  | Некачественное выполнение стыков и швов между плитами. Отсутствие необходимых эксплуатационных мероприятий по расчистке нижнего бьефа                              |
| Шлюз-регулятор на канале первого порядка | Рисберма заилена, откосы частично заросли. Раковины на отдельных бетонных поверхностных креплениях                         | Несвоевременное проведение эксплуатационных мероприятий. Слабое сцепление крупного заполнителя с цементным камнем  |
| Шлюз-регулятор на объекте "Волма"        | Рисберма заилена, откосы сильно заросли. Частично разрушены стыковые соединения плит. Вертикальное смещение отдельных плит | Несвоевременное проведение эксплуатационных мероприятий. Действие внешних нагрузок, деформация основания   |

параметры, место расположения сооружения, год ввода в эксплуатацию и др.) построенного сооружения; изучение общего состояния сооружения, а также отдельных его элементов (дно и откосы крепления нижнего бьефа); намечались промерные створы с закладкой реперов; инструментальные наблюдения за формой свободной поверхности потока и крепления нижнего бьефа, величиной и направлением поверхностных скоростей; отбор проб грунта; составление схемы; описание крепления нижнего бьефа, фотографирование. Размеры дефектов креплений (трещины, проломы, выбоины, пустоты и др.) замерялись мерной линейкой. Полученные результаты по каждому объекту в дальнейшем подвергались камеральной обработке, систематизировались и служили дополнительным материалом для обобщения (табл. 3, 4).

Большинство сооружений находилось в момент обследования в удовлетворительном состоянии (например, шлюзы-регуляторы на р. Орессе, на канале первого порядка, на объекте "Волма" и других или имели незначительные дефекты в виде образовавшихся под плитами прослоек, или нарушения структуры материала плит крепления). Наиболее слабым звеном оказалось концевое устройство рисбермы (шлюз-регулятор на объекте "Волма"). Исключением явился паводковый водосброс на р. Сервечь, нижний бьеф которого был разрушен в результате прохождения паводка в 1985 году.

**Результаты обследования некоторых паводковых водосбросов, расположенных  
в Минской и Брестской областях БССР**

| Сооружение                                      | Расчетный<br>расход,<br>м <sup>3</sup> /с | Напор,<br>м | Количество<br>проле-<br>тов, шт. | Грунты ос-<br>нования            | Состояние сооруже-<br>ния на период<br>обследования  |
|---|---|-------------|----------------------------------|----------------------------------|--|
| Минская область,<br>быстроток                   | 96  | 2,5         | 3                                | Моренные<br>супеси и<br>суглинки | Удовлетворитель-<br>ное. В некоторых<br>местах на рисбер-<br>ме имеется вы-<br>ход фильтрацион-<br>ного потока |
| Минская область,<br>многоступенчатый<br>перепад | 106                                       | 3           | 3                                | Гравелис-<br>тый песок           | Хорошее. Повреж-<br>дения материала<br>плит водобоя и<br>рисбермы не об-<br>наружено                           |
| Брестская область,<br>паводковый водо-<br>сброс | 144                                       | 4           | 2                                | Средний пе-<br>сок               | Хорошее. Нару-<br>шения устойчи-<br>вости плит дна<br>и откосов нет  |

Наблюдения показали, что одной из причин неудовлетворительной работы гидротехнических сооружений мелиоративных систем могут быть деформации и разрушения нижнего бьефа, которые вызваны конструктивными недостатками: малые прочность, жесткость и длина плитных креплений; мелкоразмерность; ненадежное устройство стыков и швов между плитами; отсутствие подготовки под плитами, а иногда и незначительная толщина плит рисбермы.

Для сведения к минимуму повреждений плитных креплений требуется надежный анализ местных условий, а также применение крепления, на работе которого дефекты строительства не сказывались; усовершенствование методов определения размеров элементов крепления нижнего бьефа.

Для предупреждения деформаций нижнего бьефа необходимо в пределах водобоя устраивать мощное монолитное крепление; в пределах рисбермы — сборные плиты или блоки, соединенные между собой в тюфяк, откосы и дно подводящих каналов укреплять мелкими элементами или решетчатыми плитами. Во всех случаях под элементами крепления обязательно наличие фильтровой подготовки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мелиорация земель и регулирование водного режима почв / В.И. Белковский, Д. Дворжак, С. Завадский и др. — Мн., 1981. — 368 с. 2. Алтунин С.Т., Бузунов И.А. Защитные сооружения на реках. — М., 1953. — 232 с. 3. Алтунин В.С. Мелиоративные каналы в земляных руслах. — М., 1979. — 255 с. 4. Васильченко Г.В. Воздействие потоков на мелиоративные и водохозяйственные сооружения. — Мн., 1985. —

175 с. 5. Г а р а й м о в и ч И.И. Примеры повреждения креплений нижнего бьефа плотин // Гидротехническое строительство. — 1954, — № 2. — С. 25–30. 6. М и х н е в и ч Э.И. Новые типы креплений мелиоративных каналов. — Мн., 1978. — 128 с. 7. П е ч к у р о в А.Ф. Устойчивость русл рек и каналов. — Мн., 1964. — 412 с. 8. М и р ц х у л а в а Ц.Е. Надежность гидромелиоративных сооружений. — М., 1974. — 279 с. 9. А ч к а с о в Г.П., И в а н о в Е.С. Технология и организация ремонта мелиоративных гидротехнических сооружений. — М., 1984. — 174 с. 10. Устройства нижнего бьефа водосбросов / Н.Т. Кавешников, Е.И. Китов, О.Н. Черных и др. / Под ред. проф. Н.П. Розанова. — М., 1984. — 269 с.

УДК 626.33

Н.М. КУНЦЕВИЧ, БА БУБАКАР

## О КОНСТРУКЦИИ ТРУБЧАТОГО ВОДОСБРОСА-ВОДОВЫПУСКА

Интенсивное развитие сельского хозяйства в засушливых районах требует создания водохранилищ для орошения земель. При их устройстве требуется строительство перегораживающих грунтовых плотин, водосбросов и водовыпусков. В качестве водосбросов на крупных и средних реках широко используются водосливы практического профиля, а на малых — низконапорные трубчатые башенные водосбросы. Водовыпуски для самотечной подачи воды на орошаемые земли устраиваются отдельно расположенными сооружениями или в виде отверстий в быках и устоях водосбросов, через которые забирается вода [1]. Совмещение функций двух сооружений в одном позволяет экономить средства, материалы и рабочую силу.

Совмещение функций водосброса и водовыпуска в широко распространенных башенных водосбросах связано со значительными трудностями. В таких сооружениях оголовок в виде башни, служащий для поступления излишков воды из водохранилища, располагается в верхнем бьефе, а труба для отвода воды в нижний бьеф устраивается на уровне dna водотока и не имеет командной высоты для подачи воды на орошаемые земли самотеком. В таком случае всодовыпуск должен быть береговым и строиться отдельно от водосброса.

Совместить функции трубчатого водосброса с водовыпуском в районах с теплым климатом возможно в конструкции водосброса, в которой башня находится в нижнем бьефе, за грунтовой плотиной. [2].

С этой целью в трубчатом водосбросе, который состоит из водоподводящей трубы 2, уложенной в основании грунтовой плотины 1, и башни 3 с донным отверстием, перекрываемым затвором 4, в боковых стенках башни 3 устраиваются отверстия с затворами 5, расположенными с внутренней стороны башни, а с наружной стороны к ним присоединяются лотки или трубопроводы 6 (рис. 1). Вода забирается из башни в лотки 6, которые отводят ее самотеком на орошаемые земли. Уровень воды в башне устанавливается на отметке нормального подпорного уровня (НПУ) или несколько ниже, в зависимости от соотношения расходов, проходящих по трубе 2, забираемых в лотки 6 и вытекающих через отверстие 4.

При пропуске максимальных расходов затвор 4 поднимается, отверстия 5 могут быть закрыты, и вода сбрасывается через донное отверстие в отводя-

щий канал 7. Таким же путем снижается уровень в водохранилище, производится сброс наносов, поступающих в трубу 2, и пропуск строительных расходов. При отсутствии забора воды в маловодный период сброс ее осуществляет­ся автоматически путем слива через поверхностное отверстие в низовой стенке башни, которое может располагаться на отметке НПУ водохранилища или ниже. Для регулирования уровней в водохранилище на низовой стенке башни устанавливаются шандоры.

Для улучшения входа воды в трубу 2 ее расширяют в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Устранение стекания тонкой струи воды по низовой стенке башни достигается носком.

Для проведения ремонтно-профилактических работ в башне на выходе из трубы или на входе в трубу устраиваются пазы, в которые будут опускаться

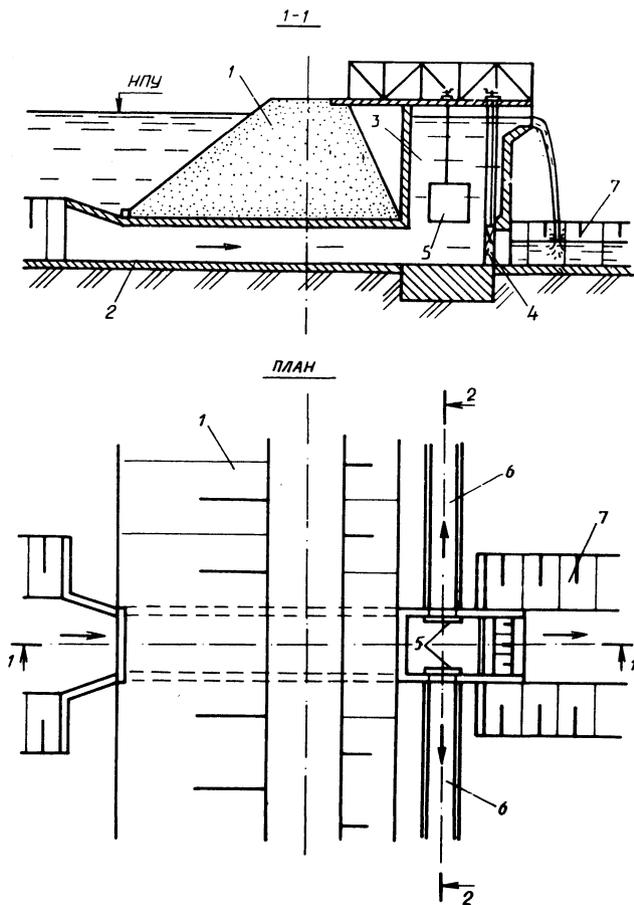


Рис. 1. Конструкция трубчатого водосброса-водовыпуска:

1 — грунтовая плотина; 2 — труба; 3 — башня; 4 — донный затвор; 5 — глубинные затворы в боковых стенках; 6 — водоотводящие лотки; 7 — отводящий канал,

ся шандоры, поэтому такой водосброс лучше выполнить двухочковым с разделительной стенкой в башне.

В отличие от конструкции водосброса [2] в рекомендуемой конструкции водосброса-водовыпуска верховая и боковые стенки башни устраиваются на отметке выше НПУ, что не допускает перелива воды в стороны, где расположены лотки б.

Достоинством этой конструкции, кроме совмещения функций двух сооружений в одном, является то, что для орошения из водохранилища забирается донная вода, богатая минеральными солями, которые способствуют повышению урожая, а в водохранилище улучшается гидрохимический режим.

Конструкция водосброса-водовыпуска может также применяться и для водоснабжения рыбоводных прудов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гидротехнические сооружения. Ч. 2 / Под ред. М.М. Гришина. – М., 1979. – 336 с. 2. А.с. 681149 СССР. Водосброс / Н.М. Кунцевич.

*УДК 626.816:627.14*

**Н.М. КУНЦЕВИЧ,  
ГАРСИЯ МУНЬОС ЛУИС ЭФРАИМ**

### **ГАСИТЕЛЬ ЭНЕРГИИ С СОУДАРЕНИЕМ СТРУЙ НА СХОДЕ С БЫСТРОТОКА И ЕГО ЭФФЕКТИВНОСТЬ**

Интенсивное развитие водохозяйственного строительства в горных районах требует создания водохранилищ для регулирования стока и водообеспечения орошаемого земледелия. На каждом из водохранилищ устраиваются водосбросы, отдельные из них могут быть береговыми, а сопрягающим элементом служит быстроток. Иногда он располагается на крутых склонах, а потоки сопрягаются в нижнем бьефе коротким отводящим каналом. В этом случае весьма важен выбор рациональной формы и конструкции для сопряжения бьефов, определяющих степень погашенности избыточной кинетической энергии сбрасываемого потока.

Анализ опубликованных результатов исследований показывает, что для гашения избыточной энергии за водосбросами применяются различные способы и конструкции. Одним из эффективных способов является гашение избыточной энергии потока за счет соударения струй, направленных под углом друг к другу. Он позволяет гасить избыточную энергию потока на относительно коротком участке, при этом уменьшается сбойность потока и расстояние, на котором происходит затухание пульсаций скоростей и давлений, требуется меньшая вторая сопряженная глубина для затопления прыжка. Однако в части разработанных конструкций гашение энергии соударением струй происходит в пределах сооружения, для чего устраиваются подводящие галереи и решетки, что затрудняет их выполнение в конструкции быстроток и осложняет эксплуатацию и ремонт.

Заслуживают большого внимания конструкции, использующие разделение потока на части в пределах водоската. Они отрывают поток от дна водоската не по всей его ширине, а на отдельных участках и обеспечивают разделение потока и падение части его в виде азрированных струй в поток нижнего бьефа непосредственно на сходе с водоската. Однако в предложенных конструкциях пересечение струй происходит или в камере под решеткой или раздробленные струи, не пересекаясь между собой, падают в поток воды нижнего бьефа [1-3]. При этом наиболее эффективны конструкции с соударением струй на сходе с быстроготока, что и предопределило разработку рассматриваемой конструкции гасителя.

Рекомендуемый гаситель энергии водного потока устраивается в конце быстроготока и состоит из плоской трапециевидальной в плане плиты 1 и выступа-отражателя 2, расположенного на дне водоската (рис. 1). Плита 1 выполняется в виде равнобедренной трапеции и сопрягается с дном водоската меньшим основанием, а большее основание приподнято над дном и опирается на боковые стенки (бычки) или колонну, установленную под плитой. Ниже плиты 1 по всей ширине быстроготока устраивается выступ-отражатель 2 трапециевидальной или закругленной формы.

При работе быстроготока поток стекает по всей ширине его и подходит к трапециевидальной плите 1. В месте сопряжения меньшего основания плиты с дном водоската поток разделяется на две части, из которых одна проходит по дну быстроготока по обе стороны плиты 1, а другая, изменяя направление, про-

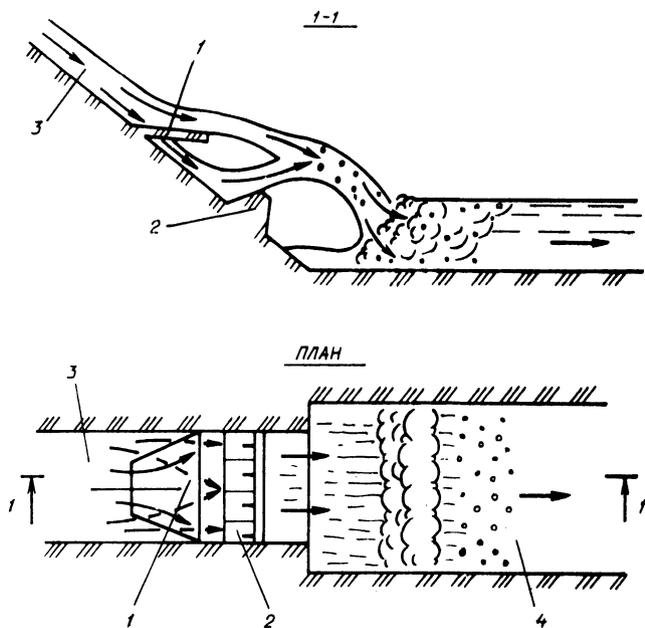


Рис. 1. Конструкция гасителя соударением струй на сходе с быстроготока:

1 - трапециевидальная плита; 2 - выступ-отражатель; 3 - быстроготок; 4 - отводящий канал.

ходит на плиту. Разделенный поток не имеет границ с боков и начинает расширяться. Часть потока, уходящая под плиту, имеет с одной стороны твердую границу и расширяется к оси плиты  $l$ , а вторая часть потока не имеет твердых стенок и расширяется в обе стороны, и так как поток бурный, то он не успевает стекать по бокам плиты.

Продолжая движение под плитой, обе части потока соединяются, поступают на выступ-отражатель 2, поднимаются им кверху и движутся в воздухе. Угол наклона выступа-отражателя к горизонту принимается по графику для определения угла наклона неподтопленной струи при соотношении угла наклона струй и угла наклона уступа к дну быстротока, равном единице [4, рис. 10,49]. Вторая часть потока движется по направлению, заданному плитой  $l$ , и после схода с нее движется по инерции в воздухе.

В воздухе обе части потока пересекаются, дробятся, аэрируются, и единая струя падает в отводящий канал, теряя при этом значительную часть кинетической энергии. После гидравлического прыжка поток становится спокойным.

Для изучения механизма движения потока и определения эффективности гасителя проведены лабораторные гидравлические исследования на модели быстротока длиной 3,1 м, шириной 0,2 м с уклоном  $i = 0,622$  с горизонтальным отводящим каналом шириной 0,3 и 1,0 м, длиной 2,5 м; перепад уровней воды – около 2,0 м, расходы на водоскате – 9,5...20,6 л/с, числа Фруда на подходе к гасителю – 115...230.

Исследованиями установлено, что наилучший эффект гашения достигается, если на трапецеидальную плиту поступает 0,7 суммарного расхода, угол ее отклонения от плоскости водоската – 9...15° и угол наклона уступа – 15...20° от линии горизонта, уступ установлен на отметке расчетного уровня в нижнем бьефе.

Одним из способов оценки эффективности гасителя является сопоставление сопряженных глубин за гидравлическим прыжком при наличии и отсутствии гасителя [5]. Сопряженная глубина за прыжком в конструкции без гасителя определялась по методике, разработанной для пространственных условий сопряжения бьефов [6], а на модели в конструкции с гасителем – в сечении за гидравлическим прыжком.

Результаты сравнения расчетных значений сопряженных глубин и полученных в опытах с применением гасителя при ширине отводящего канала 0,3 м показывают, что сопряженная глубина при работе гасителя составляет примерно 0,60...0,65 глубины конструкции без гасителя.

Погашенность энергии потока до и после гасителя характеризуется отношением разности удельных энергий потока в сечениях до и после гасителя к удельной энергии потока в сечении до гасителя и составляет 0,84...0,89; а погашенность энергии потока с гасителем и без него – отношением разности энергий в сжатом сечении без гасителя и в условном сжатом сечении с гасителем (глубина рассчитывается исходя из бытовой глубины на модели при критическом положении прыжка) к энергии потока без гасителя и составляет 0,72...0,82.

Опытами установлено, что максимальное значение осредненного гидродинамического давления на дно канала в зоне падения струи снижается до 65 % по сравнению со свободно падающей струей.

Расчет крепления в нижнем бьефе быстротока показывает, что длину

водобойной плиты можно сократить на 20...40 %, а величину заглубления крепления — на 30...40 % по сравнению со свободно падающей струей.

На основании результатов лабораторных исследований и проведенных расчетов можно сделать вывод, что конструкция гасителя обладает хорошими энергогасящими свойствами и позволяет в отдельных случаях сократить затраты на крепление в нижнем бьефе быстротока.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ф а к т о р о в и ч М.Э. Гашение энергии при соударении потоков и перспективы его использования в водосбросных сооружениях. Тр. коор. совещаний по гидротехнике. — М.; Л., 1963. — Вып. 7. — С. 68—84.
2. К о м а р а Ю. Водосброс с использованием соударения потоков для гашения энергии / Гидротехн. стр-во. — М., 1969. — № 4. — С. 47—48.
3. С к л я д н е в Б.М. Эффект гашения энергии при соударении потоков. Вопросы гидротехники и гидравлики. — Киев, 1969. — С. 30—32.
4. Справочник по гидравлическим расчетам / Под ред. П.Г. Киселева. — М., 1972. — С. 312.
5. Ф а к т о р о в и ч М.Э. Методика приближенного гидравлического расчета сопряжения бьефов водосбросных сооружений с использованием соударения потоков для гашения энергии, — М.; Л., 1956. — С. 48.
6. К у з н е ц о в С.К. Теория и гидравлические расчеты нижнего бьефа. — Львов, 1983. — С. 176.

УДК 631.131.4.524

Ю.А. СОБОЛЕВСКИЙ, Д.Ю. СОБОЛЕВСКИЙ

#### ДИСТОРСИЯ И РАЗЖИЖЕНИЕ ПЕСКОВ

В практике гидротехнического и гидромелиоративного строительства отмечаются аварии из-за внезапного разжижения водонасыщенных песчаных откосов и оснований [1, 2, 3]. Очень часто причины остаются невыясненными, но неизменно констатируется, что разжижение произошло с рыхлоотложенными грунтами.

В 1935 г. Е.Д. Кадомским впервые был поставлен весьма простой опыт перехода водонасыщенного песка в разжиженное состояние [2]. В наполненный водой сосуд, оборудованный стеклянными пьезометрами, тонкой струей насыпается сухой песок, который после осаждения образует рыхлоотложенную водонасыщенную массу. На поверхности последней устанавливается гиря, а затем толща песка пронзается линейкой. Рыхлая структура разрушается. Водонасыщенный песок переходит в разжиженное состояние, Гиря тонет. Пьезометры показывают подъем давления в воде с медленным понижением уровня до первоначального. Из-за более плотной переукладки частиц снижается также и уровень песка в сосуде.

Подобные явления в природе описаны А.М. Рыжовым и В.П. Вихаревым [4]. Рыхло отсыпанную насыпь из мелкого аллювиального песка под железную и автомобильную дороги на строительстве Кременчугского гидроузла во время ее подтопления подвергли спровоцированному оплыванию трехкратным вдавливанием полутораметрового шеста в откос у уреза воды.

Первое опытное разрушение распространилось на 14 м в глубину четырехметровой насыпи. Грунт вышел на 24 м за пределы насыпи, расплывшись по

площади 740 м<sup>2</sup>. Оплывание захватило 330 м<sup>2</sup> насыпи, Площадка получила уклон 1:10–1:12. Первоначальный же наклон откоса – 1:1. Всего растеклось около 1000 м<sup>3</sup> грунта.

Второе опытное разрушение состоялось после резких погружений шеста в насыпь у уреза воды. В этом месте надводная часть насыпи составляла 2,9 м, подводная – около 1 м. Процесс разжижения по площади 520 м<sup>2</sup> протекал так же, как и в первом случае, и распространился на 19,2 м в глубину насыпи. Расплывшийся грунт под уклоном 1:10–1:12 занял площадь 1100 м<sup>2</sup> и вытек за пределы насыпи на 28 м. Оплыванию подверглось около 1500 м<sup>2</sup> грунта. На этом же объекте был зафиксирован случай оплывания насыпи от случайного удара весла при движении лодки.

Подобное явление произошло зимой 1958 г. при растекании дамбы рыбхоза на р. Щара возле г. п. Ивацевичи. Участок дамбы, отсыпанной предшествующим летом без уплотнения из пылеватого песка на длине 40 м, пришел в разжиженное состояние при прохождении по нему экскаватора, который опрокинулся и утонул в образовавшейся при размыве воронке.

Изучению явлений разжижения песка и связанных с ними процессов посвящены работы исследователей в области механики грунтов [5,6]. Авторы независимо друг от друга опубликовали результаты опытов, из которых следовало, что объем песка в зоне сдвига изменяется. При плотном сложении частицы песка во время скольжения перекаатываются и зацепляются, что приводит к увеличению объема и разрыхлению грунта в зоне сдвига. В рыхлом же песке сдвиг вызывает разрушение неустойчивой структуры, затем более компактную переукладку зерен, сопровождающуюся уплотнением грунта. Впоследствии это явление было названо контракцией.

О зацеплении частиц плотного песка при сдвиге писал еще в 1773 г. Ш. Кулон. Позже, в 1885 г., расширение материала при сдвиге было названо О. Рейнольдсом дилатансией [7]. В настоящее время искажения объемов материала от девиатора напряжений объединены общим термином – дисторсия.

Однако, как убеждают опыты, существует промежуточное состояние между плотным и рыхлым сложением грунтов, характеризующее неизменной пористостью при сдвиге. Она также не меняется при установившемся движении на границе смещающихся плотных массивов грунта и называется критической [8].

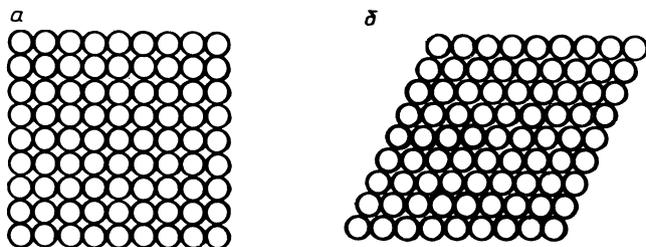


Рис. 1. Механические модели идеального грунта из шариков:

*а* – неустойчивая система с шестью точками контакта; *б* – устойчивая система с восемью точками контакта.

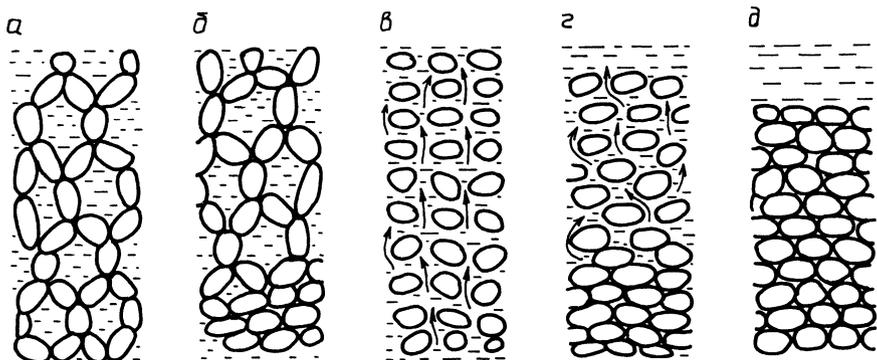


Рис. 2. Переукладка частиц рыхлого водонасыщенного песка:

*a* – первоначальное рыхлое сложение; *б* – переукладка частиц нижнего контактирующего слоя; *в* – взвешивание частиц восходящим фильтрационным потоком; *г* – процесс переукладки частиц; *д* – уплотненное сложение частиц.

При сдвиге водонасыщенного песка возникают фильтрационные явления, существенно влияющие на устойчивость оснований и откосов. Устойчивость несвязных грунтов, обладающих жестким скелетом, обуславливается трением между частицами от вышележащих масс грунта, внешней нагрузки и капиллярных сил. Для выяснения ряда фильтрационных явлений, происходящих при сдвиге рыхлого песка, воспользуемся моделью грунта из шариков правильной формы [1] (рис. 1). Пористость между шариками на рис. 1, *a* будет составлять 48 %, коэффициент  $e = 0,91$ ; и соответственно на рис. 1, *б* – 26 и 0,35 %. При перекосе структуры резко изменится высота. Водопроницаемость, как показывает расчет по эмпирическим формулам, учитывающим значение пористости, изменится на порядок [9].

Многочисленные опыты по сдвигу маловлажных песков в сдвиговом приборе ВСВ-25 и специально сконструированном компрессионном dilatометрическом приборе прямого среза позволяют выявить зависимость сопротивления сдвигу от плотности сложения и одновременно измерять нормальные напряжения от дисторсии в зоне сдвига. Результаты показали, что сопротивление сдвигу при контракции из-за уменьшения контактов между частицами уменьшается или исчезает полностью, а при дилатансии – увеличивается из-за возрастания нормального давления в зоне сдвига.

Зависимость Кулона приобретает вид

$$\tau = (\sigma_n \pm \sigma_d) \operatorname{tg} \varphi,$$

где  $\sigma_n$  и  $\sigma_d$  – соответственно нормальное и дисторсионное давления в зоне сдвига, кПа;  $\varphi$  – угол внутреннего трения, град.

При  $\sigma_d = \sigma_n$  грунт в полосе контракции полностью лишается трения, даже не будучи взвешенным в воде. В грунтовом массиве образуется щель. Взвешивающей средой может стать даже поровый воздух. Однако чаще всего песок взвешивается поровой водой.

Уплотнившийся при контракции слой грунта подобно полупроницаемой мембране передает давление с примыкающего еще не нарушенного массива

на возникшую водяную прослойку. В освободившейся от частиц прослойке воды резко возрастает поровое давление (рис. 2). Избыточный напор вызывает восходящий фильтрационный ток воды, который и разрушает неустойчивую структуру рыхлого водонасыщенного песка. Контрактирующий слой также разрушается. Из-за неустойчивости структуры грунта явления контракции и мембранный эффект развиваются в соседних областях. Процесс становится лавинным. Происходит разжижение значительных масс грунта. Сооружения на таких грунтах погружаются. Природные склоны и искусственные откосы оплывают. Разжижение и оплывание водонасыщенных грунтов прекращаются лишь тогда, когда в силу вступают дилатантные явления.

Различают полное и частичное разжижение песков [2]. При полном разжижении потеря контактов от контактирующей области распространяется вверх, достигая дневной поверхности грунта. Грунт превращается в суспензию:

$$\gamma_{susp} = \gamma_s m + \gamma_w n ,$$

где  $\gamma_s$  и  $\gamma_w$  — соответственно удельный вес частиц и воды,  $\text{кН/м}^3$ ;  $n$  и  $m$  — доля пор и скелета в единице объема грунта.

Давление в воде в уровне образовавшейся щели под условной мембраной возрастает до

$$p = \gamma_{sr} h = \gamma_{susp} h ,$$

где  $\gamma_{sr} = \gamma_{susp}$  — объемный вес насыщенного водой грунта и соответственно суспензии,  $\text{кН/м}^3$ ;  $h$  — глубина рассматриваемого уровня, м.

Учитывая, что при повышении давления вода из щели будет стремиться вверх, а частицы песка двигаться книзу, возникает напор

$$H = \frac{\gamma_{sr}}{\gamma_w} h .$$

Максимальные градиенты  $H$  могут достигать  $i = H/h = \gamma_{sr} / \gamma_w$ , т.е. стать больше единицы. При этом толща песка разжижается. Однако такое состояние возникает и при  $i = \gamma_{sb} / \gamma_w$ . Тогда

$$u_{\max} = (\gamma_{sr} - \gamma_w) (h - z) = \gamma_{sb} (h - z) ,$$

где  $u_{\max}$  — поровое давление, соответствующее полному разжижению грунта,  $\text{кПа}$ ;  $\gamma_{sb}$  — удельный вес взвешенного в воде грунта,  $\text{кН/м}^3$ .

Восходящий ток воды приводит к полной потере контактов в слое выше контактирующей области (см. рис. 2).

Следует иметь в виду, что избыточное давление при динамических воздействиях может и не достигать максимального значения. Тогда происходит частичное облегчение контактов. Грунт в определенной мере сохраняет несущую способность. Такое состояние П.Л. Иванов [2] предлагает оценивать степень разжижения грунта

$$N = \frac{u}{u_{\max}} = \frac{u}{\gamma_{sb} (h - z)} ,$$

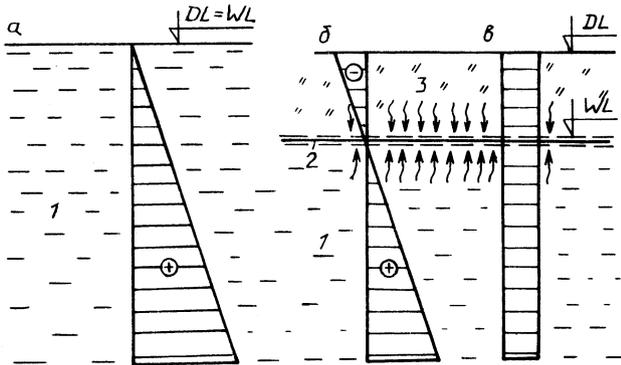


Рис. 3. Возникновение капиллярных сил обжатия при переукладке рыхлого тонкозернистого водонасыщенного песка:

*a* – распределение давлений в поровой воде рыхлосложенного песка; *б* – распределение давлений в поровой воде уплотняющегося песка; *в* – напряжения в скелете песка из-за капиллярного обжатия; 1 – свободная вода (знак "плюс" – давление в воде выше атмосферного); 2 – капиллярная вода (знак "минус" – давление в воде ниже атмосферного); 3 – дилатирующая прослойка.

где  $u$  – избыточное поровое давление при частичном разжижении, кПа. Числовые значения  $N$  лежат в пределах от 0 до 1. При  $N = 1$  происходит полное разжижение грунта.

При частичном разжижении водонасыщенных песков, которое также заканчивается переукладкой зерен и уплотнением, в силу вступают дилатантные явления, противоположные контракции. Дилатансия водонасыщенного песка сопровождается разрыхлением прослойки между смещающимися грунтовыми областями с пористостью выше критической. Образуется разрежение. В дилатирующуюся прослойку устремляется вода из сдвигаемых частей грунта. Если толщина представлена достаточно мелкозернистым песком, то выше горизонта 2–2 возникает капиллярное состояние воды. Скелет же грунта получит капиллярное сжатие по всей толще [10] (рис. 3). Подтверждается вывод [1], что "...песок с порозностью ниже критической представляет собой одно из самых надежных оснований",

Сопоставление контракции и дилатансии показывает, что частичное разжижение песков проявляется преимущественно в толщах, структура которых близка по сложению к критической пористости либо состоит из чередующихся рыхло и плотно сложенных прослоек. Виброползучесть песков при динамических воздействиях, очевидно, также следует трактовать как сменяющуюся во времени и пространстве дилатансию и контракцию.

Дисторсионные представления о деформировании грунтов, объединяющие дилатансию и контракцию, указывают на то, что для снятия напора в поровой воде эффективны дренажные мероприятия, а для недопущения или ограничения контракции и, как следствие, разжижения водонасыщенных песков необходимо их уплотнение до пористости ниже критической.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Герсеванов Н.М., Польшин Д.Е. Основы механики грунтов и их практические приложения. — М., 1948. — С. 124–129.
2. Иванов П.Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений. — М., 1985. — С. 73–77.
3. Маслов Н.Н. Основы механики грунтов и инженерной геологии. — М., 1982. — С. 465–477.
4. Рыжов А.М., Вихарев В.П. Случай разжижения песка в пойменной насыпи / Вопросы геотехники. — Днепропетровск, 1959. — С. 243–260.
5. Яропольский И.В. К вопросу о коэффициенте трения в песках / Тр. ЛИИВТ. — М., 1933. — Вып. 2. — С. 18–37.
6. Casagrande A. New Fact in Soil Mechanics from the Reseach Laboratories, Eng. News Record, Vol. 115, N 10, 1935.
7. Reynolds O. Experiments Showing Dilatancy a Property of Granular Material, Proc. Roy. Inst., 2, с. 351–363, 1886.
8. Нворслев М.И. Über die Festigkeitseigenschaft gestörter bindiger Böden, Skr , A, N 45, 1937.
9. Справочник гидрогеолога. — М., 1962. — С. 130–138.
10. Wilun Z. Zarus geotechniki, Warszawa, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 1976, с. 45–48.

УДК 624.15:624.131

Г.В. ХМЕЛЕВСКАЯ

### О НАБУХАНИИ СУПЕСЧАНЫХ И ПЫЛЕВАТЫХ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ ПРИ УВЛАЖНЕНИИ

В центральных и северных районах Белоруссии строительство мелиоративных объектов часто проводится в зоне распространения супесчаных и пылеватых песчаных грунтов. Проведенный нами ранее анализ состояния проводящей мелиоративной сети показал, что в таких грунтах чаще, чем в других, происходят местные деформации откосов каналов под действием руслового потока, поверхностных и фильтрационных вод [1]. На поверхности откосов грунт, как правило, находится в непригруженном состоянии и наиболее подвержен воздействию различных гидрометеорологических факторов. Вследствие этого вопрос о поведении супесчаных и пылеватых песчаных грунтов в условиях изменения их влажностного режима представляет определенный интерес с точки зрения обеспечения устойчивости откосов каналов. Имеющиеся литературные данные относятся в основном к тяжелым суглинкам и глинам. Материалы же исследований, касающиеся набухания при увлажнении супесчаных грунтов (и тем более пылеватых песков), весьма ограничены, что не позволяет сделать обоснованные выводы о поведении таких грунтов в условиях изменения их влажности.

Было исследовано 14 супесчаных и 10 пылеватых песчаных грунтов, отобранных на мелиоративных объектах Минской и Витебской областей.

Основные физические характеристики исследованных супесчаных грунтов следующие: граница текучести  $W_T = 15...29\%$ , раскатывания  $W_P = 11...24\%$ ; число пластичности  $W_{Pl} = 3...6$ ; плотность частиц  $\gamma_c = 2,61...2,71 \text{ г/см}^3$ ; содержание глинистых частиц ( $< 0,005 \text{ мм}$ )  $P_{гп} = 6,4...16,7\%$ , пылеватых частиц ( $0,005...0,05 \text{ мм}$ )  $P_{пыл} = 15,5...67,2\%$ .

Исследованные пески представляют собой типичные пылеватые разности с содержанием пылевой фракции  $P_{пыл} = 7...40\%$ , глинистой —  $P_{гл} = 0,5...$

8 %. Плотность частиц песков  $\gamma_{\text{ч}} = 2,61...2,66 \text{ г/см}^3$ .

Проведено четыре серии опытов (93 опыта):

исследовано разуплотнение грунта в результате свободного набухания при увлажнении в зависимости от начальных характеристик;

влияние цикличности увлажнения на степень разуплотнения набухающего грунта;

дана оценка давления набухания;

влияние длительности периода водонасыщения на конечную величину деформации образца.

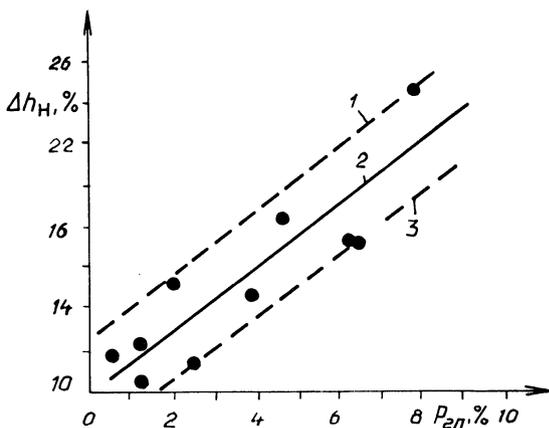
Эксперименты проводили в кольцах площадью  $25 \text{ см}^2$  и высотой 2 см. Деформация образцов измерялась штангенциркулем от постоянной плоскости отсчета в 10 точках с последующим усреднением результатов. Правомерность такого метода определяется, с одной стороны, значительной величиной деформации свободного набухания исследуемых грунтов (10...30 %), а с другой — большим влиянием на деформации даже незначительных нагрузок, т.е. малым давлением набухания. Исходные значения объемной массы скелета  $\gamma_{\text{ск}_0}$  и влажности  $W_0$  образцов принимались в диапазоне их значений при естественном залегании исследуемых грунтов на откосах каналов ( $\gamma_{\text{ск}_0} = 1,6...1,9 \text{ г/см}^3$ ,  $W = (0,7...0,9) W_{\text{T}}$ ).

Опыты первой серии показали, что для супесчаных грунтов величина свободного набухания  $\Delta h_{\text{н}} = 10...25 \%$  и зависит от исходных значений объемной массы скелета  $\gamma_{\text{ск}_0}$  и влажности  $W_0$  [2]. Деформации набухания возрастают с увеличением  $\gamma_{\text{ск}_0}$  и уменьшением  $W_0$ , что хорошо согласуется с данными других авторов, проводивших опыты с суглинками и глинами [3,4]. Однако, как показали исследования, величина свободного набухания супесчаных грунтов возрастает лишь до некоторого значения начального коэффициента водонасыщения образца  $G_0 = 0,7...0,8$ , а затем начинает снижаться и при  $G_0 = 1,0$  набухание образца практически отсутствует. Такой эффект можно объяснить тем, что насыщение грунта за счет миграции влаги возможно лишь в некотором диапазоне начальных его характеристик, когда размеры пор и соотношение между количеством свободной и связанной воды в образце таковы, что скелет грунта способен еще поглощать воду за счет незамкнутых пор [5,6].

Эксперименты показали, что в процессе свободного набухания происходит значительное изменение состояния грунта. В среднем за счет набухания происходит разуплотнение образца на 8...13 %. Наибольшее разуплотнение наблюдается в поверхностном слое толщиной 2...5 мм, где объемная масса скелета уменьшается на 20...80 % в зависимости от исходного значения  $\gamma_{\text{ск}_0}$ : например, для супеси с  $W_{\text{п}} = 4$  при изменении  $\gamma_{\text{ск}_0}$  от 1,7 до  $1,92 \text{ г/см}^3$  объемная масса поверхностного слоя снизилась соответственно на 26...74 %. Влажность этого слоя превышает влажность на границе текучести в 1,2...1,7 раза; естественно, что и несущая способность такого грунта практически падает до нуля.

Исследования свободного набухания пылеватых песков с  $W_0 = 9...11 \%$  позволили выявить связь величины деформации набухания с содержанием

Рис. 1. Зависимость деформаций свободного набухания пылеватых песков от содержания глинистой фракции  $P_{\text{гл}}$ :  
 1 — средняя расчетная прямая; 2, 3 — верхняя и нижняя огибающие опытных значений



в песке глинистых частиц  $P_{\text{гл}}$  (рис. 1), которую в среднем можно описать следующим уравнением:

$$\Delta h_n = (10 + 1,6P_{\text{гл}}). \quad (1)$$

Давление набухания исследованных супесчаных грунтов, как показали эксперименты, невелико и составляет в среднем  $p_{\text{наб}} = 15 \dots 20 \text{ г/см}^2$  (1,5... 2 кПа). Уменьшение деформации набухания под действием нагрузки происходит интенсивно по полулогарифмическому закону и в общем виде может быть выражено зависимостью

$$\Delta h_n = A - B \lg p, \quad (2)$$

где  $p$  — нагрузка,  $\text{г/см}^2$ ;  $A$  и  $B$  — эмпирические коэффициенты (для супесей с  $W_n = 4 \dots 6$   $A = 7,2$  и  $B = 6,2$ ). Зависимость (2) действительна при  $p \geq 0,25 \text{ г/см}^2$  (0,025 кПа), что учитывает действие на деформации набухания массы верхнего набухающего слоя.

Полученные значения давления набухания супесчаных грунтов (1,5... 2 кПа) во много раз меньше, чем у суглинков и глин. Эта величина составляет соответственно в среднем 50...150 и 400...600 кПа, достигая для сильнонабухающих разновидностей глин 1...1,2 МПа [7, 8]. Для сооружений (регулирующих, сопрягающих и т.д.) на каналах столь малые давления набухания не опасны, поскольку нагрузка на грунт от сооружения превышает это давление и деформации под ними развиваться не будут. К аналогичным выводам пришли и авторы работы [7]. На откосах каналов предотвратить разуплотнение поверхностного слоя грунта можно устройством пригрузки из щебня или гравия слоем 15...20 см, что обеспечивает поверхностную нагрузку 2,0... 3,0 кПа.

Влияние циклического увлажнения было изучено на супесчаных грунтах ( $W_T = 23 \%$ ,  $W_n = 6$ ) при  $\gamma_{\text{ск}_0} = 1,59 \text{ г/см}^3$  и  $W_0 = 0,65 W_T$ . Проведено шесть циклов увлажнение — высушивание с измерением деформаций образца в конце каждой фазы цикла. После фазы высушивания первого цикла (отрезок 1—1', рис. 2) поверхность образца опустилась практически в первоначальное

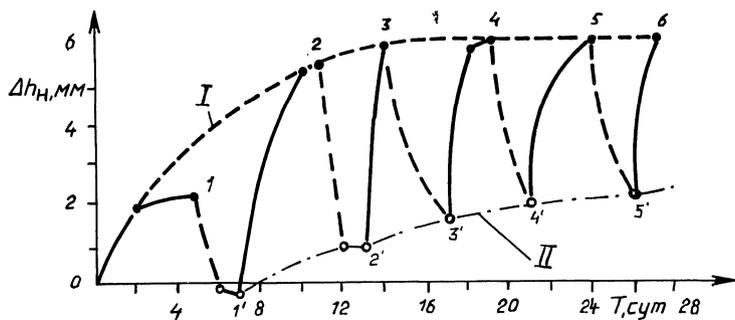


Рис. 2. Деформации свободного набухания образца супеси при циклическом насыщении: I – ветвь набухания при увлажнении; II – ветвь остаточного набухания при осушении.

положение, произошло также и уменьшение диаметра образца – деформация усадки. В начале первого цикла в результате набухания при насыщении образца водой произошло уменьшение объемной массы скелета до  $\gamma_{ск_1} = 1,43 \text{ г/см}^3$ , а затем при высушивании грунта – ее увеличение до  $\gamma'_{ск_1} = 1,69 \text{ г/см}^3$ . Последнее значение  $\gamma'_{ск_1}$  и явилось исходным для второго цикла увлажнения. Последнее привело к увеличению деформации ( $\sim$  в 2,5 раза) вследствие того, что исходная плотность была намного больше, а влажность намного меньше, чем перед первым циклом насыщения, т.е. условия для последующего набухания стали более благоприятными. Последующие циклы насыщения (2'–3) и высушивания (3–3') привели к увеличению общей деформации образца, однако интенсивность процесса затухает и после шестого цикла практически стабилизируется. Кроме того, следует отметить, что начиная со второго цикла после высушивания и усадки образца появляется остаточная деформация набухания, интенсивность увеличения которой также от цикла к циклу снижается и стабилизируется на уровне деформации набухания первого цикла (см. рис. 2). Затухание процесса свободного набухания говорит о том, что внутренние возможности перестройки структуры грунта уже исчерпаны, поэтому дальнейшее увеличение количества циклов не приводит к росту деформаций, а наблюдается лишь колебание поверхности образца между линиями I и II. Конечное разуплотнение образца после шести циклов насыщения произошло до  $\gamma_{ск}^к = 1,23 \text{ г/см}^3$ , что на 22,6 % меньше начального значения  $\gamma_{ск_0} = 1,59 \text{ г/см}^3$  и на 13,9 % меньше  $\gamma_{ск_1}$  после первого цикла насыщения.

Полученные при циклическом водонасыщении образца результаты говорят о том, что наибольшие деформации грунта на откосах каналов возможны при повторных насыщениях в период летнего пересыхания поверхности грунтов, что подтверждается и исследованиями других авторов [7].

При изучении длительности влияния увлажнения на деформации свободного набухания супесчаных грунтов было установлено, что своего наибольшего значения деформации достигают через четыре-пять суток; после чего начинается постепенное их снижение со стабилизацией на уровне 80 % от максималь

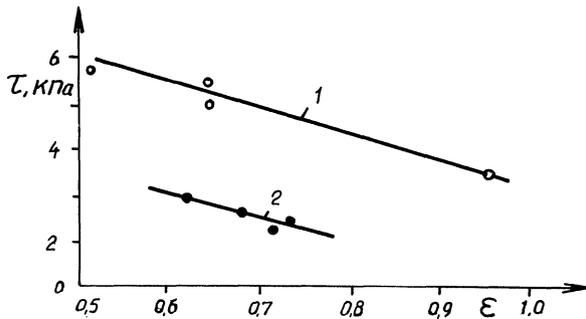


Рис. 3. Зависимость сдвигающего усилия  $\tau$  от коэффициента пористости для набухших и ненабухших образцов (сдвиг переуплотненных образцов):  
1 – ненабухший грунт; 2 – набухший грунт.

величины. По классификации И.М. Горьковой [6], исследованные грунты относятся к дисперсно-обломочным системам со смешанными коагуляционно-цементационными связями при естественной влажности. При набухании за счет переувлажнения происходит ослабление межагрегатных коагуляционных связей и начинается дилатантное уплотнение и усадка под действием массы грубодисперсных частиц и микроагрегатов, что и характеризуется наличием перегиба и нисходящей ветви на кривой зависимости деформации от времени.

Для оценки изменения прочностных свойств супесчаных грунтов после их свободного набухания были выполнены сдвиговые испытания (супесь с  $W_T = 22\%$ ,  $W_{II} = 5$ ,  $\gamma_c = 2,65 \text{ г/см}^3$ ).

Варианты испытаний:

срез в условиях завершеного уплотнения грунта естественной влажности при нагрузках 20...110 кПа;

срез в условиях завершеного уплотнения водонасыщенного грунта при нагрузках 10...154 кПа;

срез переуплотненных водонасыщенных образцов (табл. 1);

срез образцов после их свободного набухания (предварительное уплотнение производилось при нагрузках 87 и 154 кПа) (табл. 1).

Для супеси естественной влажности  $W_0 = (0,6...0,7) W_T$  при  $\epsilon_0 = 0,5...0,6$  сцепление оказалось равным 10 кПа, а угол внутреннего трения  $\varphi = 17,7^\circ$ . Для того же грунта в водонасыщенном состоянии сцепление уменьшилось вдвое – до 5 кПа, угол же трения  $\varphi$  равен  $17,4^\circ$ . Из графиков зависимости (рис. 3) сдвигающего усилия от коэффициента пористости грунта в момент среза видно, что по сравнению с обычным водонасыщенным образцом при срезе набухшего грунта сдвигающие усилия уменьшаются в 1,8...2 раза ( $\tau = 2...3 \text{ кПа}$ ). При этом срез в приборе осуществляется по средней части образца, для которой характерны и осредненные значения  $\gamma_{ск}$ ,  $W$  и  $\epsilon$  в момент среза. Следовательно, и полученные в опытах сдвигающие усилия отражают среднее для образца сопротивление грунта сдвигу. В верхней же части образца, где изменение характеристик грунта при набухании максимально, падение прочности грунта будет значительно больше, чем в среднем по образцу. Однако возможности обычных сдвиговых приборов не позволяют оценить распре-

Таблица 1

Характеристики супеси ( $W_T = 22\%$ ,  $W_{II} = 5$ ,  $\gamma_q = 2,65 \text{ г/см}^3$ ) и значения сопротивления сдвигу  $\tau$  при срезе набухших и ненабухших образцов

| До опыта                                 |              |              | После уплотнения нагрузкой |           |                                       |                 | После опыта                            |              |              |       |                     |                               |                    |
|--|--------------|--------------|----------------------------|-----------|---------------------------------------|-----------------|--|--------------|--------------|-------|---------------------|-------------------------------|--------------------|
| $\gamma_{СК_0}$ ,<br>г/см <sup>3</sup>   | $W_C$ ,<br>% | $\epsilon_0$ | $G_0$                      | $p$ , кПа | $\gamma'_{СК}$ ,<br>г/см <sup>3</sup> | $\tau$ ,<br>кПа | в среднем по образцу                   |              |              |       | по высоте образца   |                               |                    |
|  |              |              |                            |           |                                       |                 | $\gamma_{СК_К}$ ,<br>г/см <sup>3</sup> | $W_K$ ,<br>% | $\epsilon_K$ | $G_K$ | верх<br>$W_K^B$ , % | зона<br>сдвига<br>$W_K^C$ , % | низ<br>$W_K^H$ , % |
| <i>Ненабухшие водонасыщенные образцы</i> |              |              |                            |           |                                       |                 |  |              |              |       |                     |                               |                    |
| 1,58                                     | 14,22        | 0,68         | 0,56                       | 161       | 1,62                                  | 5,5             | 1,62                                   | 20,15        | 0,64         | 0,84  | 19,5                | 19,2                          | 20,4               |
| 1,22                                     | 7,1          | 1,17         | 0,16                       | 161       | 1,36                                  | 3,5             | 1,36                                   | 19,95        | 0,95         | 0,56  | 20,81               | 19,11                         | 21,16              |
| 1,54                                     | 14,59        | 0,72         | 0,53                       | 161       | 1,62                                  | 5,0             | 1,62                                   | 19,65        | 0,64         | 0,82  | 19,27               | 19,22                         | 21,53              |
| 1,74                                     | 15,14        | 0,52         | 0,76                       | 61        | 1,75                                  | 5,8             | 1,75                                   | 17,82        | 0,51         | 0,92  | 16,45               | 20,33                         | 19,03              |
| <i>Набухшие образцы</i>                  |              |              |                            |           |                                       |                 |  |              |              |       |                     |                               |                    |
| 1,65                                     | 14,21        | 0,61         | 0,62                       | 154       | 1,69                                  | 2,7             | 1,58                                   | 21,97        | 0,68         | 0,86  | 23,6                | 21,03                         | 22,7               |
| 1,25                                     | 7,04         | 1,12         | 0,16                       | 154       | 1,60                                  | 2,4             | 1,53                                   | 25,85        | 0,73         | 0,92  | 22,26               | 27,27                         | 18,31              |
| 1,65                                     | 10,97        | 0,61         | 0,48                       | 154       | 1,74                                  | 3,0             | 1,64                                   | 22,78        | 0,62         | 1,0   | 24,53               | 21,01                         | 23,79              |
| 1,54                                     | 12,44        | 0,72         | 0,46                       | 87        | 1,59                                  | 2,3             | 1,55                                   | 22,71        | 0,71         | 0,85  | 22,04               | 23,19                         | 23,39              |

деление прочностных характеристик по высоте образца. Предварительная оценка прочности поверхностного слоя по методу шариковой пробы Цытовича показала, что сцепление грунта в этом слое уменьшается в 20...30 раз по сравнению со средней частью образца и составляет 0,08...0,2 кПа.

Таким образом, исследованные супесчаные и пылеватые песчаные грунты характеризуются значительными деформациями свободного набухания, достигающими 10...25 %, и незначительной при этом величиной давления набухания  $p_{\text{наб}} = 1,5...2,0$  кПа, что с точки зрения устойчивости сооружений на таких грунтах не представляет опасности. В результате свободного набухания при увлажнении происходит разуплотнение грунта. В среднем по образцу объемная масса скелета уменьшается на 10...20 %, а влажность близка к пределу текучести ( $W = 0,8...0,9 W_T$ ). Разуплотнение поверхностного слоя достигает 20...80 %, а влажность его в 1,2...1,7 раза превышает предел текучести. При переменном режиме увлажнения происходит рост деформаций свободного набухания со стабилизацией на уровне двух-, трехкратного значения  $\Delta h_n$  первого цикла насыщения. Сцепление набухшего грунта в 1,8...2,0 раза меньше сцепления водонасыщенного ненабухшего образца и в 3,5...4,0 раза меньше сцепления грунта естественной влажности. Сцепление поверхностного слоя образца в 20...30 раз меньше сцепления грунта в средней его части.

Полученные данные о существенном изменении состояния и свойств супесчаных грунтов при набухании свидетельствует о необходимости учета этих изменений при расчетах устойчивости поверхностных слоев откосов каналов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Б е л я е в А.Н., П о л и в к о Н.А., М и ш у р о в а Г.В. Техническое состояние мелиоративных проводящих каналов и его улучшение. — НТИ МВХ БССР, № 11. — 1984. — С. 25—28.
2. Х м е л е в с к а я Г.В. Устойчивость каналов в набухающих грунтах. — В сб. Управление водным режимом мелиорированных земель. — Мн., 1987. — С. 154—161.
3. Р у т к о в с к и й Б.И. Исследование разуплотняемости насыпных грунтов под влиянием изменения температурного и влажностного режимов / Тр. совещаний по инж.-геол. свойствам горных пород и методам их изучения. Т. II. М., 1957. — С. 111—117.
4. Б у р е н к о в а В.В. Исследование поведения суглинка в горизонтальной трещине под действием фильтрационного потока / Тр. ВНИИ ВОДГЕО, вып. 19. Гидротехника. — М., 1968. — С. 75—78.
5. Строительство на набухающих грунтах. — М., 1968. — 134 с.
6. Г о р ь к о в а И.М. Физико-химические исследования дисперсных осадочных пород в строительных целях. — М., 1975. — 151 с.
7. П о з д н я к о в а В.Д., Р е з н и к о в О.М. Особенности применения набухающих грунтов в земляном полотне / Тр. Днепропетровского ин-та инженеров ж.-д. транспорта, 1979, № 203/28, с. 37—43.
8. Л ы с е н к о М.П. Состав и физико-механические свойства грунтов. — М., 1980. — 272 с.

## ВЛИЯНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ АНИЗОТРОПИИ НА НАЧАЛЬНОЕ НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ОСНОВАНИЙ

При решении задач об устойчивости и консолидации водонасыщенных оснований начальным условием является допущение, введенное в 1925 г. в теорию механики грунтов К. Терцаги [1], о передаче внешней нагрузки в момент приложения полностью на поровую воду. При этом в процессе уплотнения водонасыщенного грунта в результате отжатия воды величина порового давления уменьшается, а эффективные напряжения возрастают до стабилизированных. Данная модель фильтрационной консолидации о перераспределении внешней нагрузки во времени между поровой водой и скелетом основания является общепринятой. Однако допущение о передаче нагрузки в начальный момент времени полностью на воду вызывало разногласия среди исследователей [2...5].

Рассмотрим начальное напряженное состояние водонасыщенного основания для условий плоской деформации при восприятии внешней нагрузки как поровой водой, так и скелетом загружаемого основания. При решении поставленной задачи используем следующие допущения: основание линейно деформируемо при загрузении; скелет грунта принимается невесомым; напорная функция, а следовательно, и система фильтрационных давлений, действующих на скелет грунта во всех точках полуплоскости, удовлетворяют уравнению Лапласа.

Используем известные уравнения равновесия, обобщенного закона Гука при плоской деформации изотропной среды, неразрывности деформаций скелета и напорной фильтрационной функции [6]. На загружаемой поверхности экспериментально определим долю восприятия нагрузки поровой водой  $\beta$  и скелетом основания  $\alpha = 1 - \beta$ .

Математическими преобразованиями сводим задачу к решению дифференциального уравнения неразрывности деформаций, выраженного через функцию Эри  $\varphi(x, y)$  [7].

Для случая плоской деформации однородного изотропного основания решим уравнение неразрывности

$$\frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \varphi}{\partial y^4} = \gamma \frac{1 - 2\mu}{1 - \mu} \nabla^2 H. \quad (1)$$

При  $\nabla^2 H = 0$ , где  $\nabla^2 = \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right)$  – оператор Лапласа, формула (1) принимает вид

$$\frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \varphi}{\partial y^4} = 0.$$

Совместно с граничными условиями

$$\sigma_y(x, 0) = \alpha P(x); \tau_{xy}(x, 0) = 0, H = \begin{cases} \frac{\beta P(x)}{\gamma} & \text{при } -b \leq x \leq b \\ 0 & \text{при } |x| > b \end{cases} \quad (1^*)$$

$$\sigma_y(x, \infty) = \sigma_x(x, \infty) = \tau_{xy}(x, \infty) = H(x, \infty) = 0.$$

В ходе решения были получены формулы для начальных напряжений в изотропном водонасыщенном основании при действии внешней равномерно распределенной нагрузки  $P(x) = P_0$  на участке от  $-b$  до  $b$ :

$$\sigma_y = \frac{\alpha P_0}{\pi} \left[ \left( \operatorname{arctg} \frac{2by}{y^2 b^2 + x^2} + \nu \pi \right) + y \left( \frac{b+x}{y^2 + (b+x)^2} + \frac{b-x}{y^2 + (b-x)^2} \right) \right] + \frac{\beta P_0}{\pi} y \left( \frac{b+x}{y^2 + (b+x)^2} + \frac{b-x}{y^2 + (b-x)^2} \right);$$

$$\sigma_x = \frac{\alpha P_0}{\pi} \left[ \left( \operatorname{arctg} \frac{2by}{y^2 - b^2 + x^2} + \nu \pi \right) - y \left( \frac{b+x}{y^2 + (b+x)^2} + \frac{b-x}{y^2 + (b-x)^2} \right) \right] - \frac{\beta P_0}{\pi} y \left( \frac{b+x}{y^2 + (b+x)^2} + \frac{b-x}{y^2 + (b-x)^2} \right); \quad (2)$$

$$\tau_{xy} = \frac{P_0 y}{\pi} \left( \frac{y}{y^2 + (b-x)^2} - \frac{y}{y^2 + (b+x)^2} \right);$$

$$H = \frac{\beta P_0}{\pi \gamma} \left( \operatorname{arctg} \frac{2by}{y^2 + x^2 - b^2} + \nu \pi \right),$$

где при  $y = 0$ :  $\nu = 1$  при  $-b \leq x \leq b$ ,  $\nu = 0$  при  $|x| > b$ ;  $y > 0$ :  $\nu = 1$  при  $y^2 - b^2 + x^2 < 0$ ,  $\nu = 0$  при  $y^2 - b^2 + x^2 \geq 0$ . (3)

Эти выражения учитывают передачу нагрузки невесомой среде от граничного нагружения скелета грунта и фильтрационных сил от пришедшей в движение воды. При  $\beta = 0$  и  $\alpha = 1$  формулы (2) принимают вид выражений Г.В. Колосова: стабилизированные напряжения для условий плоской задачи линейно деформируемой среды соответственно при завершении процесса консолидации,

Для полученных формул была составлена программа (ЭВМ), позволяющая представить картины распределения напряжений на АППУ. Из распределения эквипотенциалей порового давления и напряжений (рис. 1) видно характерное различие горизонтальных и вертикальных нормальных напряжений, отличное от ранее полученного решения Н.М. Герсеванова [8], основанного на допущении К. Терцаги. По решению Н.М. Герсеванова, горизонтальные и вертикальные нормальные напряжения равны между собой и противоположны по знаку.

Существенным фактором, влияющим на начальное напряженное состоя-

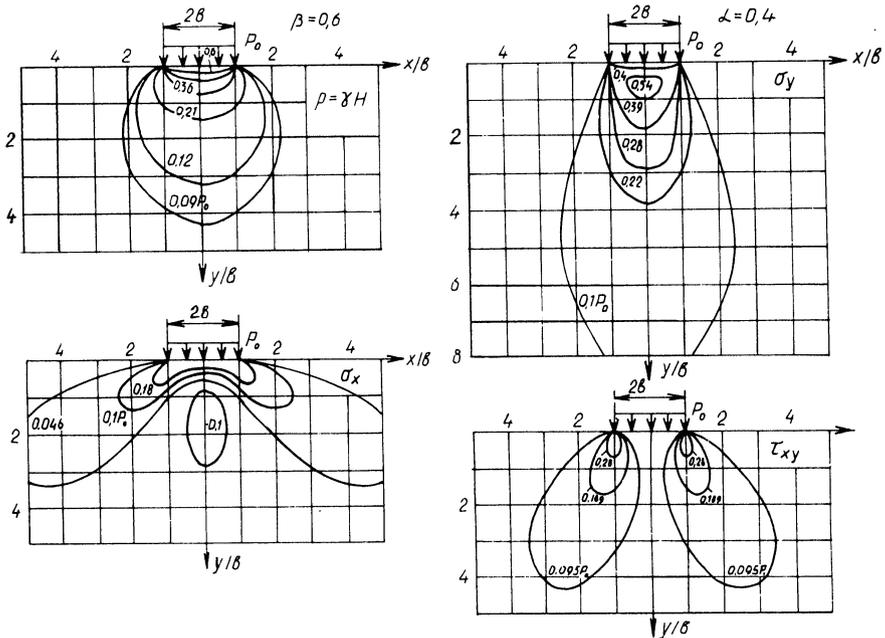


Рис. 1. Распределение порового давления и напряжений в водонасыщенном изотропном основании.

ние, а следовательно, на допускаемую нагрузку строящегося сооружения и возможные его осадки, является анизотропия фильтрационных свойств водонасыщенного основания. Причем для строительно-технологических целей выбора допустимой начальной нагрузки при возведении сооружений из местных материалов на водонасыщенных основаниях начальное напряженное состояние в его строгой математической постановке в момент времени  $t = 0$  не отражает действительной работы основания при загрузении. В то время как начальное напряженное состояние загружаемого водонасыщенного основания в некоторый момент времени  $t \rightarrow 0$  (соответствующий мгновенной осадке), учитывающий тенденцию развития гидродинамического фильтрационного потока из-под возводимого сооружения, более точно соответствует периоду начального загрузки основания. С учетом вышесказанного будем рассматривать анизотропию проницаемости грунтов, характеризуемую отношением

$$n^2 = \frac{K_x}{K_y},$$

где  $K_x$ ,  $K_y$  – коэффициенты фильтрации грунта, слагающего основание соответственно в горизонтальном и вертикальном направлениях.

В этом случае уравнение напорной фильтрационной функции для плоской задачи примет вид [9, 10]

$$K_x \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = 0 \text{ или } n^2 \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = 0. \quad (4)$$

При данной постановке задачи необходимо решать уравнение неразрывности скелета грунта (1) совместно с уравнением напорной функции (4) при граничных условиях (1\*), Для случая равномерно распределенной нагрузки  $P(x) = P_0$ , действующей на участке от  $-b$  до  $b$ , были получены формулы для определения напряжений и порового давления  $p = \gamma H$ :

$$\begin{aligned} \sigma_y = & \frac{aP_0}{\pi} \left( \left( \operatorname{arctg} \frac{2by}{y^2 - b^2 + x^2} + \nu\pi \right) + y \left( \frac{b+x}{y^2 + (b+x)^2} + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{b-x}{y^2 + (b-x)^2} \right) \right) + \frac{\beta P_0}{\pi} \left\{ (\gamma+1) \left( \operatorname{arctg} \frac{2by}{y^2 - b^2 + x^2} + \nu\pi \right) - \right. \\ & - (\gamma n - \gamma - 1)y \left( \frac{b+x}{y^2 + (b+x)^2} + \frac{b-x}{y^2 + (b-x)^2} \right) - \\ & \left. - (\gamma+1) \left( \operatorname{arctg} \frac{2nby}{n^2 y^2 - b^2 + x^2} + \nu\pi \right) \right\}; \\ \sigma_x = & \frac{aP_0}{\pi} \left( \left( \operatorname{arctg} \frac{2by}{y^2 - b^2 + x^2} + \nu\pi \right) - y \left( \frac{b+x}{y^2 + (b+x)^2} + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{b-x}{y^2 + (b-x)^2} \right) \right) + \frac{\beta P_0}{\pi} \left\{ (\gamma n^2 - 1) \left( \operatorname{arctg} \frac{2nby}{n^2 y^2 - b^2 + x^2} + \nu\pi \right) - \right. \\ & - (2\gamma n - \gamma - 1) \left( \operatorname{arctg} \frac{2by}{y^2 - b^2 + x^2} + \nu\pi \right) + (\gamma n + \gamma - 1)y \times \\ & \left. \times \left( \frac{b+x}{y^2 + (b+x)^2} + \frac{b-x}{y^2 + (b-x)^2} \right) \right\}; \quad (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau_{xy} = & \frac{aP_0}{\pi} y \left( \frac{y}{y^2 + (b-x)^2} - \frac{y}{y^2 + (b+x)^2} \right) + \\ & + (\gamma n - \gamma - 1) y \left( \frac{y}{y^2 + (b-x)^2} - \frac{y}{y^2 + (b+x)^2} \right) \Big\} , \end{aligned}$$

$$H = \frac{\beta P_0}{\pi \gamma} \left( \operatorname{arctg} \frac{2nby}{n^2 y^2 - b^2 + x^2} + \nu\pi \right),$$

где  $\gamma = \frac{1 - 2\mu}{(1 - \mu)(n^2 - 1)}$ , для определения  $\nu$  см. (3).

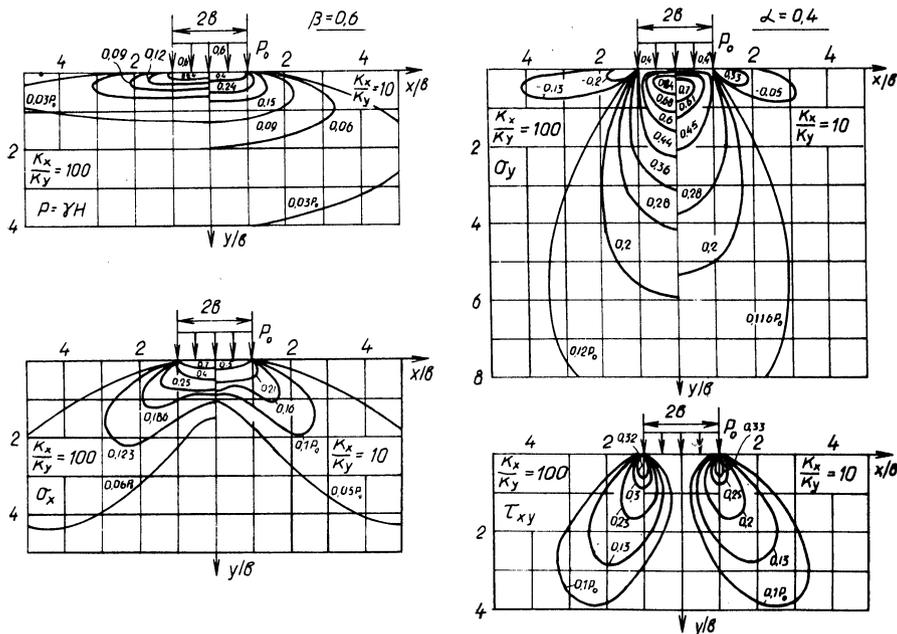


Рис. 2. Распределение порового давления и напряжений в основании с преобладающей горизонтальной водопроницаемостью.

Данные формулы удовлетворяют поставленным граничным условиям (1\*), Для изотропного случая при  $n^2 = 1$  формулы (5) принимают вид (2).

По формулам (5), описывающим распределение напряжений и порового давления в анизотропном по водопроницаемости водонасыщенном основании от действия единичной равномерно распределенной полосовой нагрузки при помощи разработанной программы для ЭВМ построены картины распределения напряжений и порового давления для различных случаев фильтрационной анизотропии (рис. 2, 3).

Из рис. 2 видно, что с увеличением водопроницаемости в горизонтальном направлении происходит бóльшая в сравнении с изотропным случаем концентрация порового давления под нагрузкой и в стороны от нее. При этом вертикальные напряжения в скелете грунта  $\sigma_y$  под площадкой загрузки больше по численным значениям по сравнению с изотропным основанием на 20–30 % в зависимости от величины представленных значений показателя фильтрационной анизотропии  $n^2$ . По краям нагрузки появляются зоны с отрицательным значением напряжений  $\sigma_y$  до 20 % от действующей нагрузки. Это объясняет встречающиеся в строительной практике выпоры, образующиеся по краям загружаемой площади водонасыщенного основания с преобладающей горизонтальной проницаемостью грунтов, таких как ленточные глины, торфы, сапропели, имеющие показатель фильтрационной анизотропии  $n^2 = 10 \dots 100$  (в зависимости от вида и уплотненности грунта).

Распределение порового давления в глубь массива под возводимое соору-

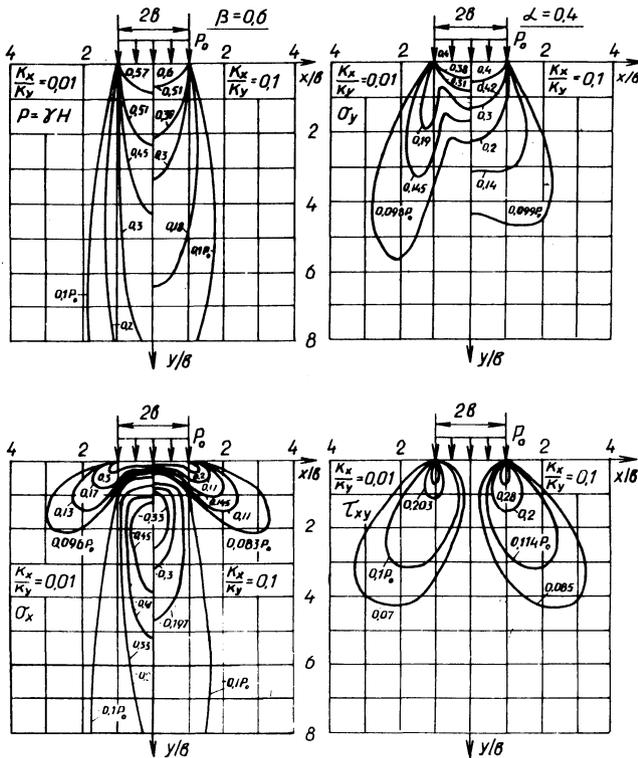


Рис. 3. Распределение порового давления и напряжений в основании с преобладающей вертикальной водопроницаемостью.

жение при преобладании водопроницаемости основания в вертикальном направлении (см. рис. 3) приводит к уменьшению вертикальных напряжений  $\sigma_y$  в скелете основания и вызывает возникновение значительных (до 45 % от  $P_0$  при  $n^2 = 1/100$ ) растягивающих горизонтальных напряжений  $\sigma_x$  на большую глубину основания (до 4 полуширин нагружения  $b$ ). Этим объясняются большие мгновенные осадки сооружений, возводимых на основаниях с преобладающей вертикальной проницаемостью грунтов (например, лессы  $n^2 = 1/10...1/50...1/100$ ).

Таким образом, начальное напряженное состояние оснований необходимо рассматривать с учетом восприятия внешней нагрузки как поровой водой, так и скелетом основания с учетом фильтрационной анизотропии основания для более достоверной оценки несущей способности, конечных осадков и протекания их во времени.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Герцаги К. Теория механики грунтов. — М., 1961. — 507 с.
2. Флорин В.А. Основы механики грунтов. — М.; Л., 1961. Т. 2. — 160 с.
3. Денисов Н.Я. О природе деформаций глинистых пород. — М. — 1951, — 199 с.
4. Веригин Н.Н. Об уплот-

нении грунтов под нагрузкой // Прикладная механика и теоретическая физика. — 1961. — № 1. — 31 с. 5. Цытович Н.А. и др. Экспериментальные исследования порового давления в водонасыщенных грунтах // Строительство на слабых грунтах. — Рига, — 1970. — 74 с. 6. Соболевский С.В., Павловец В.В. К вопросу о начальном напряженном состоянии анизотропного водонасыщенного основания // Водное хоз-во и гидротехнич. стр-во. — 1988. — Вып. 17. — 213 с. 7. Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела. — М.; Л. — 1950. — 299 с. 8. Герсеванов Н.М. Основы динамики грунтовой массы. — М. — 1937. — 241 с. 9. Соболевский Ю.А. Водонасыщенные откосы и основания. — Мн. — 1975. — 398 с. 10. Полубаринов-Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод. — М. — 1977. — 664 с.

УДК 624.131.52

Н.Д. БАННИКОВ

### РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗБЫТОЧНЫХ НАПОРОВ И НАПРЯЖЕНИЙ ВО ВРЕМЕНИ В ТРАНСВЕРСАЛЬНО-ИЗОТРОПНЫХ ОСНОВАНИЯХ ПРИ ИХ ЗАГРУЖЕНИИ

При строительстве гидротехнических сооружений часто в качестве оснований используют водонасыщенные грунты, которые имеют различные деформативные характеристики в горизонтальном  $E_x$  и вертикальном  $E_z$  направлениях. Такие грунты принято называть трансверсально-изотропными. К ним относятся ленточные глины, лессовые и торфяные отложения. По данным исследователей, отношение модулей деформации их ( $n = E_x/E_z$ ) колеблется в пределах 1–1,5...2.

Наличие механической анизотропии вносит коррективы в напряженно-деформируемое состояние таких оснований, и протекающие процессы должны отличаться от изотропных. Идет поиск расчетных зависимостей, учитывающих эти особенности грунтов.

Одной из важнейших задач является умение прогнозировать избыточные напоры, которые возникают в таких основаниях при их мгновенном нагружении. При изучении этого вопроса нами рассмотрены следующие уравнения:

$$\epsilon_x = \beta_{11} \sigma_x + \beta_{12} \sigma_z; \quad (1)$$

$$\epsilon_z = \beta_{12} \sigma_x + \beta_{22} \sigma_z; \quad (2)$$

$$\sigma_x = \sigma_x^* - \gamma_w H; \quad \sigma_z = \sigma_z^* - \gamma_w H; \quad (3)$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} = (1 + e_0) \left( k_x \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + k_z \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} \right); \quad (4)$$

$$\epsilon_v = \epsilon_x + \epsilon_z = (e_0 - e)/(1 + e_0), \quad (5)$$

где  $\epsilon_x, \epsilon_z$  — относительные деформации в направлении осей  $x$  и  $z$ ;  $\beta_{11} = (1 - \nu_1^2)/E_x$ ;  $\beta_{22} = (1 - \nu_2^2 \frac{E_x}{E_z})/E_z$ ;  $\beta_{12} = -\nu_2(1 + \nu_1)/E_z$ ;  $\sigma_x^*, \sigma_z^*$  — нор-

мальные стабилизированные конечные напряжения в скелете грунта после расцеивания избыточных напоров, мПа;  $\gamma_w$  — удельный вес воды, мН/м<sup>3</sup>;  $k_x, k_z$  — коэффициенты фильтрации соответственно в горизонтальном и вертикальном направлениях, м/с;  $H$  — избыточные напоры в поровой воде для любого момента времени, м;  $e_0, e$  — коэффициенты пористости для начального состояния и на любой момент времени;  $\nu_1$  — коэффициент Пуассона, характеризующий поперечные изменения в плоскости изотропии для нагрузок в той же плоскости;  $\nu_2$  — то же, для нагрузок по направлению, нормальному к плоскости изотропии;  $E_x, E_z$  — модули общих деформаций для плоскости изотропии и перпендикулярной к ней, мПа.

Уравнения (1), (2) применяются в теории упругости [1] для оценки напряженного состояния трансверсально-изотропного основания. В случае, если грунты водонасыщены, к этим выражениям необходимо добавить уравнения Флорина (3) и (4), так как нагрузка на скелет грунта передается по мере оттока воды.

Однако приведенных уравнений недостаточно, потому что неизвестна связь приращения коэффициента пористости и избыточного напора во времени. Для решения этого вопроса нами было введено выражение (5). Тогда после дифференцирования уравнений (1)...(3) по времени и подстановки их в (5), получили

$$\frac{\partial e}{\partial t} = (1 + e) \gamma_w (\beta_{11} + 2\beta_{12} + \beta_{22}) \frac{\partial H}{\partial t} \quad (6)$$

Объединив уравнения (4) и (6), нашли

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{E_z}{\gamma_w B} \left( k_x \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + k_z \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} \right), \quad (7)$$

$$\text{где } B = \frac{1 - \nu_1^2}{n} - 2\nu_2(1 + \nu_1) - \nu_2^2 n + 1.$$

В (1), (2) и (7) от свободного модуля общей деформации перешли к компрессионному при условии, что уплотняющая нагрузка прикладывалась перпендикулярно к слоистости основания. Тогда

$$E_z = (1 + e_0) (1 - 2\lambda\nu_2) / C_{cz}, \quad (8)$$

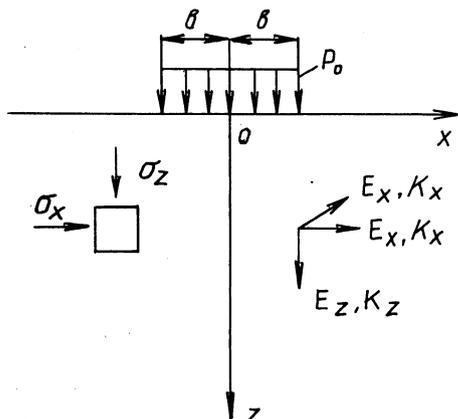
$$\text{где } C_{cz} = (e_0 - e) / (P - P_0); \quad \lambda = n\nu_2 / (1 - \nu_1).$$

С учетом (8) уравнение консолидации трансверсально-изотропного основания (7) приняло вид

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{(1 + e_0) (1 - 2\lambda\nu_2)}{\gamma_w C_{cz} B} \left( k_x \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + k_z \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} \right) \quad (9)$$

и представляет собой основное дифференциальное уравнение, определяющее скорость объемного уплотнения.

Рис. 1. Расчетная схема загрузки уплотняющего основания.



Если в (9) принять  $\nu_1 = \nu_2 = \nu$ ,  $n = 1$ , то оно в точности совпадает с уравнением Флорина [2]. К (9) необходимо добавить условие, определяющее начальное состояние в момент приложения нагрузки. Оно нами найдено ранее [3]:

$$H_0 = \frac{1}{\gamma_w} [\sigma_x^* + A (\sigma_z^* - \sigma_x^*)], \quad (10)$$

$$\text{где } A = \frac{1 - \nu_2^2 n - \nu_2 - \nu_2 \nu_1}{((1 - \nu_1^2)/n) - 2\nu_2(1 + \nu_1) - \nu_2^2 n + 1}$$

Таким образом, (1)–(3), (9) и (10) определяют напряженное состояние в любой точке транструпного основания при их загрузении.

На примере приложения к таким основаниям равномерно распределенной полосовой нагрузки (рис. 1) нами исследовано влияние и роль коэффициентов бокового расширения ( $\nu_1, \nu_2$ ) и модулей деформаций ( $E_x, E_z$ ) на распределение напряжений и избыточных напоров по глубине. Для этих целей использовали ранее полученные выражения [3]:

$$\sigma_z^* = \frac{P_0}{\pi(m-1)} \left[ m \left( \operatorname{arctg} \frac{x+b}{z} - \operatorname{arctg} \frac{x-b}{z} \right) - \operatorname{arctg} \frac{x+b}{zm} + \operatorname{arctg} \frac{x-b}{zm} \right]; \quad (11)$$

$$\sigma_x^* = \frac{P_0 m}{\pi(m-1)} \left[ m \left( \operatorname{arctg} \frac{x+b}{zm} - \operatorname{arctg} \frac{x-b}{zm} \right) - \operatorname{arctg} \frac{x+b}{z} + \operatorname{arctg} \frac{x-b}{z} \right], \quad (12)$$

где  $m = \sqrt{\beta_{22}/\beta_{11}}$ ;  $P_0$  – интенсивность равномерно распределенной полосовой нагрузки, МПа.

Значения напряжений и порового давления под центром равномерно распределенной полосовой нагрузки  
(при  $E_x/E_z = 1...4$ )

| $z/b$ | $\nu_1 = \nu_2 = 0,35 \quad E_x/E_z = 1$ |                    |                | $\nu_1 = \nu_2 = 0,35 \quad E_x/E_z = 2$ |                    |                | $\nu_1 = 0,35; \nu_2 = 0$<br>$E_x/E_z = 2$ |                    |                | $\nu_1 = 0,5; \nu_2 = 0,2$<br>$E_x/E_z = 2$ |                    |                | $\nu_1 = \nu_2 = 0,2$<br>$E_x/E_z = 4$ |                    |                |
|-------|--|--------------------|----------------|--|--------------------|----------------|--|--------------------|----------------|---|--------------------|----------------|--|--------------------|----------------|
|       | $\bar{\sigma}_z^*$                       | $\bar{\sigma}_x^*$ | $\bar{P}_{wo}$ | $\bar{\sigma}_z^*$                       | $\bar{\sigma}_x^*$ | $\bar{P}_{wo}$ | $\bar{\sigma}_z^*$                         | $\bar{\sigma}_x^*$ | $\bar{P}_{wo}$ | $\bar{\sigma}_z^*$                          | $\bar{\sigma}_x^*$ | $\bar{P}_{wo}$ | $\bar{\sigma}_z^*$                     | $\bar{\sigma}_x^*$ | $\bar{P}_{wo}$ |
| 0,5   | 960                                      | 450                | 705            | 943                                      | 514                | 1000           | 933  | 543                | 814            | 931   | 550                | 889            | 916                                    | 581                | 916            |
| 1     | 820                                      | 180                | 500            | 774                                      | 185                | 654            | 750  | 184                | 578            | 744   | 184                | 684            | 715                                    | 182                | 715            |
| 1,5   | 668                                      | 80                 | 374            | 615                                      | 77                 | 688            | 589  | 75                 | 432            | 583   | 74                 | 528            | 554                                    | 72                 | 554            |
| 2     | 550                                      | 41                 | 295            | 498                                      | 38                 | 561            | 475  | 36                 | 341            | 469   | 36                 | 422            | 443                                    | 34                 | 443            |
| 2,5   | 462                                      | 23                 | 242            | 415                                      | 21                 | 468            | 394  | 20                 | 280            | 389   | 20                 | 349            | 366                                    | 19                 | 360            |
| 3     | 396                                      | 14                 | 205            | 354                                      | 13                 | 400            | 335  | 12                 | 237            | 331   | 12                 | 296            | 311                                    | 11                 | 311            |
| 3,5   | 345                                      | 9                  | 177            | 308                                      | 8                  | 348            | 291  | 8                  | 205            | 287   | 8                  | 257            | 270                                    | 7                  | 270            |
| 4     | 306                                      | 6                  | 156            | 272                                      | 5,5                | 308            | 257  | 5                  | 180            | 253   | 5                  | 227            | 238                                    | 5                  | 238            |
| 4,5   | 274                                      | 4                  | 139            | 243                                      | 4                  | 276            | 230  | 4                  | 161            | 227   | 4                  | 203            | 213                                    | 3                  | 213            |
| 5     | 248                                      | 3                  | 126            | 220                                      | 2,9                | 249            | 208  | 3                  | 145            | 205   | 3                  | 183            | 192                                    | 3                  | 192            |
| 5,5   | 226                                      | 2                  | 114            | 201                                      | 2,2                | 227            | 189  | 2                  | 132            | 187   | 2                  | 167            | 175                                    | 2                  | 175            |
| 6     | 208                                      | 1,9                | 105            | 184                                      | 1,7                | 209            | 174  | 1,6                | 121            | 172   | 1,6                | 153            | 161                                    | 2                  | 161            |
| 6,5   | 193                                      | 1,5                | 97             | 170                                      | 1,3                | 193            | 161  | 1,3                | 112            | 159   | 1,2                | 142            | 149                                    | 1                  | 149            |
| 7     | 179                                      | 1,2                | 90             | 159                                      | 1,1                | 180            | 150  | 1                  | 104            | 148   | 1                  | 132            | 138                                    | 0,0                | 138            |

Примечание. В таблице введены обозначения:  $\bar{\sigma}_z^* = \sigma_z^* \cdot 10^3$ ;  $\bar{\sigma}_x^* = \sigma_x^* \cdot 10^3$ ;  $\bar{P}_{wo} = \gamma_{wo} \cdot 10^3$ .

Значения напряжений и порового давления под центром равномерно распределенной полосовой нагрузки  
(при  $E_x/E_z = 4 \dots 0,25$ )

| $z/b$ | $\nu_1 = 0,5; \nu_2 = 0,1$<br>$E_x/E_z = 4$ |                    |                | $\nu_1 = \nu_2 = 0,35$<br>$E_x/E_z = 0,5$ |                    |                | $\nu_1 = 0; \nu_2 = 0,35$<br>$E_x/E_z = 0,5$ |                    |                | $\nu_1 = \nu_2 = 0,35$<br>$E_x/E_z = 0,25$ |                    |                | $\nu_1 = 0; \nu_2 = 0,35$<br>$E_x/E_z = 0,25$ |                    |                |
|-------|---|--------------------|----------------|---|--------------------|----------------|--|--------------------|----------------|--|--------------------|----------------|---|--------------------|----------------|
|       | $\bar{\sigma}_z^*$                          | $\bar{\sigma}_x^*$ | $\bar{P}_{wo}$ | $\bar{\sigma}_z^*$                        | $\bar{\sigma}_x^*$ | $\bar{P}_{wo}$ | $\bar{\sigma}_z^*$                           | $\bar{\sigma}_x^*$ | $\bar{P}_{wo}$ | $\bar{\sigma}_z^*$                         | $\bar{\sigma}_x^*$ | $\bar{P}_{wo}$ | $\bar{\sigma}_z^*$                            | $\bar{\sigma}_x^*$ | $\bar{P}_{wo}$ |
| 0,5   | 898   | 605                | 885            | 972                                       | 372                | 532            | 975  | 365                | 519            | 982  | 294                | 391            | 984   | 279                | 381            |
| 1     | 686   | 178                | 664            | 865                                       | 171                | 356            | 874  | 167                | 353            | 904  | 151                | 257            | 911   | 146                | 257            |
| 1,5   | 526   | 69                 | 506            | 733                                       | 82                 | 256            | 746  | 82                 | 257            | 797  | 80                 | 181            | 809   | 79                 | 185            |
| 2     | 419   | 32                 | 402            | 618                                       | 43                 | 197            | 632  | 44                 | 199            | 693  | 45                 | 137            | 708   | 45                 | 141            |
| 2,5   | 346   | 18                 | 331            | 527                                       | 25                 | 159            | 541  | 26                 | 161            | 604  | 27                 | 109            | 621   | 28                 | 114            |
| 3     | 293   | 10                 | 281            | 456                                       | 16                 | 133            | 470  | 16                 | 135            | 531  | 17                 | 90             | 548   | 18                 | 95             |
| 3,5   | 254   | 6,7                | 243            | 400                                       | 10                 | 114            | 413  | 11                 | 116            | 472  | 12                 | 77             | 488   | 12                 | 81             |
| 4     | 224   | 4,6                | 214            | 356                                       | 7                  | 100            | 368  | 7                  | 102            | 423  | 8                  | 67             | 438   | 8                  | 71             |
| 4,5   | 200   | 3,2                | 191            | 320                                       | 5                  | 89             | 331  | 5                  | 91             | 382  | 5,9                | 59             | 397   | 6,1                | 63             |
| 5     | 181   | 2,4                | 173            | 291                                       | 3,8                | 80             | 300  | 3,9                | 82             | 349  | 4,4                | 53             | 362   | 4,6                | 56             |
| 5,5   | 165   | 1,8                | 158            | 266                                       | 2,9                | 73             | 275  | 3                  | 75             | 320  | 3,4                | 48             | 333   | 3,5                | 51             |
| 6     | 151   | 1,4                | 145            | 245                                       | 2,2                | 67             | 254  | 2                  | 68             | 295  | 2,6                | 44             | 307   | 2,7                | 47             |
| 6,5   | 140   | 1                  | 134            | 227                                       | 1,8                | 62             | 235  | 1,8                | 63             | 274  | 2,1                | 40             | 286   | 2,2                | 43             |
| 7     | 130   | 0,0                | 124            | 211                                       | 1,4                | 57             | 219  | 1,5                | 59             | 256  | 1,7                | 38             | 267   | 1,8                | 40             |

Примечание. В таблице введены обозначения:  $\bar{\sigma}_z^* = \sigma_z^* \cdot 10^3$ ;  $\bar{\sigma}_x^* = \sigma_x^* \cdot 10^3$ ;  $\bar{P}_{wo} = \gamma_w \cdot \text{Н} \cdot 10^3$ .

По полученным зависимостям составлены табл. 1 и 2 для различных соотношений коэффициентов бокового расширения и модулей деформаций. При их назначении исходили из условия положительности упругого потенциала для плоского деформированного состояния, т.е.

$$D = 1 - \nu_1 - 2n\nu_2^2 > 0, \quad (13)$$

где  $D$  – угловой минор системы уравнений (1), (2). Из таблиц видно, что конечные напряжения довольно чувствительны к отношению модулей и почти не чувствительны к коэффициентам бокового расширения.

Избыточное поровое давление, возникающее в основании при приложении нагрузки, принимает максимальное значение для коэффициентов бокового расширения, равных друг другу ( $\nu_1 = \nu_2$ ). Таким образом, представляется возможным рекомендовать в расчетах принятие коэффициентов бокового расширения как для изотропного основания при соблюдении условия (13), что значительно упрощает вопросы прогнозирования поведения оснований.

Анализ таблиц позволил сделать вывод, что если искусственно создавать механическую анизотропию с преобладанием модуля общей деформации в вертикальном направлении, то можно до минимума свести влияние фактора порового давления на устойчивость основания и основную долю нагрузки передавать на скелет грунта. Это целесообразно делать при уплотнении слабых оснований (торфяных, илистых и т.д.). Например, при устройстве песчаных вертикальных дрен с последующим уплотнением трамбовками. Однако в этом случае возможна большая осадка по сравнению с изотропным основанием, так как вертикальные напряжения и активная зона сжатия значительно увеличиваются. И, наконец, если необходимо уменьшить активную зону сжатия, применяют горизонтальное армирование, т.е. устройство оснований с преобладающим модулем общей деформации в горизонтальном направлении. При этом избыточное поровое давление по сравнению с изотропным основанием возрастает, что важно учитывать при определении безопасной нагрузки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Л е х н и ц к и й С.Г. Теория упругости анизотропного тела. – М., 1977. – 415 с.
2. Ф л о р и н В.А. Основы механики грунтов. – М., 1961. – 543 с.
3. Б а н н и к о в Н.Д. Начальное поровое давление в трансверсально-изотропных основаниях // Прибалтийская геотехника VI. – Таллинн, 1986. – С. 145–148.

УДК 624.138

ГУЛЛА ЙОЗЕФ

### ВОДОУТЛИВ В КОТЛОВАНАХ ВНУТРИ ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫХ ВАНН\*

На реке Дунай у дер. Габчиково вблизи границы ЧССР и ВНР возводится гидроузел, в состав которого входят ГЭС проектной мощностью 720 МВ и судоходный шлюз. Особенностью инженерно-геологических условий площадки

\* Переводчики: Ю.А. Соболевский, М.И. Никитенко.

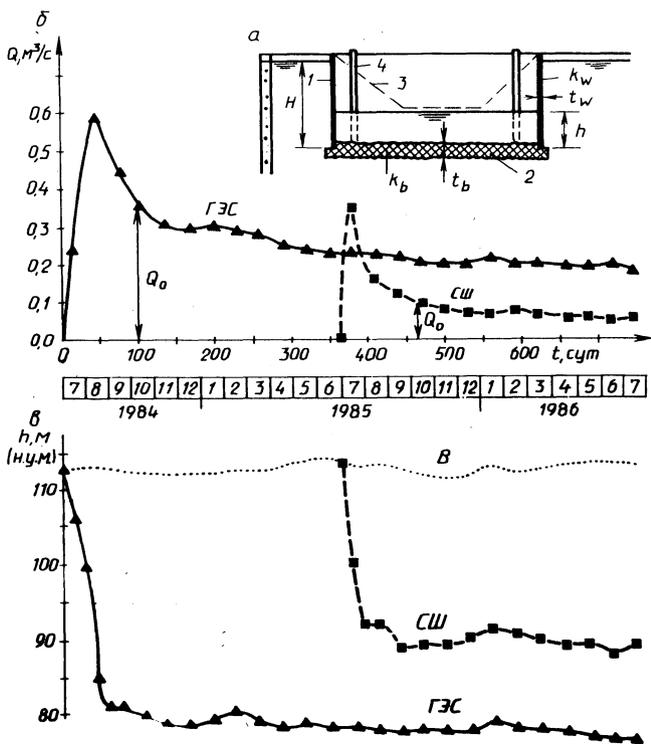


Рис. 1. Изменение расходов и соответствующих положений уровней воды в противοфильтрационных ваннах для ГЭС и судоходных шлюзов (СШ) гидроузла "Габчиково": а – расчетная схема ванны; б – расходы воды; в – уровень воды; 1 – противοфильтрационные стены; 2 – противοфильтрационное дно; 3 – откосный котлован; 4 – буровые водопонизительные колодцы; В – уровни воды снаружι ванны.

является залегание на глубину 360 м сильноводопроницаемых гравийных грунтов. Для защиты котлованов под ГЭС и шлюз от притока подземных вод устроены противοфильтрационные ванны, состоящие из замкнутой по контуру вертикальной диафрагмы из самотвердеющей суспензии, ниже дна котлованов – слой искусственного водоупора из заинцементированного грунта. Эти противοфильтрационные ванны – самые крупные в мире.

Противοфильтрационные диафрагмы были выполнены чехословацким предприятием "Гидростав-Братислава" методом "стена в грунте" с разработкой траншеи механическими экскаваторами с гидравлическими грейферами на жестких и телескопических штангах. Толщина диафрагм 0,6, глубина – 47,5 и 55 м соответственно для котлованов под ГЭС и судоходный шлюз.

Чехословацким предприятием "Вагостав-Жилина" иньектированием закрепляющих (глиноцементных и химических) растворов в грунт выполнены днища водозащитных ванн. Иньекционные трубы располагались по площадям котлованов в узлах квадратных сеток с шагом 7 м.

После осуществления водоотлива изнутри гидроизолированных грунтовых массивов вскрыты котлованы с пологими откосами. Наиболее эффективным

оказался глубинный водоотлив из буровых скважин, доведенных до искусственного водоупора.

Количество просочившейся через стенки противофильтрационной ванны (рис. 1, а) грунтовой воды

$$Q = k_w L_w \frac{H^2 - h^2}{2t_w}, \quad (1)$$

где  $k_w$  — коэффициент фильтрации стен ванны;  $L_w$  — длина стен в плане, м;  $H$  — глубина стен ниже уровня подземной воды до кровли днища ванны, м;  $h$  — глубина воды внутри ванны после откачки, м;  $t_w$  — толщина стен, м.

Количество воды, поступающей через водонепроницаемое (заинжецированное) днище ванны:

$$Q_b = k_b A_b \frac{H - h}{t_b}, \quad (2)$$

где  $k_b$  — коэффициент фильтрации днища ванны, м/с;  $A_b$  — площадь днища, м<sup>2</sup>;  $t_b$  — толщина днища, м.

Количество воды, которое предположительно будет поступать из пор грунта при водоотливе и стабилизации ее уровня в пределах объема ванны:

$$Q_s = n_a A_b V_1,$$

где  $n_a$  — активная пористость грунта;  $V_1$  — скорость понижения уровня воды, м/с.

Общее количество откачиваемой из котлована воды

$$Q = Q_w + Q_b + Q_s.$$

Очевидно, что значение не постоянно и будет изменяться во времени. При проектировании системы водоотлива в качестве определяющей считаем величину  $Q_{\max}$ , которая возникает при достижении требуемого снижения уровня воды.

Наиболее эффективен глубинный водоотлив из буровых скважин. Это обусловлено надежным контролем эффективности противофильтрационных элементов и возможностью их доуплотнения в случае необходимости еще перед началом отрывки котлована. Требуемое количество буровых скважин

$$n = Q_{\max} / q_{\max},$$

где  $q_{\max}$  — максимальное количество воды, откачиваемое из одного колодца, м<sup>3</sup>;

$$q_{\max} = A_{\min} V_{\max},$$

где  $A_{\min}$  — минимальная площадь притока воды в колодец, м<sup>2</sup>;  $V_{\max}$  — максимальная входящая скорость притока воды, при которой обеспечивается фильтрационная устойчивость грунта вокруг буровой скважины, м/с. Для ее вычисления рекомендуется предложенное О. Тявдой [5] уравнение

$$V_{\max} = 80 \sqrt[3]{k},$$

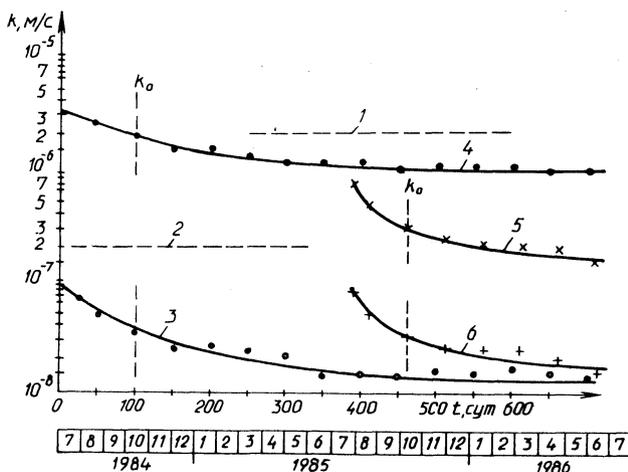


Рис. 2. Изменение водопроницаемости противofильтрационных элементов на объектах гидроузла "Габчиково":

1, 2 — по проекту для дна и стен противofильтрационных ванн; 3, 4 и 5, 6 — фактическое для дна и стен ванн соответственно электростанции судоходных шлюзов.

где  $k$  — коэффициент фильтрации грунта, м/с. Для большего эффекта снижения уровня воды погружные насосы следует подбирать по величине  $q_{\max}$ .

Поверхностный водоотлив из системы канавок и дрен влечет за собой пониженные показатели откачиваемого количества воды  $Q_{\max}$ . При этом может благоприятно проявиться фильтрационная анизотропия массива грунта между дном котлована и поверхностью горизонтальной противofильтрационного элемента. Недостаток же поверхностного водоотлива заключается в невозможности контроля эффективности противofильтрационных элементов ванны перед отрывкой котлована и осложнении земляных работ. Поверхностный водоотлив, однако, можно использовать как дополняющий глубинный при неожиданном уменьшении его производительности или увеличении водопроницаемости противofильтрационных элементов.

Характерное изменение во времени количества воды, откачиваемой из котлована в противofильтрационной ванне, представлено на рис. 2. Пиковый расход проявляется во время максимального понижения уровня подземной воды. Затем следует относительно быстрое уменьшение дебита при достижении установившегося уровня, что обусловлено исчезновением доли воды, поступающей из пор грунта  $Q_s$ . При установившемся процессе фильтрации из котлована откачивается лишь вода, просочившаяся через противofильтрационные стенки  $Q_w$  и заинъецированное днище  $Q_b$ , а также атмосферные осадки. При качественных противofильтрационных элементах непрерывно уменьшается количество воды ( $Q_t \leq Q_0$ ), которое нужно откачивать для поддержания постоянной разности уровней  $H - h$ . Это может быть обусловлено естественным снижением водопроницаемости противofильтрационных элементов за счет коагуляции и химических процессов уплотнения либо изменениями в систе-

ме откачки при перестановке насосов в другие колодцы или переходе от глубинного к поверхностному водоотливу.

Положение уровней подземной воды с внешней стороны противофильтрационных ванн, на которые оказывает влияние вода русла реки Дунай, показано на рис. 2 точками. Результаты свидетельствуют о том, что в данных условиях процесс неустановившейся фильтрации длился приблизительно сто дней. Соотношения  $Q_{\max}/Q_0 = 0,6:0,38 = 1,6$  для ГЭС и  $Q_{\max}/Q_0 = 0,35:0,10 = 3,5$  для судоходного шлюза свидетельствуют о наличии значительных резервов в системе водоотлива для длительной эксплуатации, если при ее проектировании исходить из максимального количества  $Q_{\max}$ . Сравнительно высокие их значения в котловане судоходного шлюза, по всей вероятности, обусловлены интенсивным процессом понижения уровня воды в начальной фазе.

Если систему координат сместить к началу установившегося процесса фильтрации и определить соотношения откачиваемых количеств воды в определенное время  $Q_t$  к начальным значениям  $Q_0$ , то получим для котлованов в Габчиково зависимость, аппроксимируемую выражением

$$Q_t/Q_0 = 1,9t^{-0,2}, \quad (3)$$

которая не дает достоверных данных при малых значениях отрезков времени, но для  $t = 50$  дн позволяет определить относительные величины  $Q_t/Q_0$ , хорошо соответствующие результатам измерений. Согласно зависимости (3), можно прогнозировать расходы на дальнейший период строительства. Например, если в июле 1986 г. из котлована ГЭС откачивали  $Q_t = 0,2 \text{ м}^3/\text{с}$ , то в июле 1989 г. можно предположить  $Q_t = 0,16 \text{ м}^3/\text{с}$ . В эти же сроки для судоходного шлюза значений  $Q_t = 0,062 \text{ м}^3/\text{с}$  уменьшится до  $Q_t = 0,042 \text{ м}^3/\text{с}$ . Предпосылкой реальности подобного прогноза является обеспечение стабильности работы противофильтрационных элементов. Посредством экстраполяции можно также определить ориентировочные данные о расходах через противофильтрационные стены и дно ванн в период неустановившейся фильтрации.

При устройстве противофильтрационных ванн в Габчиково были сначала выполнены траншейные стены толщиной  $t_w = 0,6 \text{ м}$ , а затем заинъецированы днища. Из-за грубозернистого сложения грунта и вследствие этого значительного расхода глиноцементной суспензии при большом давлении инъекции днища ванн оказались значительно толще запроектированных и составили для котлована ГЭС  $t_b = 14 \text{ м}$  (по проекту 7 м), судоходного шлюза  $t_b = 8,6 \text{ м}$  (по проекту 5 м). Реальные значения толщин противофильтрационных днищ потребовали уточнения их водопроницаемости [2, 3].

Коэффициент фильтрации противофильтрационных стен и днищ можно вычислить из уравнений (1) и (2) при известных соответствующих расходах  $Q_w$  и  $Q_b$ . Результат наших измерений показал, что разница расходов воды через стены и дно во времени существенно не изменяется. Для котлована ГЭС

$$Q_w = 0,1(Q - Q_s); \quad Q_b = 0,9(Q - Q_s);$$

для судоходного шлюза

$$Q_w = 0,35(Q - Q_s); \quad Q_b = 0,65(Q - Q_s).$$

Значения  $k_0$  отвечают расходам  $Q_0$  в начале установившейся фильтрации

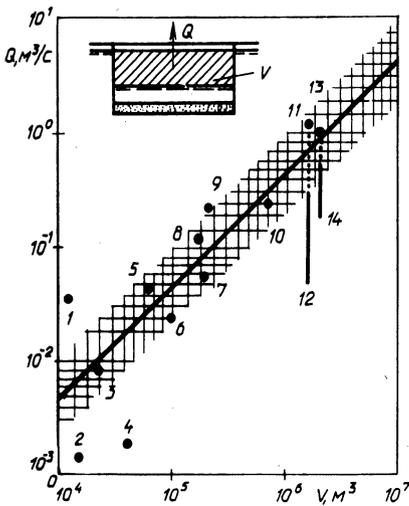


Рис. 3. Сравнение качества противофильтрационных элементов на строительных котлованах различных объектов.

(см. рис. 2). Значения коэффициентов фильтрации в период неустановившейся фильтрации определены экстраполяцией, поэтому они носят ориентировочный характер. Во время откачки максимального количества воды  $Q_{\max}$  коэффициенты фильтрации противофильтрационных стен достигали  $k = 6 \cdot 10^{-8}$  м/с, у заињецированных днищ котлованов ГЭС  $k_b = 2,5 \cdot 10^{-6}$  м/с, судоходного шлюза  $k_b = 1,0 \cdot 10^{-6}$  м/с. В последующих фазах их значения уменьшались и изменялись по зависимости

$$k_t/k_0 = 2,22t^{-0,25}, \quad (4)$$

которая подобна уравнению (3) и также дает реальные результаты для  $t \geq 50$  дней от начала установившейся фильтрации. Зависимость (4) можно применять для прогнозов водопроницаемости противофильтрационных элементов — стен из самотвердеющей суспензии и заињецированных днищ. Пользуясь ею, можно получить, например, для стен ванны электростанции значение  $k_w = 1,4 \cdot 10^{-8}$  м/с, которое в июле 1989 г. уменьшится в  $k_w = 1,1 \cdot 10^{-8}$  м/с.

Результаты изучения изменчивости во времени водопроницаемости противофильтрационных элементов полезны для использования в практике оптимального проектирования водоотлива из противофильтрационных ванн, причем с учетом предполагаемого периода строительства.

Для оценки качества противофильтрационных мероприятий нами взяты некоторые данные [7] (рис. 3). Критерием качества служит расход откачиваемой воды  $Q$ , количества — объем котлована  $V = A_b(H - h)$ , который определяется как произведение площади дна котлована  $A_b$  на разность уровней воды в начале и конце откачки  $(H - h)$ . Точки позволяют оценить зависимость  $Q = f(V)$  в соответствии со средним достигнутым международным уровнем осушения подобных котлованов. Этому уровню соответствуют точки для котлованов: 3 — тоннеля Шифол II в Голландии; 5 — административного здания в Амстердаме; каскада ГЭС, построенных на реках Рейн фирмой

"Солетанш" (Франция); 6 — "Герстгайм"; 7 — "Фогельсгайм"; 8 — "Фесенгайм"; 9 — "Рино" и "Маркольсгайм", а также 10 — водохранилища "Дунакилити" (ВНР). Хуже результаты для котлована (точка 1) временного канала вблизи чехословацкой дер. Палковичово, где не была применена подходящая инъекционная смесь. Напротив, точки 2 — котлован тоннеля Шифол I и 4 — котлован административного здания в Гамбурге соответствуют хорошему эффекту осушения.

Точки 11 и 13 отражают данные проектных проработок соответственно для котлованов шлюзовых камер и ГЭС "Габчиково", которые отвечают среднему международному уровню. В действительности же из котлованов откачивались объемы воды, уменьшавшиеся во времени из-за кольматации противофильтрационных элементов ванн. Получаемый при этом эффект показан отрезками прямых 12 и 14, свидетельствующими о высоком качестве работ, превышающем средний мировой уровень.

### ЛИТЕРАТУРА

1. H u l l a J. et al.: Vývoj účinnosti tesniacich prvkov stavebných jam pre vodnú elektrárňu a plavebnú komoru Gabčíkovo. Správa pre Hydrostav. Bratislava, stavebná fakulta SVŠT, 1986. 45 с.
2. H u l l a J. et al.: Deep foundation pits for the Gabčíkovo hydropower plant. In: 8 th DECSMFE, (I), Nürnberg, 1986. С. 113—118.
3. H u l l a J. et al.: Účinnosť injektáže dna tesniacich vaní na vodnom diele Gabčíkovo. In.: Zakládání staveb, Brno, 1986. С. 253—256.
4. К о в а ч Ъ Л.: Niektore problémy tesnených stavebných jam Kandidatska dizertačna práca. Bratislava, 1986. SVŠT, stav. fakulta. 120 с.
5. Т а в о д а О.: Hlbkově-odvodňovanie stavebných jam. — SNTL, Bratislava, 1965. 220 с.
6. Т а в о д а О., Š a b o A.: Zakladanie stavieb pod hladinou podzemnej vody. — Alfa. Bratislava, 1985. 165 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

|   |     |
|---|-----|
| Г о л ч е н к о М.Г., В и х р о в В.И. Оценка репрезентативности данных метеостанций в Белоруссии для оперативных водно-балансовых расчетов . . . . .                 | 3   |
| В о л ч е к А.А. Исследование пространственно-временных колебаний испарения . . . . .   | 5   |
| Г а т и л л о П.Д., О д и н е ц А.Н. Характеристики режима атмосферных осадков и поверхностного стока, необходимые при расчетах дождевой канализации городов. . . . . | 9   |
| К р у л и к о в с к и А., Д з е н и с Л. Оценка надежности работы водопроводных сетей на примере некоторых городов Польши. . . . .                                    | 15  |
| В о р о н и н А.Г. Очистка сточных вод мясокомбинатов с применением токов высокой частоты . . . . .   | 18  |
| Ч е р н я в с к а я В.А. Интенсификация обезвоживания осадков промывных медьсодержащих серноокислых сточных вод. . . . .  | 22  |
| И ш у т и н о в Е.М., Ш е в ц о в Н.В. Совершенствование проектирования насосных станций оросительных систем. . . . .   | 26  |
| В е п р е в Г.П. Выбор отметки оси рабочего колеса лопастных насосов мелиоративных насосных станций . . . . .   | 30  |
| А в д о н ь к и н А.Ф., З е й д а л ь К.Ф. Устройства для отвода рыбы от рыбозащитных сооружений. . . . .   | 36  |
| В о п н я р с к и й И.П., С и д о р о в А.Н., М о л о ч к о А.В. Теоретическое и экспериментальное исследование цилиндрического рыбозащитного устройства . . . . .    | 41  |
| А в д о н ь к и н А.Ф. Методика гидравлического расчета струйного насоса с кольцевым соплом . . . . .   | 47  |
| П о в о р о т н ы й И.В., П р о к о п ч у к Д.А. Исследование характеристик течения частично ограниченных турбулентных струй. . . . .                                 | 51  |
| К а р п е ч е н к о А.В., К у л е б я к и н В.В., Т о в ч и г р е ч к о В.В. О влиянии полимерных добавок на импактную струю. . . . .                                 | 56  |
| Р о г у н о в и ч В.П., Б а м п и С.А., В о л о н ц е в и ч С.А. Выделение нетранзитных частей водотоков сложных сечений . . . . .                                    | 61  |
| Ш н и п о в Ф.Д. К вопросу о генерации поперечных течений в открытых руслах . . . . .   | 65  |
| Б о г о с л а в ч и к П.М. К определению коэффициента шероховатости при расчете размыва грунтовых вставок . . . . .   | 74  |
| Л е в к е в и ч В.Е. Влияние грунтовых вод на устойчивость абразионных берегов водохранилищ Белоруссии. . . . .   | 76  |
| Л е в к е в и ч Е.М., М е х е д ь к и н В.Н. Крепление напорного откоса грунтовой дамбы изношенными автопокрышками . . . . .  | 83  |
| С у р м а Н.В. Виды и причины повреждения плитных креплений гидротехнических сооружений мелиоративных систем. . . . .   | 86  |
| К у н ц е в и ч Н.М., Б а Б у б а к а р. О конструкции трубчатого водосброса-водо выпуска. . . . .  | 91  |
| К у н ц е в и ч Н.М., Г а р с и я М у н ь о с Л.Э. Гаситель энергии соударением струй на сходе с быстроготока и его эффективность. . . . .                            | 93  |
| С о б о л е в с к и й Ю.А., С о б о л е в с к и й Д.Ю. Дисторсия и разжижение песков. . . . .   | 96  |
| Х м е л е в с к а я Г.В. О набухании супесчаных и пылеватых песчаных грунтов при увлажнении. . . . .  | 101 |

|   |     |
|---|-----|
| С о б о л е в с к и й Ю.А., С о б о л е в с к и й С.В. Влияние фильтрационной анизотропии на начальное напряженное состояние водонасыщенных оснований . . . . . | 108 |
| Б а н н и к о в Н.Д. Распределение избыточных напоров и напряжений во времени в трансверсально-изотропных основаниях при их загрузке . . . . .                  | 114 |
| Г у л л а Й. Водоотлив в котлованах внутри противофильтрационных ванн . . . . .   | 119 |

Научное издание

**ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО**

В ы п. 18

Заведующий редакцией *Р.И. Масловский*

Редактор *А.Л. Подгайская*

Младший редактор *Н.Н. Линькова*

Художественный редактор

Технический редактор *Л.И. Счисленок*

Оператор *И.В. Скубий*

ИБ № 2871

Подписано в печать с оригинала-макета 28.11.88 г. АТ 12708. Формат 60х90 /16. Бумага кн.-журн. Офсетная печать. Усл. печ. л. 8. Усл. кр.-отт. 8,5. Уч.-изд. л. 9,79. Тираж 650 экз. Заказ 5080. Цена 2 р.

Издательство "Вышэйшая школа" Государственного комитета БССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 220048, Минск, проспект Машерова, 11. Типография "Победа". 222310 Молодечно, ул. Тавлая, 11.