

# ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО



**16**

Министерство высшего и среднего специального образования БССР

Белорусский ордена Трудового Красного  
Знамени политехнический институт

# ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

РЕСПУБЛИКАНСКИЙ МЕЖВЕДОМСТВЕННЫЙ  
СБОРНИК

ВЫПУСК 16

Минск  
"Вышэйшая школа"  
1987

В62

Главный редактор  
В.П. Старинский, кандидат технических наук, доцент

Редакционный совет:

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

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

Анализируются решения водохозяйственных вопросов в области охраны рек от загрязнения и истощения, интенсификации использования ресурсов воды, защиты от наводнений, влагообеспечения мелиорируемых почв.

Большое внимание уделяется гидравлике речных потоков, гидротехнических сооружений и различных устройств, а также воздействию на них ветровых волн.

Сборник предназначен для специалистов в области использования и охраны водных ресурсов.

В 3301000000 -170 151-87  
М304 (05) -87

П.Д.ГАТИЛЛО, канд. техн. наук (БПИ)

## ОБ УЧЕТЕ ИНТЕРЕСОВ ОХРАНЫ РЕК НА ПРЕДПРОЕКТНОЙ СТАДИИ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ ВОДООБЕСПЕЧЕНИЯ ГОРОДОВ БССР

В реках, обеспечивающих нужды городов, необходимы определенные расходы воды на участках выше, в черте и непосредственно ниже этих городов (для технического, а иногда и хозяйственно-питьевого водоснабжения; мойки и поливки проездов, площадей, зеленых насаждений; поддержания санитарного состояния городских водотоков и водоемов; разбавления остаточных загрязнений, поступающих со сбрасываемыми стоками; водного благоустройства городских и пригородных территорий; поддержания в реках расходов не меньших, чем минимально допустимые для охраны природы), а в определенных условиях и для обеспечения транзитных потоков воды, необходимых нижерасположенным водопотребителям и водопользователям.

Решения принципиальных вопросов водообеспечения городов производятся еще на стадии предпроектных разработок. В данной статье анализируется состояние таких разработок для городов БССР в части решения водохозяйственных вопросов охраны вод от загрязнения и истощения.

Предпроектные разработки водообеспечения городов производятся в составе схем развития и размещения производительных сил, районной планировки, генеральных планов городов, схем комплексного использования и охраны водных и земельных ресурсов, а также самостоятельно. Для срочного решения вопросов водообеспечения вновь размещаемого промпредприятия в небольшом городе эти вопросы иногда разрабатываются сразу в составе проектного задания или же технического проекта водопровода и канализации города.

XXVII съезд КПСС обратил внимание на остроту вставших задач охраны природы и рационального использования ее ресурсов, в том числе на необходимость последовательного улучшения охраны вод. Помочь решению этих задач может также пристальный анализ проводимой в этой области работы.

Большинство городов Белоруссии располагает предпроектными разработками в данной области. В соответствии с [1] Белкоммунпроект в 70—80-е годы на основе утвержденных генпланов городов составлял ТЭО развития трех элементов водного хозяйства городов: 1) коммунального водопровода; 2) промбытовой канализации; 3) дождевой канализации. Если возникали вопросы промышленного водообеспечения (4-й элемент) для ряда отраслей, то их разрабатывал Белпромпроект. Последний для решения внеплощадочных вопросов часто привлекал МО Союзводоканалпроекта. Для некоторых городов местными проектными институтами разработаны схемы водного благоустрой-



ства городской, а иногда и пригородной территории (5-й элемент). В последние годы Белкоммунпроект занимается вопросами развития тех же трех элементов городского водного хозяйства в составе схем развития и размещения предприятий и сооружений жилищного и коммунального хозяйства в виде обосновывающих материалов.

Встречаются и другие организационные схемы. Например, для Минска и Солигорска внеплощадочные вопросы централизованного водоснабжения и канализации решают в основном Минскинжпроект и БФ ВНИИПГалургии.

Следует отметить, что, несмотря на необходимость проведения предпроектных разработок водообеспечения, они для очень многих городов БССР еще не выполнены.

Разработки производятся в соответствии с общесоюзными, республиканскими и ведомственными руководящими указаниями, отражающими научно-технический уровень отрасли. Однако дефицит водных ресурсов и исчерпание ассимиляционных возможностей рек—приемников сточных вод — требуют совершенствования водного хозяйства, и это должно учитываться на предпроектной стадии. В указанных разработках имеется ряд недостатков: 1) раздельная разработка ТЭО (схем, обосновывающих материалы) развития названных пяти элементов водного хозяйства городов и отсутствие анализа их совместного влияния на минимальный сток и качество воды рек; 2) игнорирование влияния других водохозяйственных объектов, а также воздействия хозяйственной деятельности в бассейнах; 3) односторонняя направленность мер по охране рек от загрязнения.

Отрицательно сказывается отсутствие или недоработка руководящих указаний.

Возможно, раздельная разработка ТЭО развития указанных элементов водного хозяйства городов вызывается организационными соображениями. Однако в интересах охраны вод необходимо, чтобы в таких случаях производился совместный анализ решений по всем пяти элементам. В обобщающую часть разработок должны входить прогнозы общего влияния намеченных мероприятий на качество вод и минимальный сток, а также технико-экономическое обоснование решений.

Анализ разработок показал, что в них отсутствует оценка влияния на приемники как стоков дождевой в отдельности, так и совместно со стоками промбытовой канализации.

В ТЭО коммунального или промышленного водоснабжения не производится оценка влияния отборов воды на величину минимального стока источников, хотя в отдельных случаях только прямые отборы речных вод для нужд городов приближаются к предельно допустимым в бытовом состоянии рек.

Целесообразность учета интересов всех элементов водного хозяйства может быть показана на примере города, расположенного на водоразделе в верхней части междуречья двух небольших рек. В ТЭО промбытовой канализации принято, что ее стоки со всего города после станции аэрации направляются в одну из рек. В ТЭО дождевой канализации, развиваемой по полной раздельной системе с перехватом и направлением на очистку части стоков, принято, что стоки с бассейнов канализования попадают в одну и вторую реку в зависимости от расположения бассейнов. Представляется, что если одна из рек принята

в качестве приемника, то от этой роли следовало бы освободить вторую, на которой к тому же ниже по течению, но еще выше впадения в нее первой реки создано стокорегулирующее водохранилище, являющееся источником водоснабжения и имеющее предпосылки использования для рекреации населения.

Водное хозяйство каждого города является частью водохозяйственного комплекса речного бассейна и должно развиваться с учетом других направлений использования и охраны водных ресурсов. Поэтому в разработках систем водообеспечения городов должны приниматься во внимание решения и рекомендации утвержденных водохозяйственных схем: генеральной, территориальной и бассейновой схем комплексного использования и охраны водных и земельных ресурсов, схем охраны малых рек, отраслевых схем специального водопользования. Кроме объектов водного хозяйства города, должно учитываться влияние объектов другого назначения. Следует указать на необходимость учета влияния гидромелиоративных систем, использующих для увлажнения земель бытовые расходы речных вод и сток с территории самих мелиоративных систем, что ведет к прямому снижению минимальных расходов воды рек. До сих пор в предпроектных разработках водообеспечения городов не учитывалось снижение воды в реках под воздействием таких видов хозяйственной деятельности, как заборы подземных вод и интенсификация богарного растениеводства.

Наблюдается сокращение стока или полное пересыхание малых рек в районах заборов подземных вод для ряда городов [2]. Однако при разработке систем водоснабжения за счет подземных вод обоснование источника ограничивается ссылкой на утвержденные эксплуатационные ресурсы без учета реальных возможностей их полного использования. Водозаборы располагаются иногда в бассейнах малых рек, однако не оценена степень снижения минимальных расходов этих рек и не предусмотрены компенсирующие мероприятия.

В связи с интенсификацией растениеводства на богарных землях происходит снижение речного стока [3]. Получены количественные данные. Расчеты [4] показали, что в летний сезон маловодного года 95 %-й обеспеченности речной сток в бассейне Днепра может в будущем снизиться на 33 %. Это подтверждает необходимость учета данного фактора.

Обращает внимание однообразие принимаемых в ТЭО промбытовой канализации решений по охране рек от загрязнения — полная биологическая очистка и при необходимости доочистка перед сбросом в приемники. Такие сбросы намечаются и в малые реки, минимальные расчетные расходы которых сопоставимы или даже меньше расходов сточных вод. Было бы целесообразным в первую очередь стоки малых городов и сельских населенных пунктов использовать для орошения сенокосов и пастбищ, что имело бы не только охранное, но и гидромелиоративное значение. Как правило, не анализируются возможности использования доочищенных стоков обеих канализаций городов для технического водоснабжения. Такие решения позволили бы полнее использовать резервы водного хозяйства.

Не производится анализ влияния сброса стоков дождевой канализации в зависимости от водоносности приемников и площади канализуемой застроенной территории [5], не рассматривается влияние стекающих с нее малых вод [6].

Отсутствует общепризнанная методика определения минимального расхода воды для контроля мер по охране рек от истощения и загрязнения. Этот вопрос имеет ряд аспектов. Необходимо проанализировать обоснованность требований действующих указаний [7, 8], унифицировать эти требования, а также рассмотреть вновь поступившие предложения [9].

Приведенная в Правилах [8] формулировка понятия расчетного расхода для разбавления стоков, сбрасываемых в незарегулированные реки, допускает различные ее толкования. Мы считаем, во-первых, что расчетные расходы целесообразно определять на основе выборок самых малых в каждом году месячных расходов за летне-осенний и зимний сезоны. По таким выборкам расчетные расходы получаются наименьшими, и к тому же для них гидрометслужбой установлены параметры аналитических кривых обеспеченности.

Во-вторых, необходимо учитывать продолжительность периодов с суточными расходами более низкими чем расчетный, при которых концентрация загрязнений будет превышать нормативную. На это обращается внимание и в работе [10].

Временные указания [7] содержат требование о минимально допустимых расходах воды в реках для обеспечения интересов охраны природы (МДР) в размере  $0,75Q_{\text{мин.мес}}^{95}$ . Анализ известных рекомендаций и проектного опыта позволяет считать, что для рек, не имеющих ни уникального, ни даже существенного рыбохозяйственного значения, какими являются реки Белоруссии, указанные расходы вполне приемлемы. Исключение может быть сделано только для малых рек, в которых обитает занесенная в Красную книгу БССР ручьевая форель.

Требования к минимальным расходам рек Белоруссии со стороны [7] и [8] расходятся. Расчетный расход для определения нормальных концентраций загрязнений в приемниках стоков устанавливается более высокий, чем МДР, что в принципе неприемлемо. Однако повышение МДР до значения  $Q_{\text{мин.мес}}^{95}$  обозначало бы запрет хозяйственной деятельности в бассейнах без проведения длительного регулирования речного стока. Создание же водохранилищ вызвало бы неоправданное народнохозяйственными нуждами затопление земель. Значит, остается принять вариант снижения расчетного минимального расхода воды в приемниках сточных вод до величины МДР, тем более, что это обеспечит более надежную охрану рек от загрязнения. Это, конечно, потребует более высокой степени очистки и доочистки сточных вод или же сокращения их сброса в приемники. Но это соответствует тенденциям развития водного хозяйства.

В связи с высказываниями [9] необходимо подчеркнуть, что рассмотренные выше МДР учитывают интересы охраны природы. Но это вовсе не значит, что вся остальная часть ресурсов воды может считаться свободной и, например, быть переброшенной в другие бассейны. В бассейнах-донорах, кроме того, должны быть зарезервированы ресурсы воды для полного водообеспечения народного хозяйства на далекую перспективу и учтено влияние хозяйственной деятельности на сток.

В работе [9] изложены общие идеи о критериях оставляемых в реках расходов воды для "сохранения на соответствующем уровне биопродуктивности растительности пойменных лугов и рыбных запасов" и "создания благо-

приятных условий для других элементов природного комплекса речных долин". Конкретно сформулированы требования обеспечивать весной для влагозарядки пойменных лугов затопление их на 15–30 суток, а для воспроизводства фитофильных рыб – затопление пойм на такие же сроки со средним слоем 0,5–1,5 м. Представляется, что в условиях Белоруссии обеспечение названных интересов может быть достигнуто и при указанных выше МДР за счет гидротехнических мероприятий. Можно выделить 2 характерных случая:

1. На реке нет стокорегулирующих водохранилищ. Из нее производится отбор постоянных во времени расходов, таких, что в расчетные маловодные месяцы в реке остаются расходы не ниже МДР. В паводки и половодье отъем расходов не больше  $0,25Q_{\text{мин, мес } 95}$  практически будет незаметным и не скажется на затоплении поймы. На больших и средних реках такой отъем и в межень не приведет к необратимым последствиям для рыбного стада. На меньших реках следует располагать подпорные сооружения с развитым водосбросным фронтом, способные поддерживать в руслах повышенные уровни воды в течение межени, не вызывая при этом излишних подтоплений и не осложняя пропуска высоких вод [11]. Создаваемые при этом бьефы будут иметь значение для поддержания уровней грунтовых вод на прилегающих территориях, улучшения рекреационных условий. Аэрация воды на перепадах будет улучшать ее кислородный режим.

2. На реке расположены стокорегулирующие водохранилища. В маловодные годы в нижнем бьефе могут наблюдаться постоянные расходы ( $0,75Q_{\text{мин, мес } 95}$ ) весь год или значительную его часть. В более многоводные годы эта часть тем более сокращается, чем больше водность года. Поддержания высокой урожайности лугов в речной долине можно добиться за счет термического (главный фактор) и увлажнительного воздействия весенних вод, которые, согласно исследованиям БелНИИМиВХ [12], могут быть поданы с помощью специальных систем напуска слоем только 0,3–0,4 м на период всего до 5 суток и с возвратом 80–90 % использованной воды. Кроме экономии воды, эти системы способны повысить устойчивость урожайности лугов. Рыбохозяйственные условия в верхнем бьефе улучшаются, а в нижнем они могут поддерживаться за счет упомянутых подпорных сооружений.

Соблюдение требований затопления пойм бытовыми высокими водами [9] в условиях Белоруссии резко снизило бы эксплуатационные ресурсы речных вод. Их получение было бы возможно лишь за счет создания водохранилищ многолетнего регулирования, требующих высоких удельных затопленных земель.

В заключение отметим, что для достоверного выявления влияния на реки систем водоснабжения, канализации, водного благоустройства и хозяйственной деятельности, действительного эффекта названных охранных и компенсирующих мероприятий необходимы материалы объективных наблюдений в натуре. Для этого необходимо привлечение круга научных и проектных организаций, подбор характерных бассейнов, проектирование и строительство комплексов необходимых сооружений, осуществление намеченных мероприятий, организация наблюдений, их анализ и обобщение.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Временные указания о составе и степени проработки технико-экономических обоснований (ТЭО) проектирования и строительства коммунальных водопроводов и канализаций в городах и населенных пунктах БССР. ВСН 1-79. — Минск, 1979. — 11 с.
2. Злотник В.А., Калинин М.Ю., Усенко В.С., Черепанский М.М. Прогнозирование влияния эксплуатации подземных вод на гидрогеологические условия. — Минск, 1985. — 296 с.
3. Булавко А.Г. Прогнозирование изменения водного баланса под влиянием хозяйственной деятельности // Водные ресурсы, 1973, № 4. — С. 50—58.
4. Булавко А.Г. Водные ресурсы и человек. — Минск, 1976. — 40 с.
5. Временная инструкция по проектированию сооружений для очистки поверхностных сточных вод. СН 496-77. — М., 1978. — 40 с.
6. Временные рекомендации по проектированию сооружений для очистки стока с территорий промышленных предприятий и расчету условий выпуска в водные объекты. — М., 1983. — 47 с.
7. Временные указания органам Госкомитета СМ БССР по охране природы по согласованию бассейновых схем комплексного использования и охраны водных и земельных ресурсов и проектов мелиорации земель на территории БССР (Госкомприроды БССР). — Минск, 1971. — 8 с.
8. Правила охраны поверхностных вод от загрязнения сточными водами / Минводхоз СССР, Минздрав СССР, Минрыбхоз СССР. — М., 1975. — 40 с.
9. Фадеевский Б.В. Методические основы оценки резервируемого природоохранного стока // Водные ресурсы Белоруссии и их охрана. Минск, 1982. — Вып. 11. С. 85—94.
10. Родзиллер И.Д. Прогноз качества воды водоемов-приемников сточных вод. — М., 1984. — 263 с.
11. Гатилло С.П., Филиппович И.В. Регулирование уровней воды в мелиоративных каналах при помощи водопропускных сооружений с водосливной стенкой // Водное хозяйство и гидротехн. стро-во. Минск, 1985. — Вып. 14. — С. 26—30.
12. Михальцевич А.И., Пантелей К.С., Кудрячев А.И., Гриневич Н.Я. Влияние краткосрочных затоплений на продуктивность сеяных трав // Сб. научн. работ по мелиоративн. стро-ву и с/х использованию осушенных земель. — Вып. XXVIII. — Минск, 1980. — С. 218—228.

УДК 556.53

**В.Н.ПЛУЖНИКОВ, В.Л.ЭЛЬПЕР,**  
канд.-ты техн. наук (ЦНИИКИВР)

### **ОЦЕНКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДЫ ПРОМЫШЛЕННОСТЬЮ В БАССЕЙНАХ МАЛЫХ РЕК**

При размещении промышленных объектов в бассейнах малых рек проявляются особенности, обуславливающие отличия (по сравнению с крупными реками) в подходе к оценке целесообразности и эффективности мер по обеспечению предприятий водой и охране водных ресурсов от загрязнения и истощения. Во-первых, возрастает вероятность дефицита водных ресурсов. Во-вторых, в таких бассейнах функционирование промышленных предприятий оказывает существенное воздействие на количественные показатели и качественное состояние речной воды. Требуется высокая степень очистки сбрасываемых сточных вод, так как ассимилирующая способность водоема невелика.

В створах городов сбросы сточных вод могут быть сопоставимы и превышать расход воды в малой реке вследствие использования для водоснабжения подземных вод. Кроме того, необходимо строго соблюдать ограничения допустимого отбора воды исходя из интересов данной малой реки, а также рек, которые она питает.

В настоящее время отсутствует однозначная трактовка понятия "малые реки". В ГОСТе 19179-73 под малыми понимаются реки, площадь водосбора которых не превышает 2000 км<sup>2</sup>. Имеются работы, где длина малых рек ограничивается величиной 500 км. Это можно объяснить попыткой классифицировать реки "с географических позиций", с точки зрения их размеров. Особое внимание, уделяемое малым рекам, обусловлено прежде всего их хозяйственным значением, повышенной чувствительностью к антропогенной деятельности и особенностями. Поэтому правомерен водохозяйственный подход при решении вопроса об отнесении той или иной реки к категории малых рек. Он позволяет выделить реки, на количественный и качественный режим которых оказывает существенное влияние функционирование отдельного объекта-водопользователя (или ограниченной группы объектов). Те же особенности предопределяют важность рационального использования водных ресурсов в бассейнах малых рек.

Оценку использования вод необходимо осуществлять в двух аспектах. Первый — масштаб использования вод, определение требований к мероприятиям, обеспечивающим дальнейшее развитие водопользования в бассейне. Это выполняется в основном для крупных рек и касается регулирования или переброски стока, с помощью которого заданные потребности в воде удовлетворяются. Второй заключается в анализе организации водного хозяйства водопользователей с целью выявления возможностей и резервов экономии воды. Для этого нужен более детальный анализ использования воды на отдельных народнохозяйственных объектах: объемов водопотребления и водоотведения, степени повторного использования воды. Водопотребление и водоотведение представляются в виде фактических удельных показателей (на единицу продукции или сырья), которые сопоставляются с соответствующими плановыми величинами (установленными для данного объекта лимитами, проектными или балансовыми показателями) и достижениями в этой отрасли.

Повторное использование воды (сложившееся и возможное на данном объекте) является показателем комплексного решения задач воспроизводства водных ресурсов и охраны водоемов от загрязнения и истощения. Оно может осуществляться в промышленности по различным схемам: 1) последовательное использование воды в производственных процессах на одном предприятии; 2) обратное водоснабжение для одних и тех же водопотребителей; 3) использование сточных вод одних предприятий для нужд технического водоснабжения других; 4) потребление городских и других категорий сточных вод в качестве источника технической воды; 5) комбинированная схема водоснабжения.

Выбор одной из указанных схем определяется технологией производства, местными условиями и обосновывается технико-экономическими расчетами.

Степень повторного использования воды на объекте характеризуется

кратностью  $K_k = Q_{вп} / Q_{св}$  или коэффициентом оборота  $K_o = \frac{Q_{вп} - Q_{св}}{Q_{вп}}$  и зави-

сит от вида производства. Здесь  $Q_{вп}$  — общее водопотребление (сумма объемов потребления воды во всех технологических и вспомогательных процес-

сах);  $Q_{\text{св}}$  — потребление предприятием свежей воды, характеризует поступление воды на промплощадку извне.

В рамках ограничений, обусловленных технологией производственного процесса, высокие значения коэффициентов свидетельствуют об эффективном использовании воды на данном предприятии.

При оценке рациональности потребления свежей воды применяют коэффициент  $K_{\text{и}} = \frac{Q_{\text{св}} - Q_{\text{отв}}}{Q_{\text{св}}}$  ( $Q_{\text{отв}}$  — количество сбрасываемых сточных

вод). Однако по  $K_{\text{и}}$  правильную оценку дать затруднительно. Большая величина  $K_{\text{и}}$  должна свидетельствовать о лучшем использовании свежей воды на объекте. Возрастанию этого коэффициента способствует сокращение сброса сточных вод. Так, бессточная система водного хозяйства предприятия ( $Q_{\text{отв}} = 0$ ) характеризуется максимальным значением  $K_{\text{и}} = 1$ . Однако к увеличению  $K_{\text{и}}$  приводит и рост безвозвратных потерь воды на утечки, испарение, механический унос в градирнях и т.п. Поэтому величина  $K_{\text{и}}$  может служить критерием рациональности использования свежей воды на предприятии лишь при сопоставлении показателей  $Q_{\text{св}}$  и  $Q_{\text{отв}}$  с действующими нормативами и достигнутым на передовых предприятиях уровнем. Поэтому более предпочтительны коэффициенты  $K_{\text{о}}$  и  $K_{\text{к}}$ .

В табл. 1. приведены данные по ряду предприятий г. Минска. Для сопоставления представлены нормативные значения показателей, вычисленные в соответствии с [1]. Как видно, на ряде предприятий имеются значительные резервы для экономии воды в производстве. Примерами предприятий с высокой степенью использования воды могут служить тракторный и подшипниковый заводы, мясокомбинат.

В условиях бассейна малой реки большое значение имеют межобъектные водохозяйственные связи, кооперация отдельных предприятий в части водопользования с учетом состава сточных вод и требований к качественным показателям технической воды, поступающей на производственные нужды. Развитие таких связей зависит от местных условий и номенклатуры производств, представленных на данном расчетном участке.

Таблица 1

Показатели использования воды на производственные нужды

Предприятия	$K_{\text{к}}$		$K_{\text{о}}$	
	норм.	факт.	норм.	факт.
Тракторный завод	7,6	69,6	0,87	0,98
Автозавод	6,0	6,68	0,85	0,85
ГПЗ-11	7,0	10,2	0,85	0,90
Камвольный комбинат	7,5	1,39	0,87	0,28
Молочный комбинат	6,5	7,58	0,85	0,87
Гормолзавод № 1	6,5	5,87	0,85	0,83
Мясокомбинат	4,0	16,5	0,75	0,94
Ф-ка "Коммунарка"	4,5	1,63	0,75	0,39



В конечном итоге кооперация приводит к уменьшению требований к источнику воды как по забору свежей воды, так и по разбавлению сточных вод. При  $m$  объектах на участке в случае осуществления повторно-последовательного использования воды справедливы соотношения

$$Q_{\text{заб}}^{\text{ГР}} < \sum_{i=1}^m Q_{\text{заб},i}; \quad Q_{\text{отв}}^{\text{ГР}} < \sum_{i=1}^m Q_{\text{отв},i}.$$

где  $Q_{\text{заб}}^{\text{ГР}}, Q_{\text{отв}}^{\text{ГР}}$  — общий забор свежей воды из реки и сброс в нее сточных вод;  $Q_{\text{заб},i}, Q_{\text{отв},i}$  — то же для отдельных объектов при автономной системе водоснабжения и водоотведения.

Однако безвозвратное водопотребление может не измениться или даже несколько возрасти за счет дополнительных потерь при передаче и внутри-системной подготовке воды.

Водные ресурсы малых рек могут использоваться многократно не только путем непосредственной передачи после потребления одним предприятием другому, но и при последовательном заборе и сбросе воды рядом предприятий. В этом случае возникает задача правильного определения водоемкости предприятий. Необходимо принимать в расчет качество сбрасываемых в водоем сточных вод, условия смешения и самоочищения и в итоге потребное количество разбавляющей воды в реке для обеспечения возможности водоснабжения нижележащих предприятий [2].

Оценка интенсивности использования природных вод выполняется по отношению  $Q_{\text{заб}}^{\text{ГР}}/W_{\text{год}}^{\text{Ф}}$ ;  $Q_{\text{заб}}^{\text{ГР}}/W_{\text{год}}^{0,95}$ , где  $W_{\text{год}}^{\text{Ф}}, W_{\text{год}}^{0,95}$  — годовые объемы воды в расчетном створе (соответственно фактический и 95 %-й обеспеченности). Для бассейнов малых рек числитель этих отношений в отдельных случаях может оказаться больше знаменателя, что будет свидетельствовать о весьма интенсивном использовании воды (многократно вдоль реки).

Для оценки возможностей расширения повторного использования воды на действующих объектах необходимо проводить в каждом конкретном случае технико-экономическое сопоставление вариантов.

Для снижения водопотребления на  $\Delta Q_{\text{св}}$  и водоотведения на  $\Delta Q_{\text{отв}}$  в реконструкцию водного хозяйства предприятий необходимо вложить средства в размере  $Z_{\text{р.к}}(\Delta Q_{\text{св}}, \Delta Q_{\text{отв}})$ . Этим достигается снижение затрат по забору свежей воды из источника (реки) на  $\Delta Z_{\text{св}}(\Delta Q_{\text{св}})$ , по водоотведению, очистке сточных вод и т.д. на  $\Delta Z_{\text{отв}}(\Delta Q_{\text{отв}})$ , по оплате забора и сброса воды  $\Delta Z_{\text{пл}}(\Delta Q_{\text{св}}, \Delta Q_{\text{отв}})$ . В общем случае для бассейна малой реки при сокращении водопотребления отдельным крупным объектом можно ожидать экономии затрат  $\Delta Z_{\text{р.с}}(\Delta Q_{\text{св}})$  по регулированию и переброске стока. Эта экономия при существующих водохранилищах и каналах достигается за счет высвобождения соответствующего количества воды для развития водопотребления другими объектами. Таким образом, критерий выгодности расширения повторного использования воды на объекте будет иметь вид:

$$[\Delta Z_{\text{св}}(\Delta Q_{\text{св}}) + \Delta Z_{\text{отв}}(\Delta Q_{\text{отв}}) + \Delta Z_{\text{пл}}(\Delta Q_{\text{св}}, \Delta Q_{\text{отв}}) + \Delta Z_{\text{р.с}}(\Delta Q_{\text{св}}) - \Delta Z_{\text{р.к}}(\Delta Q_{\text{св}}, \Delta Q_{\text{отв}})] = \Delta Z_{\text{повт}}^{\text{авт}} \rightarrow \max, \Delta Z_{\text{повт}}^{\text{авт}} \geq 0;$$

$$\exists_{p, k} (\Delta Q_{cb}, \Delta Q_{отв}, \varphi) \rightarrow \min, \varphi \in \psi; \quad (1)$$

$$\Delta Q_{cb} = \text{const}; \quad \Delta Q_{отв} = \text{const}; \quad Q_{cb} \geq \Delta Q_{cb} \geq 0; \quad Q_{отв} \geq \Delta Q_{отв} \geq 0;$$

$$K_p^H = \frac{K_p^B (Q_p - Q_{cb}^I) + K_{отв}^I Q_{отв}^I}{Q_p - Q_{cb}^I + Q_{отв}^I} \geq [K],$$

где  $\psi$  — число возможных схем (способов) реконструкции водного хозяйства объекта на фиксированный объем сокращения водопотребления;  $K_p^B$ ,  $K_p^H$ ,  $K_{отв}^I$ ,  $[K]$  — соответственно показатели качества воды в реке выше и ниже сброса сточных вод данным объектом, качества сбрасываемых сточных вод и допустимые ( $\geq$  — не хуже);  $Q_{cb}^I$ ,  $Q_{отв}^I$  — достигаемые при реконструкции показатели водопотребления ( $Q_{cb}^I = Q_{cb} - \Delta Q_{cb}$ ;  $Q_{отв}^I = Q_{отв} - \Delta Q_{отв}$ );  $Q_p$  — расход реки в створе водозабора;  $\Delta \mathcal{E}_{повт}^{авт}$  — суммарный экономический эффект от повторного использования воды на объекте (автономно).

Для получения данных по условию (1) необходимы изыскательские и проектные работы. Для группы объектов решение задачи требует оценки их совместимости и эффекта кооперации.

Совместимость объектов характеризуется как общностью их месторасположения, так и возможностью приема сточных вод в качестве источника свежей воды по количеству и качеству. Для этого необходима разработка требований к качеству воды, используемой в производственных процессах. Аналогично (1) формируется критерий оптимальности повторного использования воды для группы из  $m$  объектов.

Через оплату регулирования стока и очистки сточных вод проявляется обратная связь между водностью реки и эффективностью повторного использования воды в промузлах и на отдельных предприятиях, что наиболее существенно для бассейнов малых рек.

При изучении возможности применения для технического водоснабжения очищенных городских сточных вод по этой схеме для предприятий учитывается эффект от сокращения затрат по забору свежей воды из источника, для коммунального хозяйства — то же по водоотведению [3].

Детализация приведенных моделей и насыщение их фактическими и проектными данными для получения реальных решений являются актуальной задачей в области водообеспечения промышленности в бассейнах малых рек и охраны их водных ресурсов от истощения и загрязнения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Укрупненные нормы водопотребления и водоотведения для различных отраслей промышленности. — М.: Стройиздат, 1982. — 528 с. 2. К а м и н с к и й В.С. Некоторые вопросы организации водооборота на промышленных предприятиях // Водные ресурсы. — 1984. — № 5. — С. 20—33. 3. К у з н е в А.К. Экономическая эффективность использования городских сточных вод в техническом водоснабжении. — Автореф. дис... канд. техн. наук. — Л., 1973. — 19 с.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОТИВОАВАРИЙНЫХ РЕЗЕРВНЫХ ЕМКОСТЕЙ В ИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМАХ ЗАЩИТЫ ОТ НАВОДНЕНИЙ

С целью защиты пойменных земель от наводнений посредством дамб обвалования большой протяженности необходимо обеспечить безаварийную работу всей защитной системы при пропуске катастрофических паводков, параметры которых превышают расчетные величины [1, 2]. Обеспечение безаварийной эксплуатации развитых систем обвалования при пропуске катастрофических паводков осуществляется применением противоаварийных резервных емкостей, аккумулирующих избыточную часть максимального стока [3].

При этом для управления режимом заполнения резервной емкости используется частично регулируемый процесс. Техническая реализация этого процесса достигается следующим образом. В качестве водосливного фронта на этапе проектирования назначается участок дамбы в пределах размещения резервной емкости. Выбирается отметка гребня водослива. На ней производится укрепление дамбы путем бетонирования, укладки сборных железобетонных плит, блоков с омоноличиванием, устройства глиняной подушки и т.д. Весь водосливный фронт может быть разделен на секции промежуточными бычками или шпунтовыми стенами. Аналогично ограничивается максимальная длина водосливного фронта. До проектных отметок гребня дамбы секции водосливного фронта засыпаются грунтом. Предусмотрен вариант перекрытия секций водосливного фронта подпорными гидротехническими сооружениями из наполняемых мягких и мембранных плотин, промежуточных валиков и др. [4]. Управление процессом заполнения противоаварийной емкости в этом случае осуществляется путем последовательного открытия требуемого количества секций.

Важным фактором, влияющим на эффективность работы противоаварийных резервных емкостей, является рациональный режим их использования. Последний предполагает выбор оптимального момента начала заполнения и определения гидрографа расходов с целью поддержания допустимого режима в междамбовом пространстве.

Основной предпосылкой начала заполнения противоаварийных резервных емкостей является превышение допустимого уровня воды в междамбовом пространстве на участке, контролируемом данной емкостью. В результате этого может возникнуть аварийная ситуация: перелив через гребень, потеря устойчивости откосов и разрушение дамб. Согласно [1, 2] системы обвалования при проектировании рассчитываются на уровень определенной обеспеченности в зависимости от класса капитальности сооружения. Поэтому данный уровень может служить критерием безопасности работы системы обвалования. Следует учитывать, что достижение или превышение этого уровня является необходимым, но недостаточным условием для определения

момента начала заполнения. Гидрологическая обстановка может потребовать принятия решения об открытии резервных емкостей, особенно в случае интенсивного нарастания расходов и уровней.

Определение момента вскрытия резервной емкости и назначение гидрографа расходов, идущих на ее заполнение, взаимосвязаны.

В общем случае в качестве критерия выбора рационального режима использования резервных емкостей может быть принят критерий минимума народнохозяйственных издержек при пропуске паводка, обеспеченность которого превышает расчетную. В состав издержек входят затраты, связанные с использованием резервных емкостей, и ущерб в системе защиты, вызванный пропуском избыточного максимального стока. Для случаев, когда резервная емкость может аккумулировать весь избыточный сток, режим ее использования должен быть выбран таким, чтобы ущерб от прохождения стока в системе обвалования равнялся нулю. Тогда критерием оптимизации режима аккумуляирования будет являться минимум затрат, связанных с использованием резервной емкости, что соответствует минимуму объема воды, сбрасываемого в резервную емкость при обеспечении безопасной работы системы защиты. На основании этого предлагается способ определения рациональных режимов противоаварийных резервных емкостей (рис. 1). На первом этапе необходимо получить гидрологическую информацию, которая является основой для проведения дальнейших работ. Далее производится расчет прохождения паводка без учета работы резервных емкостей. Результаты расчетов анализируются с целью выявления необходимости использования противоаварийных резервных емкостей. Если уровенный режим для складывающихся гидрологических условий не превышает расчетный для системы, то принимается решение о пропуске паводка без включения в работу резервных емкостей. Если допускается превышение уровней, то назначается расчетная схема использования емкостей и предварительно определяют объемы аккумуляирования. В целях рационального использования противоаварийных емкостей назначается ряд моментов начала заполнения и производится непосредственное определение рационального режима затопления. В этой связи при первом выбранном моменте начала заполнения производится расчет прохождения паводка по системе защиты с учетом работы резервных емкостей. В случае, если уровень на рассматриваемом участке превышает допустимый, определяют расход, который необходимо отвести в резервную емкость.

Величина расхода заполнения вычисляется как разность между расходом при допустимом уровне и для данного временного интервала в результате расчета. После назначения расхода заполнения расчет прохождения паводка для этого интервала повторяется. Если при этом не достигается требуемое снижение уровня, а такое положение может возникать из-за того, что связь уровней и расходов нелинейная, то выполняется корректировка расхода заполнения: определяется дополнительная часть расхода к ранее определенному, которая должна быть отведена в резервную емкость. Это продолжается до тех пор, пока не будет выполнено условие по обеспечению требуемого уровенного режима, либо противоаварийная резервная емкость заполняется полностью и дальнейшее увеличение сбросных расходов станет невозможным. В этом случае необходимо пересмотреть расчетную схему использования резервных

емкостей или, если это возможно, увеличить их объемы.

Расчеты проводят для запланированных моментов начала заполнения противоаварийных емкостей, в результате чего определяют ряд возможных режимов использования. На основании минимального требуемого объема выбирают рациональный режим заполнения резервных емкостей.

Для выбранного режима заполнения, используя полученные значения расходов, устанавливают параметры водосливного фронта.

Принято, что заполнение противоаварийной резервной емкости осуществляется через водосбросное сооружение типа бокового водослива с широ-

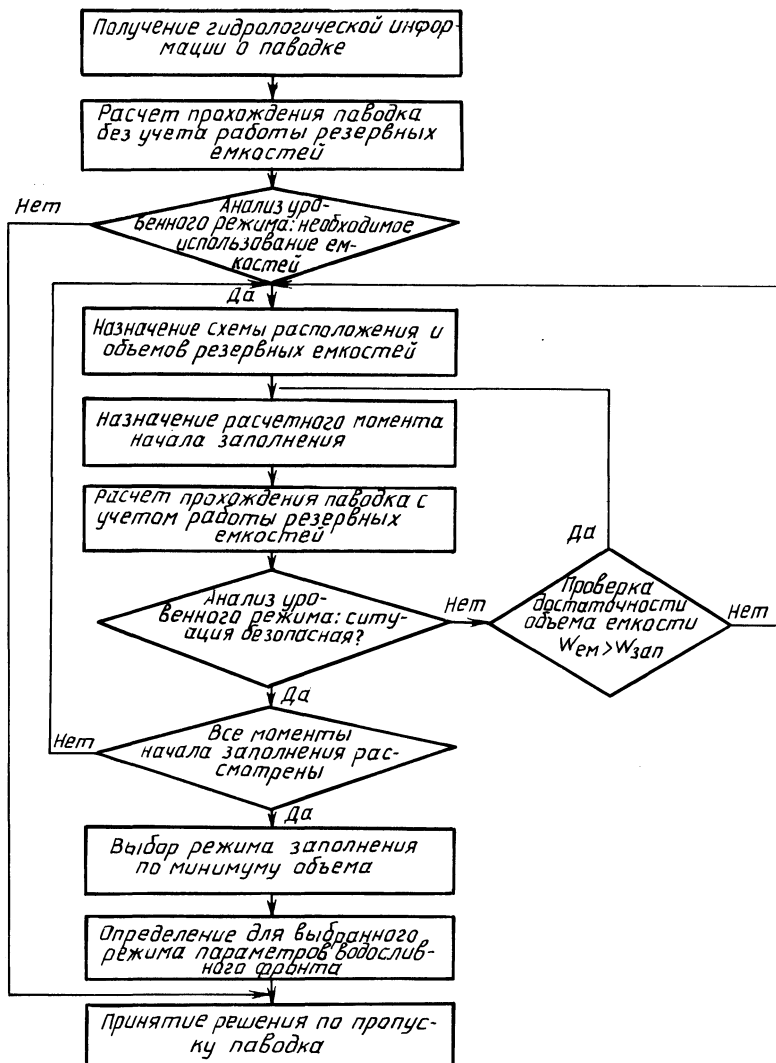


Рис. 1. Принципиальная схема определения рациональных режимов заполнения противоаварийных резервных емкостей

ким порогом. Такое представление водослива соответствует рекомендуемому устройству водосливного фронта. Для расчетов используется формула

$$Q = m\sigma_6 b \sqrt{2g} H^{3/2},$$

решенная относительно ширины водослива при принятии коэффициента бокового сжатия  $\sigma_6$  согласно рекомендациям Х.Энгельса [5]. Учет влияния уровня воды в резервной емкости на условие истечения через водослив производится с использованием топографических характеристик емкости и критериев, определяющих режим работы водослива с широким порогом.

Длина водосливного фронта используется при пропуске паводка для управления процессом заполнения противоаварийной резервной емкости.

Для определения рациональных режимов использования резервных емкостей разработана программа, реализующая алгоритм расчета трансформации максимального стока [6].

С целью апробации программы и алгоритма выполнены расчеты по определению рациональных режимов заполнения резервных емкостей на конкретном объекте (участок р. Припять протяженностью 255 км). От начала участка вниз по течению на расстоянии 47 км обеспечивался допустимый уровень. На основании анализа топографического материала назначалось расположение противоаварийных резервных емкостей на расстоянии 39 и 70 км от начала расчетного участка; для этих емкостей были построены топографические характеристики. В качестве расчетного принят паводок 0,5 %-й обеспеченности. В табл. 1 приведены расчетные данные по уровенному режиму.

Как видно из данных табл. 1, выбранный в результате расчетов режим заполнения противоаварийных резервных емкостей удовлетворяет решению

Таблица 1

**Влияние использования противоаварийных резервных емкостей на уровенный режим контролируемого участка**

Расстояние от начальной точки расчета, км	Допустимый уровень на участке (1 % обеспеченности), м	Расчетный уровень при пропуске паводка 0,5 % обеспеченности (без использования резервных емкостей), м	Расчетный уровень при рациональном режиме использования резервных емкостей, м	Снижение уровня от использования резервных емкостей, см	Состояние уровенного режима относительно допустимого (+), см
46,90	30,17	30,63	30,12	51	-5
56,40	29,91	30,30	29,78	52	-13
61,55	29,61	29,85	29,31	54	-30
66,18	29,30	29,38	28,78	60	-52
70,14	29,08	29,11	28,50	61	-58
98,07	26,70	26,89	26,34	55	-36
142,45	24,48	24,91	23,38	53	-10
167,84	23,30	23,63	23,11	52	-19
194,67	21,50	21,79	21,46	33	-4
254,75	17,40	17,59	17,36	23	-4

**Длина водосливного фронта при рациональном режиме  
использования резервных емкостей, м**

Месторасположение емкости от начальной точки расчета, км	Период использования емкостей, дни														Объем используемой емкости, м <sup>3</sup>
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
49	30	31	69	115	128	155	147	32	40	52	60	63	77	89	851
70	82	128	137	153	73	53	32	41	29	8	40	62	72	86	900

поставленной задачи, т.е. уровни на контролируемом участке не превышают допустимые. При этом использование резервных емкостей обеспечивает безаварийную работу.

Полученные в результате расчетов расходы воды, идущие на заполнение емкостей, использованы для определения требуемой в каждый расчетный интервал периода их работы длины водосливного фронта. Вычисленные значения параметров водосливного фронта для каждой используемой резервной емкости приведены в табл. 2.

Приведенные результаты показывают, что назначенный режим удовлетворяет возможностям управления процессом заполнения противоаварийных резервных емкостей. Это обусловлено тем, что длина водосливного фронта постепенно нарастает до своего максимального значения, что позволяет путем подбора соответствующих размеров секций водослива достичь отвода в емкость требуемого в каждый конкретный момент времени расхода.

Способ определения рациональных режимов заполнения противоаварийных резервных емкостей может применяться как на этапе проектирования, когда определяются параметры системы защиты, так и в процессе эксплуатации для выбора правильных решений по пропуску прогнозируемого паводка.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. СНиП П-50-74. Гидротехнические сооружения речные. Основные положения проектирования. — М., 1975. — 25 с.
2. СНиП 2.01.04-83. Определение расчетных гидрологических характеристик. М., 1983. — 93 с.
3. Гриневич Л.А., Рутковский П.П. О возможности использования временных резервных емкостей для регулирования уровня режима паводков в бассейне р. Припять // Вопросы гидравлики и инж. гидрологии. — 1983. — С. 82—86.
4. Сергеев Б.И., Степанов П.Н., Шумаков Б.Б. Мягких конструкции — новый вид гидротехнических сооружений. — М., 1971. — 127 с.
5. Богомолов А.И., Михайлов К.А. // Гидравлика. — М., 1972. — 648 с.
6. Зиверт А.А., Хелманис В.П. Расчет трансформации паводочных волн в русловых системах с учетом берегового регулирования // Водные ресурсы. — 1973. — № 6. — С. 118—125.



## ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

На качественный состав дренажных и рудничных вод оказывают влияние химический состав дренируемых водоносных горизонтов, способы разработки и осушения месторождения. Основными примесями дренажных и рудничных вод являются взвешенные вещества, нефтепродукты, железо.

Образующиеся на горнодобывающих предприятиях воды целесообразно направлять на повторное использование. Дренажные воды можно использовать на нужды хозяйственно-питьевого водоснабжения. Рудничные воды могут быть использованы для технических нужд предприятий, орошения сельхозугодий, восполнения запасов подземных вод.

Очищенная дренажная вода, используемая для целей хозяйственно-питьевого водоснабжения, должна удовлетворять требованиям отечественного стандарта на питьевую воду. При этом необходимо уменьшить в ней содержание железа до 0,3 мг/л, нефтепродуктов до 0,3 мг/л. Солеосодержание такой воды не должно превышать 1000 мг/л.

Требования, предъявляемые к очищенным рудничным водам, используемым в системах оборотного водоснабжения, зависят от вида производства [1]. Например, для целей обогащения пригодны рудничные воды даже без предварительной очистки. Однако для некоторых производств непригодна вода с повышенным содержанием взвешенных веществ и железа. Для целей орошения возможно использование вод с общим солеосодержанием до 1000 мг/л.

Исходя из этих требований необходима очистка дренажных и рудничных вод от взвешенных веществ, нефтепродуктов, соединений железа.

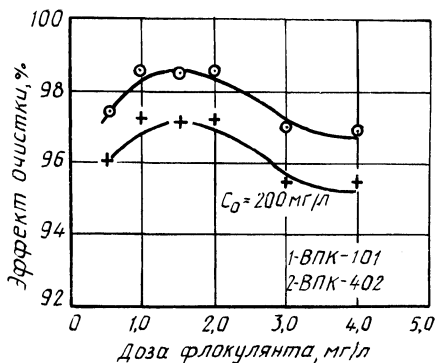
Для очистки от взвешенных веществ и нефтепродуктов рудничные воды необходимо подвергать отстаиванию. В ряде случаев простого отстаивания недостаточно, поэтому необходимо прибегать к интенсификации отстаивания. Интенсифицировать процесс отстаивания можно с помощью коагулянтов и флокулянтов. Более целесообразным представляется применение для целей

Таблица 1

Характеристика дренажных и рудничных вод

Наименование предприятия	Исследуемая вода	pH	Взвешенные вещества, мг/л	Нефтепродукты, мг/л	Железо общее, мг/л	Солеосодержание, мг/л
Столинский ГОК	Карьерная	7,7	105	4,5	8,4	459
Лебединский ГОК	Дренажная	7,6	—	—	10,4	384
	Карьерная	7,8	50	3,73	2,8	570
Полтавский ГОК	Дренажная	7,5	—	—	1,5	3056
Михайловский ГОК	Карьерная	7,8	24	36	—	537

Рис. 1. Зависимость эффекта осаждения взвешенных веществ от дозы флокулянтов  
 1 — ВПК-101; 2 — ВПК-402



интенсификации процесса отстаивания высокомолекулярных флокулянтов. При очистке рудничных вод было апробировано применение флокулянтов ВПК-101 и ВПК-402 (рис. 1). Доза флокулянта составляла 0,5–3,0 мг/л. Анализ опытных данных показал, что оптимальная доза флокулянтов находится в пределах 1–2 мг/л, причем для осветления рудничных вод предпочтительнее флокулянт ВПК-101.

При использовании рудничных вод для целей орошения требуется дополнительная их очистка от нефтепродуктов. Наличие последних в оросительной воде вызывает ухудшение структуры почвы, снижение урожайности, ухудшение санитарного состояния сельхозугодий.

Очистку воды от нефтепродуктов при наличии в системе орошения регулирующих емкостей можно рекомендовать непосредственно в них. При этом они будут играть роль биопруда. Интенсифицировать процесс очистки сточных вод от нефтепродуктов можно путем использования водной растительности. Механизм очистки вод от нефтепродуктов объясняется стимуляцией жизнедеятельности нефтеокисляющих бактерий продуктами выделения растений и частичным питанием водорослей веществами, содержащимися в сточных водах. Использование водной растительности при подготовке рудничных вод для целей орошения целесообразно еще и потому, что она обуславливает резкое снижение соленосодержания воды [2].

Если по местным условиям невозможно осуществлять биохимическую доочистку сточных от нефтепродуктов в биопрудах, то можно рекомендовать физико-химическую их очистку.

Наиболее приемлем для отделения нефтепродуктов способ флотации [3]. Для рудничных вод, прошедших отстаивание с флокуляцией, целесообразна рециркуляционная схема напорной флотации, при которой в сатуратор подается 20–50 % осветленной жидкости, а исходная поступает непосредственно во флотокамеру. При этом эффект очистки повышается за счет содержания в жидкости сфлокулированных, но не осевших в отстойниках загрязнений. Напорная флотация позволяет извлечь 90–95 % нефтепродуктов, а также до 95 % взвешенных веществ, 50–70 % ХПК, 40–50 % БПК, до 70 % ПАВ.

Для глубокой очистки рудничных вод рекомендуется применение фильтра-флотатора, разработанного на кафедре водоснабжения и водоотведения БПИ (рис. 2). Исходная вода и рециркуляционный расход подаются в камеру флотации, где выделяются нефтепродукты и мелкая взвесь, не задержанные в

отстойниках. Пена собирается устройством типа спирали Архимеда в лоток 14 [4]. Из камеры флотации жидкость поступает в камеру фильтрации, проходит слой гранулированного пенополиуретана 8 и отводится по трубе 10. Промывка загрузки производится обратным потоком горячей воды, подаваемой по трубе 11. Для отжима загрузки по трубе 12 подается сжатый воздух, который расширяет резиновую оболочку 13. Сжимаемая загрузка отдает сорбированные нефтепродукты. Промывная вода собирается в лоток 14 и отводится вместе с пеной в разделочный резервуар.

По данным анализа устройство обеспечивает очистку сточных вод от нефтепродуктов на 90, от взвешенных веществ на 97—98 %.

Для обезжелезивания воды наиболее распространенным методом является ее фильтрование на скорых фильтрах с загрузкой из кварцевого песка (диаметр зерен 0,5—2 мм). С целью выявления возможности использования других фильтрующих материалов проведены экспериментальные исследования зернистых синтетических материалов, щебня и керамзита в качестве загрузки фильтров обезжелезивания.

Результаты исследования гранул поливинилхлорида и пенополистирола размером 1—2 мм показали, что они могут использоваться для обезжелезивания воды. Однако вследствие небольших величин удельной поверхности последние практически не превосходят по фильтрационным свойствам кварцевый песок.

В [5] сообщалось об использовании колотого гранитного щебня для обезжелезивания воды. Предложено осуществлять фильтрование при скоростях до 35 м/ч.

Результаты исследований, проведенные в Белорусском политехническом институте, показали, что скорости фильтрования железосодержащей воды через щебень действительно превосходят рекомендуемые для песка, но при содержании железа в исходной воде до 5—10 мг/л и высоте слоя загрузки 1,0—1,5 м не превышают 11—15 м/ч.

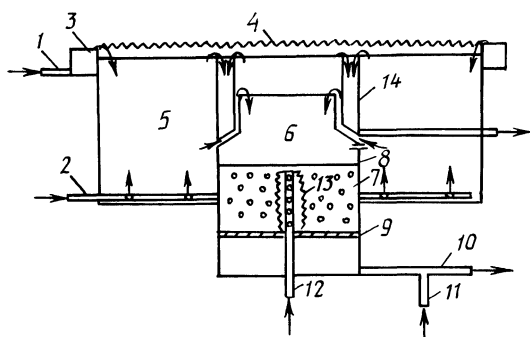


Рис. 2. Схема фильтра-флотатора:

1 — трубопровод подачи исходной жидкости; 2 — трубопровод подачи рециркуляционного расхода; 3 — кольцевой лоток; 4 — зубчатый водослив; 5 — зона флотации; 6 — зона фильтрации; 7 — пенополиуретановая загрузка; 8 — ограничительная сетка; 9 — перфорированная перегородка; 10 — отводной трубопровод; 11 — промывной трубопровод; 12 — подача воздуха; 13 — надувная оболочка; 14 — сборный лоток

Необходимыми свойствами для обезжелезивания воды обладают керамзитовые загрузки. Размер зерен загрузки составляет 3...8 мм, скорость фильтрации около 13 м/ч. Преимуществом керамзитовой загрузки являются небольшие потери напора в течение фильтроцикла. Регенерацию фильтрующих загрузок из керамзита следует осуществлять обратной промывкой интенсивностью 8...15 м/с м<sup>2</sup> в течение 8...12 минут. Меньшая величина интенсивности должна приниматься для керамзита с меньшим объемным весом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В о в к Н.Е. Обратное водоснабжение и подготовка хвостов к складированию. — М., 1977. — 150 с. 2. Биологический метод очистки поверхностных вод от нефтяных загрязнений и высокоминерализованных стоков / Проспект ВДНХ СССР. СевНИИГИМ. — Л., 1979. — 3 с. 3. Руководство по проектированию и расчету флотационных установок для очистки сточных вод. — М., 1978. — 33 с. 4. Устройство для очистки сточных вод: А. с. 835965, СССР. 07.06.81. 5. Технические указания по применению высокопроизводительных фильтров с загрузкой из гранитного щебня для обезжелезивания воды. — Киев, 1976. — 23 с.

УДК 628.356.3

Е.И.ДМУХАЙЛО (БИСИ), В.Г.ОВСЯНИКОВ,  
канд. техн. наук (БПИ), Н.В.ВАСИН,  
канд. техн. наук (БИСИ)

### МАССОПЕРЕДАЧА КИСЛОРОДА ПРИ ПОВЕРХНОСТНОЙ СТРУЙНОЙ АЭРАЦИИ

В последние годы струйная аэрация для биохимической очистки сточных вод вызывает большой интерес и находит промышленное применение [1, 2].

Наиболее полно изучена массопередача свободнопадающими струями на водосливах и в меньшей степени — свободными напорными струями, истекающими из различного типа насадок, конфузоров, работающих с существенной инверсией струи.

Большинство авторов изучали процесс вовлечения пузырьков, распределение их по размерам, объемный расход газа и возможные механизмы вовлечения в зависимости от различных параметров. Однако по массопередаче кислорода, как конечной цели процесса, имеется мало данных [3].

При струйной аэрации турбулентная струя жидкости проходит через воздух в заполненный жидкостью аэрационный резервуар, вовлекая при этом значительное количество воздуха и образуя водовоздушную смесь с большой площадью раздела фаз.

После выхода из насадка в окружающую среду свободная струя жидкости постепенно расширяется, скорость ее течения возрастает и на поверхности струи наблюдаются волнообразные возмущения.

Одновременно, захватывая с собой часть газа, струя образует газовую полость небольшой глубины, через дно которой входит в жидкость. Вследствие пульсаций волнового пограничного слоя происходит коллапс газовой полости, приводящий к образованию множества мелких первичных пузырьков, движущихся вниз и в стороны.

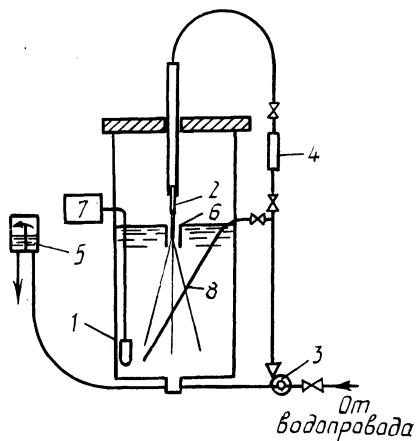


Рис. 1. Экспериментальная установка:  
 1 — колонна с прозрачной стенкой  
 0,5 x 0,5 x 1,5 м<sup>3</sup>; 2 — насадок; 3 — насос;  
 4 — ротаметр; 5 — подвижный водослив;  
 6 — направляющий насадок; 7 — анализатор  
 растворенного кислорода; 8 — трубопровод  
 струйного перемешивания

Наличие волн возмущения на поверхности жидкости, зависящих от масштаба установки и структуры газожидкостного потока, приводит к дискретности процесса вовлечения газа за счет изменения свободного для прохода газа сечения, а также его частичного захлопывания в момент прохождения волны. В результате множественной коалесценции первичных пузырьков образуются более крупные вторичные пузырьки, всплывающие к поверхности жидкости.

Таким образом, при струйной аэрации образуются две отличные друг от друга зоны пузырьков, для которых невозможно охарактеризовать распределение во времени и пространстве поверхностей раздела фаз. Поэтому массопередача может быть надежно рассчитана лишь с помощью таких независимых переменных систем, как расходы каждой из фаз, их физические свойства, параметры струй, геометрии струйных аэраторов.

При высоких скоростях истечения струи пузырьки внутри двухфазной области находятся в условиях интенсивной турбулентности, что приводит к полному насыщению жидкости кислородом. Учитывая это и пренебрегая массопередачей через поверхность жидкости в резервуаре, приходим к простому уравнению кислородного баланса

$$\frac{dC}{dt} = \frac{Q(C^* - C_t)}{W} \quad (1)$$

С другой стороны, в соответствии с основным уравнением массопередачи

$$\frac{dC}{dt} = Ka(C^* - C_t) \quad (2)$$

Приравнявая (1) и (2), имеем

$$KaW = Q.$$

В критерий массопередачи кислорода при струйной аэрации должен входить расход жидкости. Как показал анализ размерностей, отношение объем-

ного коэффициента массопередачи к расходу жидкости описывается следующим уравнением:

$$\frac{KaW}{Q} = f(Fr, \frac{h}{d}, Re, We, \alpha).$$

Так как физические свойства жидкости не изменялись в процессе опытов и угол наклона насадка в пределах  $30^\circ - 90^\circ$  не оказывал существенного влияния на массопередачу, критериальное уравнение массопередачи примет вид

$$\frac{KaW}{Q} = C \left( \frac{V^2}{gd} \right)^{a_1} \left( \frac{h}{d} \right)^{a_2}.$$

Объемный коэффициент массопередачи определялся по методу переменного дефицита кислорода

$$Ka = \frac{2,3 [l_g(C^* - C_1) - l_g(C^* - C_2)] K_T}{\Delta t}.$$

Поскольку в любой аэрационной системе существует градиент концентрации растворенного кислорода, то для повышения точности и воспроизводимости результатов измерений методика была модифицирована применительно к струйной аэрации, при которой имеет место локальный перенос кислорода и высокие скорости насыщения. Этот метод предусматривает измерения с переключением подачи воды от насадка в трубопровод струйного перемешивания, что позволяет получать для любого момента времени среднюю величину концентрации растворенного кислорода.

Используемая в настоящих исследованиях установка показана на рис. 1.

С целью стабилизации условий входа струи в жидкость, зависящих от соотношения параметров струи и объема установки, оказывающих влияние на массопередачу, в точке входа струи в жидкость устанавливался короткий направляющий насадок. Растворенный кислород измерялся анализатором АКВА-1.

Расходы воды определялись ротаметром. Применялись латунные насадки с  $l/d = 10$ , диаметром 5; 6,5; 9,5; 11,5 мм. Скорость истечения составляла 3–10 м/с, высота истечения – 5–15 см.

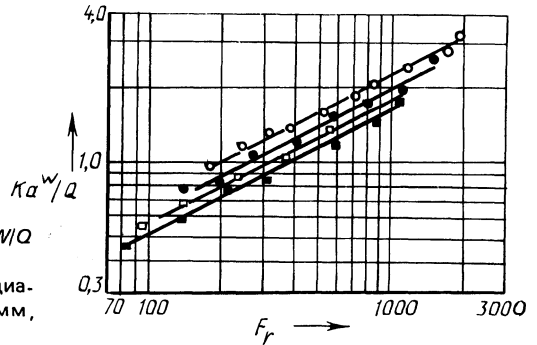
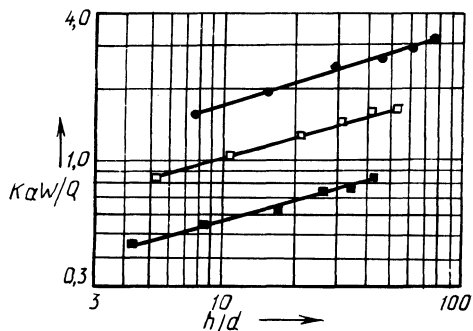


Рис. 2. Зависимость критерия  $KaW/Q$  от критерия Фруда

Высота истечения струй – 10 см; диаметры насадков:  $\circ$  – 5 мм,  $\bullet$  – 6,5 мм,  $\square$  – 9,5 мм,  $\blacksquare$  – 11,5 мм

Рис. 3. Зависимость критерия  $KaW/Q$  от критерия  $h/d$ :  
 ● —  $d = 6,5$  мм,  $V = 8,15$  м/с; □ —  $d = 9,5$  мм,  $V = 5,7$  м/с; ■ —  $d = 11,5$  мм,  $V = 3,5$  м/с



Результаты измерений представлены на рис. 2 и 3. В окончательном виде уравнение массопередачи имеет вид

$$\frac{KaW}{Q} = 0,027F_r^{0,5} \left( \frac{h}{d} \right)^{0,3} \quad (3)$$

Экспериментальные значения коэффициентов массопередачи аппроксимируются уравнением (3) с точностью  $\pm 7\%$ . Это уравнение может быть использовано для расчета струйных аэраторов с параметрами работы, лежащими в исследованной области.

Эффективность аэрации, как показали проведенные исследования, обратно пропорциональна скорости и достигает высоких значений при малых диаметрах и скоростях истечения струи.

Интересно отметить, что для поверхностных механических аэраторов, вовлекающих воздух струей жидкости, срывающейся с лопасти, эффективность аэрации лежит в пределах 2–3 кг  $O_2$ /кВт·ч, при оптимальных скоростях вращения 3–5 м/с, что согласуется с полученными данными для струй диаметром 9,5–11,5 мм. В целом при струйной аэрации не существует оптимальной скорости истечения. Скорости истечения будут диктоваться определенными уровнями массопередачи и перемешивания, применяемыми конструкциями струйных аэраторов и реакторов, насосного оборудования.

В результате исследований можно наметить некоторые пути интенсификации процесса массопередачи кислорода при поверхностной струйной аэрации. Массопередачу можно увеличить, используя раздробленную (с нарушенной сплошностью течения) струю, а также применяя многосопловые конструкции струйных аэраторов с малыми диаметрами выходных отверстий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Карелин Я.А., Жуков Д.Д., Репин Б.Н. Очистка производственных сточных вод в аэротенках. — М., 1973. — 222 с. 2. Исследование работы аэратора струйного типа / Сальников Б.Ф., Караваев Н.И. // Тр. ин-та / ВОДГЕО. — 1980. — С. 23–25.



## УДАЛЕНИЕ ГИПСА ИЗ ОБОРОТНОЙ ВОДЫ С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАЗВУКА

Способ ультразвуковой обработки используется для стабилизации нейтрализованных известковым молоком сульфатсодержащих промывных вод. Ранее [1] проведены предварительные исследования по удалению сульфата кальция из оборотной воды при обработке ее ультразвуком. В качестве факторов, которые влияют на кристаллизацию сульфата кальция, рассматривались интенсивность и длительность озвучивания, частота колебаний, температура и pH раствора, исходная концентрация сульфата кальция в воде, разрыв во времени между концом нейтрализации стока и началом озвучивания.

Нами изучено взаимодействие основных технологических факторов, характеризующих раствор и режим его обработки: температуры и концентрации раствора, интенсивности и продолжительности озвучивания.

Проведены опыты с фильтрованными и нефильрованными водами, с ультразвуковой обработкой во время и после нейтрализации промывных вод. Озвучивание промывных вод во время нейтрализации способствует возрастанию скорости кристаллизации сульфата кальция, но в меньшей степени, чем при озвучивании предварительно нейтрализованных промывных вод. Разницу в скоростях кристаллизации можно объяснить ненасыщенностью раствора по сульфату кальция в начале нейтрализации, так как процесс образования сульфата кальция происходит не мгновенно, поэтому сильное воздействие ультразвук оказывает только в конце нейтрализации. Исследования показали, что в нефильрованных водах процесс кристаллизации сульфата кальция идет интенсивнее за счет образовавшихся его зародышей.

Для исключения активирующего влияния кристаллов гипса на дальнейший процесс кристаллизации модельную воду, нейтрализованную до  $\text{pH } 9 \pm 0,1$ , отфильтровывали. Дополнительное воздействие на кристаллизацию сульфата кальция может оказывать наличие посторонних ионов в водопроводной воде, поэтому чтобы исключить это влияние, модельную промывную воду и известковое молоко (10 % по CaO) готовили на дистиллированной воде. Нейтрализованную и отфильтрованную воду объемом 500 мл быстро подогревали (2–4 мин), если это было необходимо по условиям опыта, на кипящей водяной бане и подвергали ультразвуковому воздействию в соответствии с планом эксперимента. Обработанные воды помещали в термостатируемую ванну для отстаивания, где температура поддерживалась с точностью  $\pm 0,5$  °C. Анализы на содержание  $\text{CaSO}_4$  проводили по иону кальция. В каждом опыте проведено по три параллельных испытания. В качестве источника ультразвуковых колебаний использован диспергатор типа УЗДН-1. Частота ультразвука 15 кГц.

Чтобы более полно выявить силу воздействия названных ранее факторов и их взаимодействий на процесс кристаллизации сульфата кальция во время ультразвуковой обработки, был реализован полный факторный эксперимент

типа 2<sup>4</sup>. [2–4]. В табл. 1 приведены пределы варьирования факторов, выбранных с таким расчетом, чтобы охватить основные показатели.

В качестве параметров оптимизации принята остаточная концентрация сульфата кальция в воде после ультразвуковой обработки через 30, 60, 120 и 240 мин отстаивания без перемешивания. Матрица планирования эксперимента и осредненные результаты опытов приведены в табл. 2.

На основании статистического анализа полученных данных [2–4] установлено, что значения дисперсии опытов однородны, ошибка составляет  $95 \pm \pm 30$  мг/л, доверительный интервал коэффициентов уравнений регрессии 24–47, максимальное значение критерия Фишера (опытного) не превышает 1,86 при табличном его значении 2,35, т. е. уравнения регрессии адекватны опытными данным.

Обработка результатов дала возможность получить математическое описание процесса в виде уравнений (1–5), устанавливающих зависимость остаточного содержания сульфата кальция в определенный момент времени от рассматриваемых факторов:

$$Y_1 = C_{3B} = 3865 - 366X_1 - 195X_2 - 537X_3 + 479X_4 - 86X_1X_2 - 257X_1X_3 - 219X_1X_4 - 99X_2X_3 - 62X_2X_4 - 407X_3X_4 - 116X_1X_3X_4 + 48X_2X_3X_4 + 96X_1X_2X_3X_4; \quad (1)$$

$$Y_2 = C_{30} = 3557 - 229X_1 - 178X_2 - 749X_3 - 277X_4 - 116X_1X_2 - 55X_1X_3 - 48X_1X_4 - 89X_2X_4 - 544X_3X_4 + 120X_1X_3X_4 + 96X_2X_3X_4 + 96X_1X_2X_3X_4; \quad (2)$$

$$Y_3 = C_{60} = 3454 - 219X_1 - 144X_2 - 807X_3 + 263X_4 - 123X_1X_2 - 44X_1X_4 - 44X_2X_3 - 82X_2X_4 - 534X_3X_4 + 140X_1X_3X_4 - 44X_1X_2X_4 + 127X_2X_3X_4 + 82X_1X_2X_3X_4; \quad (3)$$

$$Y_4 = C_{120} = 3352 - 181X_1 - 157X_2 - 869X_3 + 239X_4 - 99X_1X_2 - 51X_1X_4 + 89X_2X_3 - 113X_2X_4 - 489X_3X_4 - 24X_1X_2X_3 + 137X_1X_3X_4 - 34X_1X_2X_4 + 150X_2X_3X_4 + 89X_1X_2X_3X_4; \quad (4)$$

$$Y_5 = C_{240} = 3181 - 123X_1 - 171X_2 - 869X_3 + 205X_4 - 51X_1X_2 + 41X_1X_3 - 48X_1X_4 + 120X_2X_3 - 133X_2X_4 + 363X_3X_4 + 106X_1X_3X_4 + 174X_2X_3X_4 + 44X_1X_2X_3X_4. \quad (5)$$

Проверка уравнений показала, что линейная часть математических моделей не адекватна опытными данным (максимальное отклонение расчетного значения остаточной концентрации отличается от опытного на 35%). Адекватное уравнение регрессии получается только с учетом всех значимых эффектов взаимодействия. С целью их упрощения при оценке состояния системы следует 1 или 2 фактора брать на нулевом уровне, что приведет к значительному сокращению уравнений в кодированных переменных. Расхождение между опытами и расчетными данными не превышает  $\pm 5\%$ . Каждое из уравне-

Пределы варьирования факторов

Показатели	Температура, °С	Исходная концентрация, мг/л	Интенсивность ультразвука, Вт/см <sup>2</sup>	Продолжительность озвучивания, мин
Кодовые обозначения	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
Верхний уровень (+)	60	5500	31	19
Нижний уровень (-)	20	3500	1	1

Таблица 2

Матрица планирования и результаты эксперимента

Номера опытов	Факторы				Остаточная концентрация, мг/л				
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$Y_1$ $C_{3В}$	$Y_2$ $C_{30}$	$Y_3$ $C_{60}$	$Y_4$ $C_{120}$	$Y_5$ $C_{240}$
1	+	+	+	+	2155	2103	2103	2086	2086
2	-	+	+	+	4019	2599	2565	2291	2189
3	+	-	+	+	2719	2548	2377	2189	2155
4	+	+	-	+	4754	4207	4036	3796	3557
5	+	+	+	-	2411	2326	2291	2223	2172
6	-	-	+	+	4685	2890	2497	2309	2155
7	-	+	-	+	5404	5335	5301	5062	4463
8	+	-	-	+	5387	5352	5335	5301	5027
9	-	-	-	+	5592	5592	5592	5575	5387
10	-	+	+	-	3488	3437	3283	2993	2565
11	+	-	+	-	3475	3112	2890	2702	2462
12	-	-	+	-	3557	3420	3249	2441	2633
13	+	+	-	-	3488	3488	3488	3488	3488
14	-	+	-	-	3506	3506	3506	3506	3488
15	+	-	-	-	3471	3453	3437	3437	3437
16	-	-	-	-	3471	3471	3471	3471	3471

ний описывает процесс кристаллизации сульфата кальция в фиксированный момент времени. Анализ уравнений (1–5) показывает влияние температуры ( $X_3$ ) на процесс удаления сульфата кальция из его пересыщенных растворов во всем исследуемом промежутке времени – с повышением температуры снижается остаточная концентрация сульфата кальция. Процесс кристаллизации существенно зависит от исходной концентрации  $\text{CaSO}_4$  ( $X_4$  – увеличение исходной концентрации сульфата кальция ведет к увеличению его остаточного содержания, но зависимость эта в 1,75 раза уменьшается после 30-минутного отстаивания. Можно сделать вывод, что скорость удаления сульфата кальция под воздействием ультразвука в начале процесса наибольшая, после 30-минутного отстаивания – уменьшается, остаточная концентрация  $\text{CaSO}_4$  стремится к равновесной. Об этом свидетельствует незначительное уменьшение коэффициентов при  $X_4$  в уравнениях (1–5).

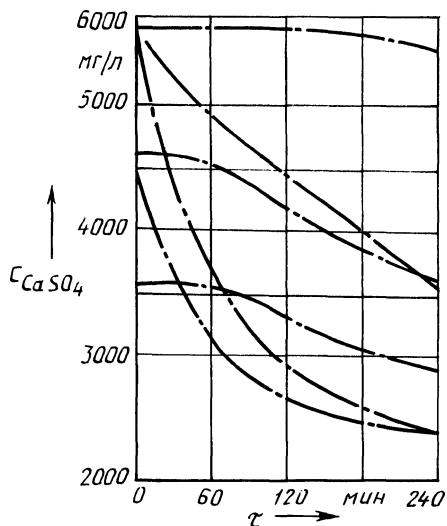


Рис. 1. Кристаллизация сульфата кальция из оборотной воды без обработки ее ультразвуком. Начальная концентрация  $\text{CaSO}_4$  (мг/л) в воде: 1,1'; 1'' — 5500; 2,2'; 2'' — 4500; 3,3'; 3'' — 3500 при температурах обработки 20, 40, 60 °C

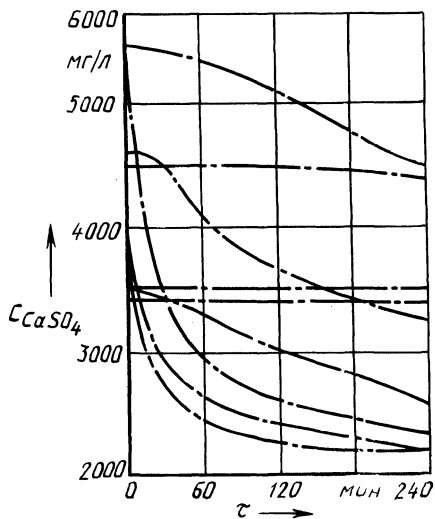


Рис. 2. Кристаллизация сульфата кальция из оборотной воды при обработке ее ультразвуком в течение 1 мин при интенсивности  $31 \text{ Вт/см}^2$ . Начальная концентрация  $\text{CaSO}_4$  (мг/л) в воде: 1,1'; 1'' — 5500; 2,2'; 2'' — 4500; 3,3'; 3'' — 3500 при температурах 20, 40 и 60 °C

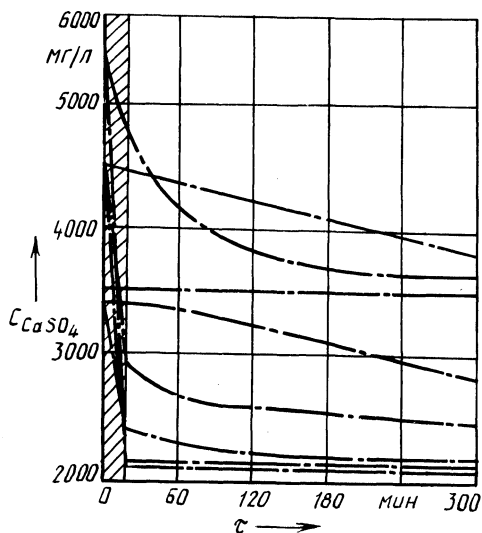


Рис. 3. Кристаллизация сульфата кальция из оборотной воды при обработке ее ультразвуком в течение 19 мин при интенсивности  $31 \text{ Вт/см}^2$ . Начальная концентрация  $\text{CaSO}_4$  (мг/л) в воде: 1,1'; 1'' — 5500; 2,2'; 2'' — 4500; 3,3'; 3'' — 3500 при температурах 20, 40 и 60 °C

Существенное влияние оказывает продолжительность озвучивания. С течением времени, и в частности через 240 мин, оно уменьшается по сравнению с другими факторами. Из всех изучаемых факторов интенсивность озвучивания в чистом виде вносит меньший вклад в кристаллизацию. Коэффициенты при этом факторе в 4–6 раз больше доверительных интервалов, следовательно, этот фактор также оказывает влияние на ход процесса кристаллизации — чем больше интенсивность озвучивания, тем меньше остаточная концентрация сульфата кальция.

На рис. 1–3 приведены кривые кристаллизации сульфата кальция из пересыщенных растворов в зависимости от температуры, исходной концентрации сульфата кальция, интенсивности и длительности озвучивания. Раствор, не обработанный ультразвуком (рис. 1), при самых благоприятных условиях (температура 60 °С и начальная концентрация 4500 и 5500 мг/л  $\text{CaSO}_4$ ) к стабильному состоянию подходит через 240 мин отстаивания. Использование ультразвука интенсивностью 31 Вт/см<sup>2</sup> при 1 мин озвучивания позволяет достигнуть такого же результата через 60–120 мин (рис. 2), а при длительности озвучивания 19 мин пересыщение полностью снимается во время озвучивания. Такой же эффект получается при температуре 40 °С для исходной концентрации сульфата кальция 5500 мг/л. Раствор с концентрацией сульфата кальция 3500 мг/л к стабильному состоянию при 60 °С приходит через 120 мин после обработки. Таким образом, ультразвуковая обработка при температуре 40–60 °С оборотных промывных вод в десятки раз увеличивает скорость кристаллизации сульфата кальция из растворов, что позволяет стабилизировать их и предотвратить гипсовые отложения в трубопроводах.

Рассмотренный способ стабилизации оборотной воды не требует изменения существующих технологических схем их обработки. Для его осуществления достаточно в камере реакции разместить ультразвуковые вибраторы и соединить их с генератором ультразвука.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Б у д е к а Ю.Ф., М о й ч е н к о В.А. Удаление сульфата кальция из оборотной воды при обработке ее ультразвуком // Использование и охрана водных ресурсов / ЦНИИКИВР, 1976. — С. 182–188.
2. Н а л и м о в В.В., Ч е р н о в а М.А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. — М., 1965. — 143 с.
3. Э л ь - п е р В.Л., Б р у к - Л е в и н с о н Т.А., Р я б и к о в Г.Т. Опыт применения математического планирования эксперимента в исследованиях по очистке воды. — Минск, 1971. — 14 с.
4. Т и х о м и р о в В.Б. Планирование и анализ эксперимента. — М., 1974. — 321 с.

УДК 631.67:633.2/3]:631.445.2 (476)

В.И.ВИХРОВ (БСХА)

### ПРОГНОЗ ВЕСЕННИХ ВЛАГОЗАПАСОВ СУГЛИНИСТЫХ ПОЧВ ПОД ОРОШАЕМЫМИ МНОГОЛЕТНИМИ ТРАВАМИ В БЕЛОРУССИИ

В основу проектного и эксплуатационного режимов орошения сельскохозяйственных культур положен расчет динамики влагозапасов почвы. Обоснованность этих расчетов во многом зависит от точности

определения весенних (начальных) влагозапасов  $W_H$ . В эксплуатационном режиме орошения данная проблема может решаться путем измерения фактических  $W_H$ , что практически не всегда возможно. В проектном режиме орошения этот вопрос остается нерешенным.

При проектировании режима орошения на минеральных почвах БССР используется биоклиматический метод [1]. Реализация последнего на ЭВМ заключается в ретроспективном расчете его параметров за длительный ряд предшествующих лет (не менее 30). При этом используются многолетние метеоданные, накопленные в БелУГКС. Систематические данные о  $W_H$  для большинства метеостанций БССР за указанный период отсутствуют. В связи с этим  $W_H$  принимается постоянной в каждый из расчетных лет периода, равной наименьшей влагоемкости (НВ). Это является лишь ориентировочной оценкой, что снижает точность расчета оросительных норм и межполивных интервалов. Данные опытов по орошению на суглинистых почвах Белоруссии показывают, что фактическая величина  $W_H$  к началу мая может находиться в пределах 85–130 % от НВ, в большинстве случаев превышая последнюю.

Нами проведено исследование возможности косвенного расчета и прогноза  $W_H$  под орошаемыми многолетними травами. Следует отметить, что методика прогноза запасов продуктивной влаги в почве к началу полевых работ разработана в Гидрометцентре СССР для зоны недостаточного увлажнения и неорошаемых условий ЕТС [2] и Западной Сибири [3]. В качестве прогнозных зависимостей здесь служат линейные уравнения регрессии, в которых изменение влагозапасов за холодный период ( $\Delta W$ ) связано с суммой осадков за это время ( $P$ ) и недостатком насыщения почвы влагой до НВ предыдущей осенью ( $h$ ). Опытные данные показывают, что в условиях орошения суглинистых почв Белоруссии значение  $h$  незначительно. В связи с этим в качестве определяющих факторов для  $W_H$  нами рассматривались осадки за сентябрь–апрель, а также значения среднесуточных температур и дефицитов влажности воздуха апреля, определяющие сроки и дружность наступления весны, интенсивность стока и испарения влагозапасов.

В исследованиях использовались исходные данные двух видов: 1) фактические весенние влагозапасы суглинистых почв под орошаемыми многолетними травами, полученные в полевых опытах на территории Горецкого района Могилевской области (Д.В.Межевич, В.И.Белясов, В.И.Вихров); 2) данные о  $W_H$  в суглинистых почвах под многолетними травами, выписанные в БелУГКС за отдельные годы по некоторым метеостанциям северо-восточной зоны (Лепель, Витебск, Шарковщина, Полоцк, Горки, Минск, Могилев, Чечерск). При этом с целью объединения этих данных с  $W_H$  в условиях орошения выбирались лишь годы, которым предшествовал достаточно увлажненный вегетационный период.

Таким образом было получено 48 значений  $W_H$  для слоя почвы 0...50 см с датами их определения в пределах 28.04...01.05. Влагозапасы выражались в процентах от наименьшей влагоемкости данной почвы ( $\beta_H, \% \text{ НВ}$ ).

Исследования показали, что осадки в различные месяцы вегетационного периода по-разному влияют на  $\beta_H$ . С учетом этого наиболее простой и

Переменные	Коэффициент корреляции $r$	Переменные	Коэффициент корреляции $r$
$x_1 - \beta_H$	0,64	$x_7 - \beta_H$	0,01
$x_2 - \beta_H$	0,71	$x_8 - \beta_H$	-0,01
$x_3 - \beta_H$	0,46	$x_9 - \beta_H$	-0,46
$x_4 - \beta_H$	0,34	$x_{10} - \beta_H$	-0,12
$x_5 - \beta_H$	0,76	$x_5, x_9 - \beta_H$	0,76
$x_6 - \beta_H$	0,71	$x_6, x_{10} - \beta_H$	0,70

приемлемой величиной приведенных осадков оказалась следующая:

$$P_{\text{пр}} = 0,5P_{\text{IX...III}} + P_{\text{IV}}, \quad (1)$$

где  $P_{\text{IX...III}}$  — сумма осадков за сентябрь...март, мм;  $P_{\text{IV}}$  — осадки за апрель, мм.

Кроме того, с целью получения заблаговременного расчета (например, для планирования начала поливных работ) вводилась величина, аналогичная (1), но рассчитываемая на 20 апреля ( $P_{\text{пр}}^{20.\text{IV}}$ ). Итак, для обоснования необходимых предикторов исследовалась связь со следующими факторами:  $x_1$  — осадки за сентябрь...март ( $P_{\text{IX...III}}$ , мм);  $x_2$  — осадки за сентябрь...апрель ( $P_{\text{IX...IV}}$ , мм);  $x_3$  — осадки за апрель ( $P_{\text{IV}}$ , мм);  $x_4$  — осадки за 1...20 апреля ( $P_{20.\text{IV}}$ , мм);  $x_5$  — приведенные осадки ( $P_{\text{пр}} = 0,5P_{\text{IX...III}} + P_{\text{IV}}$ , мм);  $x_6$  — приведенные осадки на 20. IV ( $P_{\text{пр}}^{20.\text{IV}} = 0,5P_{\text{IX...III}} + P_{20.\text{IV}}$ , мм);  $x_7$  — сумма среднесуточных температур воздуха за апрель ( $t_{\text{IV}}$ , °C);  $x_8$  — то же за 1...20. IV ( $t_{20.\text{IV}}$ , °C);  $x_9$  — сумма среднесуточных дефицитов влажности воздуха за апрель ( $d_{\text{IV}}$ , МБ);  $x_{10}$  — то же за 1...20. IV ( $d_{20.\text{IV}}$ , МБ). Коэффициенты корреляции  $\beta_H$  с указанными факторами и некоторыми их комплексами приведены в табл. 1.

Минимальные существенные значения  $r$  для 5%- и 1 %-го уровней значимости в данном случае равны соответственно 0,29 и 0,37. Из табл. 1 видно, что наиболее достоверная связь  $\beta_H$  наблюдается с величинами  $P_{\text{пр}}$ ,  $P_{\text{IX...IV}}$  и  $P_{\text{пр}}^{20.\text{IV}}$  ( $r = 0,76$ ;  $0,71$  и  $0,71$ ). С остальными факторами связь значительно хуже или вовсе не существенна. Не произошло увеличения тесноты связи и в двухфакторных зависимостях по сравнению с  $x_5$  и  $x_6$ .

Исходя из этого, за основу была принята зависимость  $\beta_H = f(P_{\text{пр}})$ , которая оказалась нелинейной. Наиболее полно эта связь аппроксимировалась квадратичной функцией (рис. 1), и на ЭВМ получена следующая зависимость:

$$\beta_H = 11,3 + 76,85P_1 - 13,09P_1^2, \quad (2)$$

где  $P_1 = 0,01P_{\text{пр}}$ .



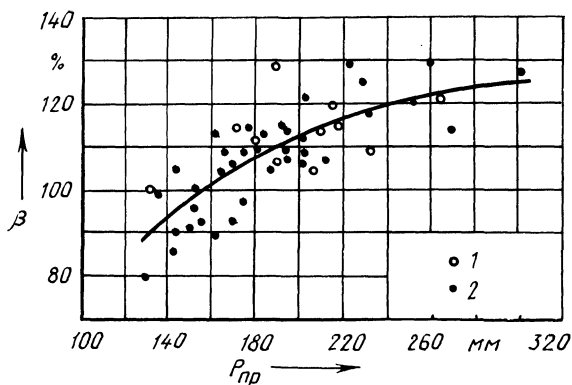


Рис. 1. Зависимость весенних влагозапасов суглинистых почв под орошаемыми многолетними травами от приведенной суммы осадков холодного периода:  
1 — результаты опытов по орошению; 2 — данные БелУГКС

Корреляционное отношение  $\eta = 0,78$ ,  $F$  и  $T$  — критерии выше допустимых на 5 %-м уровне значимости. Пределы применения формулы:  $1,3 < P_1 < 3,1$ ;  $79 < \beta_H < 131$ .

Криволинейность зависимости (2) объясняется тем, что при больших значениях  $P_{пр}$  величина  $\beta_H$  приближается к своему предельному значению — полной влагоемкости, что уменьшает угол наклона кривой.

При расчетах режима орошения удобно использовать полезные влагозапасы  $W_H^n$ , т.е. отсчитываемые от нижней границы оптимального увлажнения. В этом случае их начальная величина с учетом  $\beta_H$  определится по формуле

$$W_H^n = \frac{m(\beta_H - \beta_{\min})}{100 - \beta_{\min}}, \quad (3)$$

где  $m$  — поливная норма, мм;  $\beta_{\min}$  — нижний предел оптимального увлажнения, % НВ.

Для многолетних трав  $\beta_{\min} = 70-80$  %. Очевидно, что при  $\beta_H = 100$  %  $W_H^n = m$ .

Аналогично формуле (2) получена зависимость  $\beta_H = f(P_{пр}^{20.IV})$ , имеющая вид:

$$\beta_H = 60,5 + 32,32 P_2 - 2,44 P_2^2, \quad (4)$$

где  $P_2 = 0,01 P_{пр}^{20.IV}$ ;  $\eta = 0,71$ .

Таким образом, величина весенних влагозапасов суглинистых почв под орошаемыми травами характеризуется многолетней изменчивостью (в пределах 85–130 % НВ), что необходимо учитывать в расчетах режимов орошения. Из многочисленных факторов, определяющих эту изменчивость, основным являются осадки предшествующего холодного периода, выраженные в формуле (1). Использование зависимости (2) позволяет уточнить проектные оросительные нормы многолетних трав, в основном в сторону их уменьшения.

При этом в ряде случаев различие может достигать поливной нормы. Формула (4) позволяет оценить влагозапасы на начало мая заблаговременно за 10 дней и планировать работы по подготовке к орошению.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Г о л ч е н к о М.Г., С т е л ь м а х Е.А. Методические рекомендации по определению расчетной обеспеченности орошения в Белоруссии. — Горки, 1978. — 60 с. 2. Руководство по составлению агрометеорологических прогнозов. — Л., 1962. — 268 с. 3. Б о г д а н о в а Т.Ф. Уточнение прогноза запасов влаги в почве к началу вегетационного периода для Западной Сибири // Тр. Гидрометцентра СССР. — 1978. — Вып. 193. — С. 120—123.

УДК 631.6

В.И.КУМАЧЕВ, канд. техн. наук (БСХА)

### УСТОЙЧИВОСТЬ НЕЛИНЕЙНОЙ ГИДРОМЕЛИОРАТИВНОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВОДНОГО РЕЖИМА ПОЧВЫ

Опыт применения нелинейных законов регулирования в различных отраслях техники автоматического управления показывает их эффективность. Вместе с тем проектирование устойчивых режимов работы таких систем является более сложным. Изменение параметров управляемого объекта может привести к качественно новым процессам, в том числе и к изменению устойчивости системы.

Известны работы [1, 2], в которых рассматриваются некоторые вопросы устойчивости гидромелиоративных систем двустороннего регулирования.

Однако в современных условиях совершенствования гидромелиоративных систем этого явно недостаточно.

Для исследования устойчивости необходимо описание динамики объекта управления. Последний описывается уравнением Буссинеска, которое представляет собой дифуравнение в частных производных. Известно [3, с. 128; 4, с. 310; 5; 6, с. 414], что объекты автоматического регулирования с распределенными параметрами, в том числе тепловые объекты, аппроксимируются обыкновенными дифференциальными уравнениями.

Такая аппроксимация основывается на том [7, с. 200], что в распределенном объекте значение переменной необходимо не по всей распределенной координате, а в большинстве случаев для начала и конца координаты, по которой распределен параметр.

Для описания объекта управления с распределенными параметрами дифференциальным уравнением необходимо исключить колебательные составляющие [8, с. 346]. Мелиоративный объект подчиняется этому условию, т.к. последний является идентичным тепловому, и представляет собой фильтр низких частот. Указанная аппроксимация возможна обыкновенными дифференциальными уравнениями 1-го и 4-го порядков с введением и без введения запаздывания [8, с. 346—351, 417].

Для аппроксимации объекта с распределенными параметрами обыкновенным дифуравнением 2-го порядка необходимо выполнение условия [8, с. 350]

$B \leq 0,265$ , где  $B = \frac{h(t_n)}{h_{уст}} \cdot h_{уст}$  означает конечное установившееся значение

уровня грунтовых вод, а  $h(t_n)$  является ординатой точки перегиба кривой  $h = f(t)$  и его изменения на данной вертикали. Эту ординату легко получить из кривой  $h = f(t)$ , рассчитанной по формулам С.Ф.Аверьянова [9, с. 195], или из кривой, полученной экспериментально на шлюзуемом участке, как описано в [10, с. 29, 30].

Автором путем полевых экспериментов и расчетов на основе решений С.Ф.Аверьянова [10, с. 29, 30; 11, с. 78..83] получены серии кривых изменения уровня грунтовых вод для расчетной вертикали посредине межканальной полосы в условиях характерных значений параметров гидромелиоративных систем двустороннего регулирования и грунтов, на которых применяются такие системы. Результаты определения  $B$  позволяют за счет свободы выбора точки перегиба кривой получить значения  $B = 0,03-0,26$ , что указывает на возможность описания динамики мелиоративных объектов обыкновенными дифференциальными уравнениями второго порядка [рис. 1]. Это позволяет воспользоваться известным в теории автоматического управления методом фазовых траекторий, который является одним из наиболее удобных методов исследования нелинейных систем.

Для удобства анализа переменную состояния  $h$  обозначим  $x$ . Обозначим допустимые значения диапазона нечувствительности  $2a$ , а экстремальные значения управления  $2b$ .

Динамика рассматриваемой системы с учетом введенных обозначений выражается уравнением

$$T_1 T_2 x'' + (T_1 + T_2) x' + x = F(x). \quad (1)$$

Вид характеристики управления позволяет уравнение (1) записать в виде системы. Введя  $x' = \frac{dx}{dt} = y$ , выразим  $y'$ :

$$\left. \begin{cases} y' = - \frac{(T_1 + T_2)y + x + b}{T_1 T_2} & \text{при } x \geq a; \\ y' = - \frac{(T_1 + T_2)y + x - b}{T_1 T_2} & \text{при } x \leq -a; \\ y' = - \frac{(T_1 + T_2)y + x}{T_1 T_2} & \text{при } |x| < a. \end{cases} \right\} \quad (2)$$

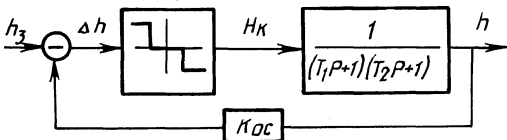


Рис. 1. Структурная схема гидромелиоративной системы управления:  $\Delta h$  — отклонение текущего значения глубины грунтовых вод от заданного;  $h_3$ ,  $H_K$  — напор воды в регулирующей сети;  $T_1$ ,  $T_2$  — постоянные времени мелиоративного объекта управления;  $P$  — оператор дифференцирования;  $K_{ос}$  — коэффициент усиления обратной связи

Из (2) исключим время и получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dy}{dx} = - \frac{(T_1 + T_2)y + x + b}{T_1 T_2 y} \text{ при } x \geq a; \\ \frac{dy}{dx} = - \frac{(T_1 + T_2)y + x - b}{T_1 T_2 y} \text{ при } x \leq -a; \\ \frac{dy}{dx} = - \frac{(T_1 + T_2)y + x}{T_1 T_2 y} \text{ при } |x| < a. \end{array} \right. \quad (3)$$

Положив в (3)  $\frac{dy}{dx} = N$ , определим  $y$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} y = - \frac{x + b}{T_1 T_2 N + T_1 + T_2} \text{ при } x \geq a; \\ y = - \frac{x - b}{T_1 T_2 N + T_1 + T_2} \text{ при } x \leq -a; \\ y = - \frac{x}{T_1 T_2 N + T_1 + T_2} \text{ при } |x| < a. \end{array} \right. \quad (4)$$

Полученные выражения (1—4) представляют собой общий вид уравнений изоклин на фазовой плоскости для гидромелиоративной системы управления уровнем грунтовых вод. Подставляя в (4) значения параметров гидромелиоративного объекта и управляющего устройства и задавая значениями  $N$ , получим в координатах  $x$ ,  $y$  поле изоклин, соответствующее данным конкретным условиям. Полученное поле в свою очередь дает возможность построить фазовый портрет конкретной мелиоративной системы управления и получить точные сведения о ее устойчивости.

Оценим устойчивость уровня режима, обеспечиваемого автоматической гидромелиоративной системой управления, для наиболее характерных параметров мелиоративного объекта и регулятора [1]. Диапазон нечувствительности регулятора  $2a = 4$  см, ресурс управления  $2b = 50$  см, постоянные времени мелиоративного объекта  $T_1 = 1$  сут,  $T_2 = 0,71$  сут. В связи с особенностью динамики мелиоративного объекта управления расчет для практического удобства выполним в указанных выше размерностях.

Из (4) получаем:

$$\left\{ \begin{array}{l} y = - \frac{x + 25}{0,71N - 1,71} \text{ при } x \geq 2; \\ y = - \frac{x - 25}{0,71N + 1,71} \text{ при } x \leq -2; \\ y = - \frac{x}{0,71N + 1,71} \text{ при } |x| < 2. \end{array} \right. \quad (4)$$

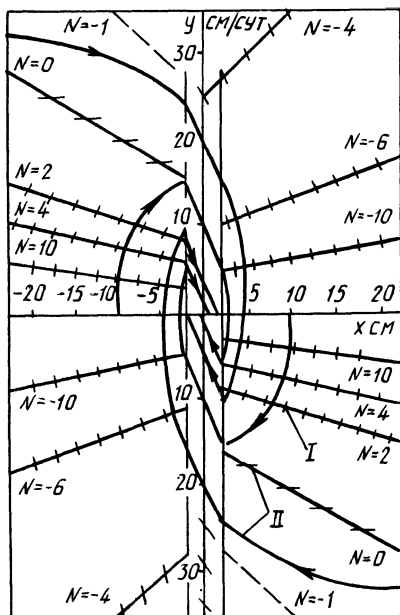


Рис. 2. Изоклины I и фазовые траектории II гидромелиоративного объекта управления

По (4') для значений  $N$  строим поле изоклин 1 (рис. 2). Наклон траекторий II фазового портрета по отношению к оси  $x$  на каждой изоклине изображен отрезками прямых, проведенных под переменным углом  $\arctg N$ .

Полученный фазовый портрет мелиоративной системы управления для наиболее характерных параметров регулятора и мелиоративного объекта имеет траектории, замыкающиеся на отрезке, совпадающем с осью  $x$  и лежащем внутри диапазона нечувствительности регулятора. При любых начальных условиях изображающая точка по ее траектории приходит в состояние равновесия системы. Отсюда вытекает, что гидромелиоративная система управления объекта с указанными характерными параметрами обеспечивает устойчивый режим уровней грунтовых вод на глубине заданной нормы осушения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. К у м а ч е в В.И. Исследование устойчивости водных режимов торфяно-болотной почвы // Пути повышения продуктивности мелиорированных торфяных почв и выработанных торфяников. — Киров. — 1983. — С. 50–51.
2. М о р д у х о в и ч Б.Ш. Оптимальное управление режимом грунтовых вод на гидромелиоративных системах двустороннего действия // Водные ресурсы. — 1985. — № 3. — С. 59–69.
3. К а ф а р о в В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии. — М., 1971. — 496 с.
4. Ш е в я к о в А.А., Я к о в л е в а Р.В. Инженерные методы расчета динамики теплообменных аппаратов. — М., 1968. — 320 с.
5. Г е р а с и м о в С.Г. Теоретические основы автоматического регулирования тепловых процессов. — М., 1967. — 206 с.
6. Б е с с е - к е р с к и й В.А., П о л о в Е.П. Теория систем автоматического регулирования. — М., 1975. — 768 с.
7. Техническая кибернетика. Теория автоматического регулирования / Под ред. В.В.Солодовникова. — М. — Т. 1, 1967. — 768 с.
8. Р о т а ч В.Я. Расчет динамики промышленных автоматических систем регулирования. — М., 1973. — 440 с.
9. К о с т я к о в А.Н., Ф а в о р и н Н.Н., А в е р ь я н о в С.Ф. Влияние оросительных систем на режим грунтовых вод. М., 1980. — 451 с.
10. С е л ь ч е н о к В.П., К у м а ч е в В.И. Оценка пригодности мелиорированных объектов для автоматизированного управления водным режимом // Мелиорация и водное хоз-во. 1974. — № 10. — С. 29, 30.
11. К у м а ч е в В.И. Исследование управляемости гидромелиоративного объекта // Эксплуатация мелиоративных систем в зоне избыточного увлажнения. БелНИИМиВХ. 1974. — С. 78–83.

Н.М.ВАРНАКОВ, канд. техн. наук,  
И.М.ШАТАЛОВ (БПИ), Т.В.СТАВРОВА,  
канд. техн. наук (СКБИМПС)

## ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ МЕЛИОРАТИВНЫХ ВОДОЗАБОРОВ ИЗ ОТКРЫТЫХ ВОДОЕМОВ

Для предотвращения попадания молоди рыбы, а также взвешенных частиц в насосные установки на мелиоративных водозаборах из открытых водоемов используют щебеночные кассетные фильтры. Разработаны типовые проекты водозаборов со щебеночными кассетными фильтрами с пропускной способностью  $0,080-0,120 \text{ м}^3/\text{с}$  с  $1 \text{ м}^2$  поверхности. Опыт эксплуатации кассетных фильтров выявил у них ряд существенных недостатков: большая металлоемкость, недостаточная эффективность очистки воды, сложность промывки и большие эксплуатационные расходы [1].

Совершенствование конструкции фильтров предусматривает улучшение системы очистки, снижение скоростей фильтрации, поиск новых материалов для заполнения кассет и рациональной компоновки "защитного полотна" [2]. Наиболее перспективным является поиск и использование в кассетных фильтрах новых материалов. Нами проведены исследования нетканого полиэтиленхолста. С учетом предъявляемых к ним требований фильтры должны обладать: 1) пропускной способностью не менее  $0,120 \text{ м}^3/\text{с}$  с  $1 \text{ м}^2$  поверхности при перепаде уровней на фильтре не более  $0,2 \text{ м}$ ; 2) способностью задерживать частицы размером  $0,5 \text{ мм}$  и более с содержанием твердых частиц в воде до  $5 \text{ г/л}$ ; 3) возможностью промывки струями воды; 4) коррозионной стойкостью, малым весом; 5) простотой изготовления и эксплуатации, возможностью использования принципа сменности фильтрующих элементов.

Полиэтиленхолсты отвечают вышеперечисленным требованиям. В процессе изготовления фильтров пневмоэкструзионным способом можно получить необходимые пористость, плотность, диаметр элементарных волокон, толщину холста, механическую прочность полиэтиленхолстов. Разработана методика и проведены лабораторные исследования 40 образцов полиэтиленхолста, изготовленных в СКБ с ОП института металлополимерных систем АН БССР (г. Гомель), из которых отобрано 15 наиболее характерных (табл. 1).

В процессе исследований изучались прочностные свойства полиэтиленхолстов, их пропускная способность при фильтрации чистой воды, процесс кольматации и промываемость. Прочностные свойства полиэтиленхолстов исследовались с использованием электронного малоинерционного динамометра марки *ZT*.

Пропускная способность полиэтиленхолстов при фильтрации чистой воды, процесс кольматации и промываемость исследовались в гидравлическом лотке на образцах размером  $0,60$  на  $0,20 \text{ м}$ , установленных вертикально. На каждом фильтре создавались перепады уровней воды  $2-20 \text{ см}$  и каждый раз замерялись расход  $Q$  и напор перед фильтром  $H$ . Процесс кольматации фильтров изучался в фильтрационной колонне с вертикальным током воды. Скорость потока на подходе к фильтру по условиям рыбозащиты составляла  $0,10-0,17 \text{ м/с}$ . Песок отсеянными фракциями диаметром  $0,5$ ;  $0,25$  и менее,

Основные опытные данные

№ образ-ца	Наименование характеристик		
	толщина образца, мм	диаметр элементарного волокна, мм·10 <sup>-3</sup>	плотность образца, г/см <sup>3</sup>
2	1,3	90,4	0,189
7	1,1	119	0,258
10	1,3	92,5	0,188
17	1,1	263	0,209
18	1,1	219	0,208
20	1,2	249	0,205
21	1,4	258	0,207
24	0,6	130	0,178
28	0,9	155	0,136
29	0,6	190	0,177
30	0,9	178	0,123
31	0,8	136	0,118
32	0,7	134	0,186
39	1,0	173	0,132
40	0,6	189	0,216

а также смешанными фракциями равномерно вводился в поток интенсивностью 0,1 г на 1 см<sup>2</sup> фильтра. После опыта песок просушивался и определялся процентный состав (по весу) задержанных частиц по фракциям.

Следует отметить, что сначала исследовались однослойные (тонкие) полиэтиленхолсты.

Анализ результатов исследований прочностных свойств полиэтиленхолстов показал, что диаметр элементарных волокон фильтров составлял 0,075—0,272 мм, толщина 0,6—1,5 мм, плотность 0,118—0,351 г/см<sup>3</sup>, прочность при растяжении на разрывное удлинение 1,55—8,3 кг/см при удлинении 12—26 мм. Плотность полиэтиленхолстов существенно зависит от диаметра элементарных волокон. При одной и той же плотности фильтра количество пор на единицу площади тем больше, чем меньше диаметр элементарных волокон.

Варьируя плотностью, диаметром элементарных волокон фильтров, можно получать различную их пористость и, следовательно, пропускную способность.

В качестве основной характеристики пропускной способности полиэтиленхолста при фильтрации чистой воды принята зависимость расхода  $Q$  с 1 м<sup>2</sup> фильтра от напора  $H$  при постоянном перепаде  $Z$ . Такая характеристика для двух образцов показана на рис. 1.

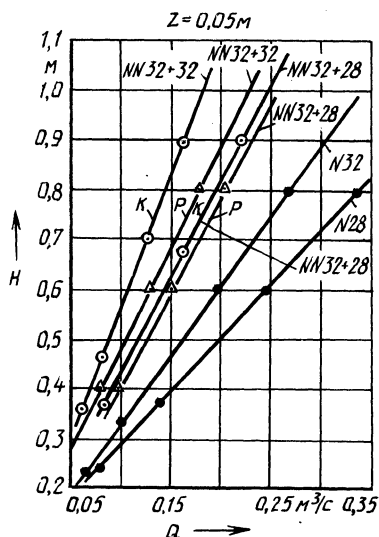
Зависимость  $Q-H$  представляет собой прямую линию, угол наклона которой определяется величиной  $Z$  и конструктивными параметрами фильтра.

Фильтры из полиэтилена могут обеспечить в 2...4 раза большие расходы (т.е. порядка 240—480 л/с с 1 м<sup>2</sup>), чем кассетные. К таковым относятся образцы № 21, 24, 28, 29, 30, 31, 32. Их пропускную способность можно задавать в нужных размерах в процессе изготовления.

Лабораторные опыты по изучению процессов кольтматации показали, что полиэтиленхолсты вполне удовлетворительно могут задерживать взвешен-

Рис. 1. График зависимости  $Q = f(H)$  для контактной и разомкнутой компонок полиэтиленхолстов:

$K$  — контактная компоновка;  $P$  — разомкнутая компоновка



ные частицы диаметром 0,5 мм. Так, например, фильтры № 24, 32 задерживают до 90 % и более взвешенных частиц. При работе полиэтиленхолстов в натурных условиях важным показателем работоспособности является время полного фильтроцикла, т.е. время между промывками фильтров. Установлено, что оно зависит от величины пор и расхода. При содержании в воде твердых частиц до 5 г/л и диаметре частиц от 1 мм и менее у мелкопористых фильтров (образцы № 2, 7, 10) время полного фильтроцикла при расходе  $Q = 5,2$  л/с составляло 2 ч, а у крупнопористых — увеличивалось до пяти и более суток для образцов № 20, 21, 30.

Характеристика многослойных полиэтиленфильтров

Таблица 2

№ образцов	Процентный состав задержанных частиц по фракциям			Пропускная способность, л/с м <sup>2</sup>	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Диаметр волокон, мм
	$d \geq 0,5$ мм	$d = 0,25$ мм	$d < 0,25$ мм			
32	90	—	—	335	0,19	0,13
31	65	—	—	421	0,12	0,14
28	50	—	—	426	0,14	0,16
32+	99	78	52	180	—	—
32						
32+	97	63	34	240	—	—
31						
32+	92	56	28	250	—	—
28						
28+	84	47	28	228	—	—
28+						
28						



Анализ результатов лабораторных, гидравлических и кольматационных исследований показывает, что однослойные полиэтиленхолсты не могут обеспечить требуемого сочетания большой пропускной способности и 100 % задержания взвешенных частиц контрольной фракции. Близки к этому требованию образцы № 24, 32, рекомендованные к проверке в натуральных условиях.

Авторами предложены и предварительно исследованы многослойные составные фильтры из 2–3 и т.д. слоев. Первые опыты показали, что при соответствующем подборе образцов различной пористости можно получить комбинированные фильтры, которые без большого снижения пропускной способности могут обеспечить 100 % задержание частиц контрольных фракций (табл. 2).

Мелкопористый образец № 32 двумя слоями задерживает 100 % частиц диаметром 0,5 мм, но производительность уменьшается почти в 2 раза. Однако этот образец в комбинации с крупнопористыми образцами № 28 и 31, обеспечивая необходимое задержание контрольных частиц, дает расход в 2 раза больше кассетных фильтров с заполнением.

Имеет значение способ составления многослойных фильтров. Так как при контактном (плотном) соединении двух мелкопористых образцов пропускная способность по сравнению с неконтактной (расстояние между слоями 1 см) компоновкой падает больше (рис. 1, образцы № 32 + № 32 разница в расходах  $0,06 \text{ м}^3/\text{с}$  с  $1 \text{ м}^2$ ). В комбинации с крупнопористыми фильтрами эта разница меньше (образцы № 32 + № 28, разница —  $0,01 \text{ м}^3/\text{с}$  с  $1 \text{ м}^2$ ).

Порядок компоновки многослойных составных фильтров также имеет значение. Для увеличения времени полного фильтроцикла желательно с напорной стороны ставить крупнопористые образцы. При указанной расстановке пропускная способность неконтактной компоновки оказывается ниже контактной (на 5–7 %).

Для нормальной эксплуатации любых фильтров очень важна возможность их промывки. Полиэтиленхолсты легко промываются от засорения струями воды, вытекающими напором 0,5 м и более. После промывки пропускная способность их легко восстанавливается. На скорость и качество промывки оказывают влияние параметры фильтра (диаметр элементарного волокна, толщина холста, его плотность). Более плотные фильтры требуют и большего времени на промывку.

Анализ исследований позволяет сделать следующие выводы.

Полиэтиленхолст вполне может быть использован в качестве конструктивного материала для рыбозащитных устройств кассетного типа.

Однако однослойные (тонкие) полиэтиленхолсты не обеспечивают требуемого сочетания большой пропускной способности и 100 % задержания частиц контрольной фракции ( $d = 0,5 \text{ мм}$ ).

Используя полиэтиленхолсты различной пористости (мелкопористые, крупнопористые), можно создать 2-, 3- и многослойные фильтры, обеспечивающие требуемую пропускную способность (не менее  $0,12 \text{ м}^3/\text{с}$  с  $1 \text{ м}^2$ ) и 100 % задержание частиц контрольной фракции.

При подборе составных частей многослойных фильтров следует подбирать базовый фильтр с диаметром элементарных волокон 0,11–0,14 мм, плотностью 0,18–0,20 г/см<sup>3</sup>, дополнительные — с диаметром элементарных воло-

кон 0,09—0,12 мм, плотностью 0,11—0,13 г/см<sup>3</sup>. Дополнительный фильтр ставится с напорной стороны.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. П а н к р а т о в а Е.А. Использование рыбозащитных сооружений на водозаборах в СССР и за рубежом // ЦНИИ информации и технико-экономических исследований министерства рыбного хозяйства СССР.— М., 1975. — Сер. 8. Вып. 1. — 50 с. 2. П а в л о в Д.С., П а х о р у к о в А.Н. Биологические основы защиты рыб от попадания в водозаборные сооружения. — М., 1973. — 209 с.

УДК 628.112.24

В.В.ИВАШЕЧКИН, А.Н.КОНДРАТОВИЧ,  
Д.А.ПРОКОПЧУК, канд. техн. наук (БПИ)

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО СПОСОБА ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ФИЛЬТР И ПРИФИЛЬТРОВУЮ ЗОНУ СКВАЖИН

Эксперименты проводились на стенде, состоящем из прозрачной емкости с высокоскоростной фотографической регистрацией. В центре емкости находилась модель фильтра скважины, верхняя часть которого выполнялась из толстостенного оргстекла, а нижняя — из перфорированной трубы, обтянутой полиэтиленфильтром. Кроме этого, перфорированная часть стеклянной трубы засыпалась крупнозернистым песком с размером частиц 1,5—3 мм. Быстрое химическое превращение водородно-кислородной смеси инициировалось спиралью накаливания в верхней части цилиндрической камеры с внутренним и наружным диаметрами, равными 45 и 95 мм, и высотой 130 мм. Полезный объем камеры составлял 180 см<sup>3</sup>. Последняя размещалась в модели фильтра так, что газовый пузырь при своем максимальном расширении не достигал границы песчаной засыпки.

Скоростная съемка процесса движения на границе газ—вода при расширении и схлопывании продуктов быстрого химического превращения осуществлялась посредством скоростной камеры СКС-1М-16 со скоростью протяжки пленки 2000 кд/с. На рис. 1 представлены фотограммы процесса пульсаций парогазового пузыря для двух исходных объемов газовой смеси  $V_{г} = 0,5V_{к}$  (а) и  $V_{г} = V_{к}$  (б) в масштабе 1:5.

По фотограммам установлено, что граница раздела газ—вода не успевает сместиться до момента, пока быстрое химическое превращение газовой смеси не произойдет во всем объеме.

Определены скорости (рис. 1, а): 1) движения границы газ—вода в камере

Определены скорости (рис.1,а) : 1) движения границы газ—вода в камере  $V_{к} = 17,3$  м/с; 2) перемещения пузыря за пределами камеры  $V_{п} = 8$  м/с ; 3) обратного перемещения пузыря в камеру при схлопывании,  $V_{с} = 14$  м/с. равная потенциальной энергии в момент достижения максимального объема  $V_{max}$ . При заполнении камеры  $V_{г3} = V_{к}$  и  $V_{г} = 0,5V_{к}$  максимальный объем пузыря составил 692 см<sup>3</sup> и 344 см<sup>3</sup>. Начальная энергия парогазового пузыря рассчитывалась по [1] :

Восемь последних строк на странице 41 следует читать так:

Определены скорости (рис. 1, а) : 1) движения границы газ—вода в камере  $V_k = 17,3$  м/с; 2) перемещения пузыря за пределами камеры  $V_n = 8$  м/с; 3) обратного перемещения пузыря в камеру при схлопывании  $V_c = 14$  м/с.

По фотограммам определялась энергия пульсаций газового пузыря, равная потенциальной энергии в момент достижения максимального объема  $V_{max}$ . При заполнении камеры  $V_r = V_k$  и  $V_r = 0,5V_k$  максимальный объем пузыря составил  $692$  см<sup>3</sup> и  $344$  см<sup>3</sup>. Начальная энергия парогазового пузыря рассчитывалась по [1] :

*a*

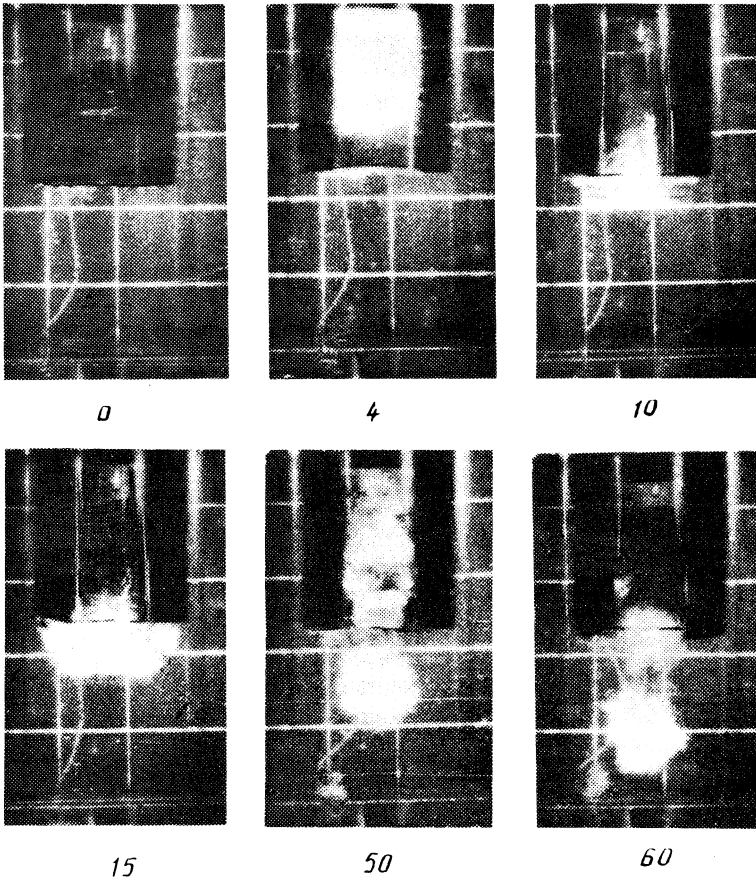


Рис. 1. Фотограммы процесса пульсаций парогазового пузыря (частота съемки 2000кадр/с, а)  $V_{\Gamma} = 90 \text{ см}^3$ ;

$$E = \frac{p_{\text{в}} V_0}{K - 1},$$

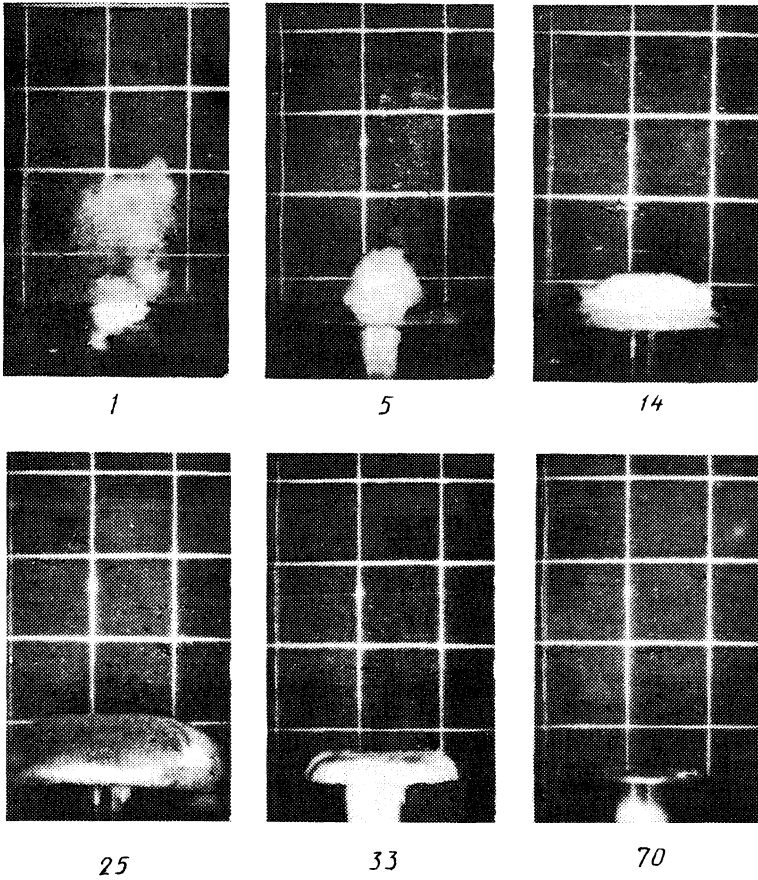
$p_{\text{в}}$  — давление в рабочей камере:  $p_{\text{в}} = 10p_0 \approx 10^6$  Па;  $K$  — коэффициент адиабаты продуктов реакции:  $K = 1,17$ ;  $V_0$  — начальный объем парогазового пузыря:  $V_0 = V_{\Gamma}$ .

Энергия пульсаций определялась по формуле

$$E_n = p_0 (V_{\text{max}} - V_0).$$

Доля энергии, превращенной в энергию пульсаций, для половины и полной камеры составила 5 %.

д



масштаб изображения 1:5). Нумерация кадров от момента начала процесса расширения:

$$б) V_{\Gamma} = 180 \text{ см}^3$$

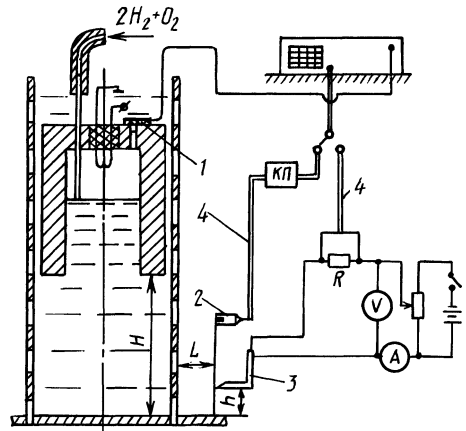


Рис. 2. Схема измерительного стенда:  
1 — запускающий пьезодатчик; 2 — регистрирующий пьезодатчик; 3 — электрохимический датчик скорости; 4 — экранированные кабели

Амплитудные параметры пульсаций давления и скорости изучались на стенде, который представляет собой призматический резервуар размером 400 x 400 x 500 мм с расположенной в центре перфорированной капроновой трубой диаметром 100 мм и дополнительной водоприемной поверхностью из полиэтиленфильтра толщиной 3 мм. Соосно модели фильтра устанавливался перфорированный цилиндр из оргстекла, обтянутый полиэтиленфильтром.

В зазор засыпался песок крупностью 2,5 мм. На поверхность накладывалось кольцо с дополнительным грузом для исключения разжижения песка при создании импульсов давления, которые генерировались в рабочей камере.

Изучение волн сжатия и разрежения осуществлялось пьезокерамическими датчиками давления диаметром 1,5 мм. Они предварительно тарировались методом "скачка" давления. Чувствительность их составила 5В на 1 МПа давления. Работали они в комплекте с катодным повторителем и осциллографом С8-13.

Для определения параметров фильтрационного потока в прифильтровой зоне использовался электрохимический метод измерения скорости, который предусматривает замену воды водным раствором электролита, в качестве которого использовался однонормальный раствор ферро-феррицианида ( $K_3Fe(CN)_6 - 8,64$  г/л,  $K_4Fe(CN)_6 - 10,24$  г/л) [2].

Рабочее напряжение на датчике поддерживалось равным 0,7 В. Электрохимический датчик вводился в грунт прифильтровой зоны и подключался через сопротивление 1 КОМ к осциллографу С 8-13.

Схема установки датчиков показана на рис. 2.

Крепление датчиков позволяло перемещать их как в вертикальном, так и горизонтальном направлении.

Результаты измерений амплитуды I и II пика давления  $A_I$  и  $A_{II}$ , амплитуды фазы разряжения  $A_p$ , скорости фильтрации  $V_f$  по высоте и глубине прифильтровой зоны приведены на рис. 3.

На диаграммах 1—3 приведены характеристики волн давления в прифильтровой зоне при незащемленном положении фильтра (за стенкой фильтра — вода). Датчик перемещался в створе, лежащем на расстоянии  $L = 2$  см. Диаграммы 4—6 построены для того же створа при четырех степенях заполнения камеры газовой смесью (0,25; 0,5; 0,75; 1)  $V_K$ .

Диаграмма 7 характеризует затухание давления по глубине прифильтровой зоны на расстоянии  $H = 6$  см от дна фильтра, а 8 — изменение скорости фильтрации в двух створах, отстоящих от стенки фильтра на  $L$ , равном 0,5 и 4 см.

Каждая из диаграмм давления 1—3 имеет максимум, находящийся в зоне нижнего обреза рабочей камеры, что указывает на затухание давления по мере удаления от пульсирующего пузыря. В то же время из данных экспериментов следует, что расстояние от обреза камеры до дна фильтра практически не оказывает влияния на параметры волн давления в прифильтровой зоне, что подтверждено для двух объемов газовой смеси  $V_r = 1/4 V_K$  и  $1/2 V_K$ .

Из диаграмм давления 4—6 следует, что с увеличением степени заполнения рабочей камеры газовой смесью в пределах  $V_r = 0,25 V_K \dots V_r = V_K$ ,  $A_I$  в зоне выхлопа возрастает в 10—11 раз,  $A_p$  — в 4—5 раз, а  $A_{II}$  снижается в 4—4,5 раза.

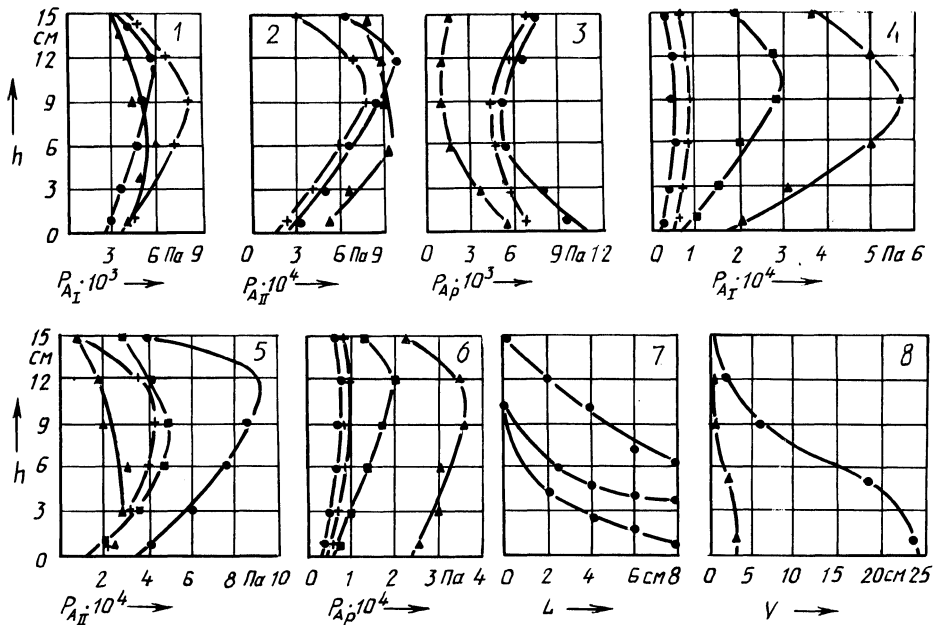


Рис. 3. Диаграммы пульсаций давления и скорости фильтрации в прифилтровой зоне:  
 1-3:  $V_F = 45 \text{ см}^3$ ;  $\cdot - H = 12 \text{ см}$ ;  $+ - H = 9 \text{ см}$ ;  $\Delta - H = 6 \text{ см}$ ; 4-6:  $H = 12 \text{ см}$ ;  $\bullet - V_F = 45 \text{ см}^3$ ;  $+ - V_F = 90 \text{ см}^3$ ;  $\blacksquare - V_F = 135 \text{ см}^3$ ;  $\blacktriangle - V_F = 180 \text{ см}^3$ ; 7:  $V_F = 90 \text{ см}^3$ ;  $H = 12 \text{ см}$ ;  $h = 6 \text{ см}$ ; 8:  $V_F = 45 \text{ см}^3$ ;  $H = 9 \text{ см}$ ;  $\cdot - L = 0,5 \text{ см}$ ;  $\Delta - L = 4 \text{ см}$

Причем изменения амплитуд давления незначительны в диапазоне 1/4-1/2 объема камеры.

Из диаграммы 7 видно, что все амплитудные характеристики волн давления затухают по экспоненциальным кривым с увеличением расстояния.

Из диаграммы 8 следует, что скорость фильтрации принимает максимальные значения в центральной части обрабатываемого участка фильтра и существенно затухает по мере удаления от него.

На диаграмме скорости показаны значения максимальной скорости фильтрации, которая определялась непосредственно по осциллограммам с использованием тарировочного графика.

Расчет акустического КПД производился по [1]:

$$\frac{W_{\text{АК}}}{E} = \frac{S \int_0^{\infty} \frac{(p - p_0)^2}{\rho c_0} dt}{\frac{\rho_B V_0}{K - 1}},$$

где  $W_{AK}$  — поток энергии, излучающийся через поверхность;  $p$  — давление в волне сжатия на расстоянии  $r$  от датчика давления;  $\rho c_0$  — волновое сопротивление среды;  $S$  — площадь поверхности.

$W_{AK}$  определялся после расшифровки осциллограмм давления через поверхность цилиндра радиусом  $r = 7$  см и высотой  $H = 12$  см.

Акустический КПД составил 0,2 %, что обусловлено низкой скоростью расширения пузыря.

В результате скоростной фоторегистрации процессов пульсации парогазового пузыря выявлена качественная картина пульсаций продуктов быстрого химического превращения водородно-кислородной газовой смеси в полузамкнутой камере.

Доля энергии, превращенная в энергию пульсаций, для объемов 45–180 дм<sup>3</sup> составила около 5 %. Столь низкий КПД обусловлен значительной удельной поверхностью малых объемов смеси, поэтому при очистке фильтров следует использовать несколько литров газовой смеси.

При регенерации фильтров скважин следует обеспечивать полное заполнение рабочей камеры газовой смесью, так как амплитудные характеристики импульсов давления и скорости в этом случае максимальны, а характер распределения давления по высоте обрабатываемого участка наилучший.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Наугольных К.А., Рой Н.А. Электрические разряды в воде. — М., 1971. — 154 с. 2. Гешев П.И., Черник А.И. Частотные характеристики электродиффузионных датчиков скорости // ПМТФ, 1979. — № 4. — С. 8–82.

УДК 556.536

В.П.РОГУНОВИЧ, канд. техн. наук (ЦНИИКИВР)

### К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПРИВЕДЕННОГО КОЭФФИЦИЕНТА ШЕРОХОВАТОСТИ НЕОДНОРОДНЫХ ГРАНИЦ ВОДОТОКОВ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ СЕЧЕНИЯ

Анализ методов определения пропускной способности водотоков сложной формы сечения [1] показал, что в настоящее время неоднородность шероховатости границ учитывается коэффициентами шероховатости русел и пойм. При проектировании и эксплуатации сложных систем водотоков рассчитывается их водный режим. В связи с этим необходимо определить пропускную способность водотоков сложной формы сечения с неоднородной шероховатостью границ и, следовательно, приведенный коэффициент шероховатости.

Для определения приведенного коэффициента шероховатости принята гипотеза, использованная при разработке методики расчета поля продольных скоростей в руслах сложной формы сечения [2]. Получена удовлетворительная оценка погрешностей вычислений [3].

Предполагается, что средние скорости потоков в сечениях произвольной формы и прямоугольном равны, если равны гидравлические радиусы  $R$ , уклоны и средние скорости  $V_z$  и  $V_y$  гипотетически плоских по вертикали и горизонтали (рис. 1) потоков.



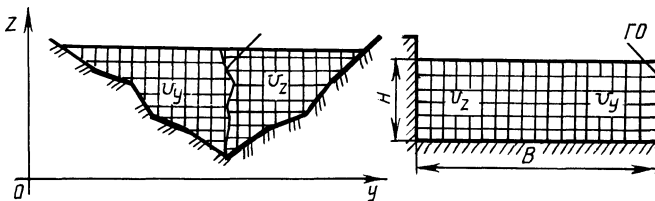


Рис. 1. Схемы к иллюстрации предлагаемой гипотезы

В соответствии с принятой гипотезой равенства гидравлических радиусов  $R$  средних в сечении скоростей гипотетически плоских по вертикали  $V_z$  и горизонтали  $V_y$  потоков для сечений произвольной и прямоугольной форм записываются в виде системы уравнений

$$\begin{cases} \frac{1}{R} = \frac{1}{H} \frac{1}{B} & \text{— из равенства } R; \\ \frac{1}{\omega} \int_{\omega} u_z(y, z) d\omega = c_z \sqrt{HI} & \text{— из равенства } V_z; \\ \frac{1}{\omega} \int_{\omega} u_y(y, z) d\omega = c_y \sqrt{BI} & \text{— из равенства } V_y, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\omega$  — площадь сечения водотока сложной формы;  $u_z$  и  $V_z$  — местная и средняя скорости в плоском по вертикали потоке сложной формы сечения;  $u_y$  и  $V_y$  — местная и средняя скорости в плоском по горизонтали потоке сложной формы сечения;  $H$  и  $c_z$  — глубина прямоугольного сечения и скоростной коэффициент Шези, определяемый для плоского потока по вертикали в прямоугольном сечении;  $B$  и  $c_y$  — полуширина прямоугольного сечения и скоростной коэффициент Шези, определяемый для плоского потока по горизонтали в прямоугольном сечении до гидродинамической оси.

В системе (1) левые части равенств относятся к сечению сложной формы, правые — к сечению прямоугольной формы.

Заметим, что сечение произвольной формы может иметь неоднородную по границам шероховатость, характеристики которой учитываются в формулах для расчета распределения скоростей в плоских потоках  $u_z$  и  $u_y$ , в то время как шероховатость границ прямоугольного сечения принимается однородной.

Система (1) замкнута. Из нее можно вычислить для прямоугольного сечения размеры  $H$ ,  $B$  и коэффициент шероховатости  $n$ . Согласно предлагаемой гипотезе, в сечениях произвольной формы и прямоугольном равны средние скорости, гидравлические радиусы и уклоны. Из их равенства следует, что приведенный коэффициент шероховатости сечения сложной формы с неоднородными границами водотока равен коэффициенту шероховатости прямоугольного сечения. Тогда из (1) определяется приведенный коэффициент шероховатости неоднородных по границам сечения водотоков сложных форм.

Численные значения интегралов в системе (1) можно определить следующим образом:

$$\int_{\omega} u_z d\omega = \int_0^B \int_{z_0}^{z_1} u_z(y, z) dz dy = \sqrt{I} \int_0^B c_z(y) h(y) \sqrt{h(y)} dy, \quad (2)$$

где  $c_z(y)$  – скоростной множитель Шези, определяемый для вертикали  $h(y)$  плоского потока, находящейся на расстоянии  $y$  от начала отсчета;  $z_0$  и  $z_1$  – отметка дна водотока и поверхности воды.

Периметр поперечного сечения русла сложной формы можно представить состоящим из линейных отрезков, а сечение – из трапецидальных, прямоугольных и треугольных отсеков. Тогда вычисление интегралов системы (2) можно свести к суммированию расходов, проходящих через эти отсеки. Расходы через отсеки будут определяться зависимостью, используемой для определения скоростного множителя Шези  $c$ .

Вычисление расходов для плоских потоков по горизонтали выполняется с учетом положения ГО.

По предлагаемой методике вычислены средние значения коэффициентов шероховатости. Погрешность расчетов приведенного коэффициента шероховатости по предлагаемой методике составила (в процентах)  $1 \pm 1$  при доверительной вероятности  $P = 0,95$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Барышников Н.Б. Речные поймы. – Л., 1978. – 152 с. 2. Рогуневич В.П., Богданович М.И. Распределение скоростей в руслах неправильной формы сечения // Водное хоз-во и гидротехн. стр-во. – Минск, 1984. – Вып. 14. – С. 56–62. 3. Богданович М.И. Метод расчета продольного компонента осредненной скорости в равномерных открытых потоках неправильной формы поперечных сечений // Тезисы докл. Второй Всес. конференции. – Т. 11. – М., 1984. – С. 21–24.

УДК 532.543

С.А.БАМПИ (ЦНИИКИВР)

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОСИ В СЕЧЕНИЯХ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Пропускная способность русел сложных сечений с неоднородной шероховатостью на отдельных участках смоченного периметра зависит от среднего значения коэффициента шероховатости данного сечения. Известные способы его определения, в частности, средневзвешенный по периметру, не позволяют достаточно надежно определить пропускную способность русел из-за многообразия форм поперечных сечений и вариантов расположения различной шероховатости по периметру, которая создает существенно различные сопротивления движению воды. Последние приводят к тому, что в сечении возникают нетранзитные зоны по причине наличия больших местных сопротивлений движению, например, на закустаренных и залесенных участках периметра. Причем при небольших глубинах эти участки могут быть нетранзитными, а при больших – транзитными, одни и те же участки сечения при различных

глубинах включаются или исключаются из общей площади сечения, вследствие чего изменяется форма, площадь сечения и пропускная способность. Учет этих факторов невозможен с помощью существующих методов определения пропускной способности, кроме методики, предложенной в работах [1, 6], которая позволяет определить среднее значение коэффициента шероховатости из решения системы уравнений

$$\begin{cases} C_h \sqrt{hI} = \frac{Q_B}{\omega}; \\ C_B \sqrt{BI} = \frac{Q_r}{\omega}; \\ \frac{1}{h} + \frac{1}{B} = \frac{1}{R}. \end{cases} \quad (1)$$

При выполнении расчетов для открытого потока применительно к сечению неправильной формы обычно рассматриваются исходное и гипотетическое сечение прямоугольной формы с одинаковой по периметру шероховатостью [1], а также в соответственных сечениях следующие плоские потоки: параллельный вертикальной плоскости и параллельный — горизонтальной (слева и справа от гидродинамической оси, за которую принимается линия  $\frac{\partial v}{\partial y} = 0$ ).

В уравнениях слева содержатся характеристики прямоугольного сечения, справа — характеристики сечения неправильной формы. В системе (1)  $h$  — глубина прямоугольного сечения;  $B$  — полуширина прямоугольного сечения;  $C_h$  и  $Q_B$  — скоростной множитель Шези и суммарный расход плоского потока в вертикальных плоскостях (по вертикали), параллельных направлению течения;  $C_B$ ,  $Q_r$  — скоростной множитель Шези и суммарный расход плоского потока в горизонтальных плоскостях (по горизонтали), параллельных направлению течения;  $\omega$  — площадь сечения. Для решения системы (1) создана и отлажена программа [1], позволяющая решить эту сложную систему.

Суммарный расход плоского потока по горизонтали состоит из суммы расходов плоских потоков в сечении слева и справа от гидродинамической оси, поэтому точность определения  $Q_r$  зависит от точности определения положения гидродинамической оси в потоке. Ранее за гидродинамическую ось сечения принималась линия, для которой  $\frac{\partial v}{\partial y} = 0$ , где  $v$  — осредненная местная продольная скорость, проходящая через середину ширины сечения на различных отметках [2, 3], т.е. соблюдалось равенство площадей слева и справа относительно гидродинамической оси. В первом приближении такое решение приемлемо, особенно если коэффициенты шероховатости на локальных участках периметра справа и слева от оси близки по значению друг другу. Однако, если шероховатость меняется резко (это часто случается при выходе потока на пойму), местоположение гидродинамической оси должно сместиться в сторону меньшей шероховатости, т.е. необходимо соблюдать равенство расходов.

В настоящее время определить положение гидродинамической оси можно лишь приближенно.

Для установления координат гидродинамической оси можно воспользоваться формулой распределения скоростей в плоском потоке Прандтля—Кармана в связи с тем, что в нее входит коэффициент шероховатости.

Скорости плоского по горизонтали потока для левой и правой частей относительно гидродинамической оси соответственно равны:

$$v_{л} = u_{л} \left[ 1 + \frac{\sqrt{g}}{\kappa C_{л}} \left( 1 + \ln \frac{y_{л}}{B_{л}} \right) \right]; \quad (2)$$

$$v_{п} = u_{п} \left[ 1 + \frac{\sqrt{g}}{\kappa C_{п}} \left( 1 + \ln \frac{y_{п}}{B_{п}} \right) \right],$$

где  $u_{л}$ ,  $u_{п}$  — средние на вертикали скорости плоского по горизонтали потока, определяемые по формулам

$$u_{л} = C_{л} \sqrt{B_{л} I}, \quad (3)$$

$$u_{п} = C_{п} \sqrt{B_{п} I},$$

где  $B_{л}$ ,  $B_{п}$  — расстояния от левого и правого берега до гидродинамической оси;  $y_{л}$ ,  $y_{п}$  — расстояния от левого и правого берега до точки, в которой вычисляется скорость;  $\kappa$  — постоянная Кармана, примерно равная 0,4;  $g$  — ускорение силы тяжести.

В точке гидродинамической оси

$$v_{л} = v_{п}; \quad y_{л} = B_{л}; \quad y_{п} = B_{п}.$$

Тогда

$$\sqrt{B_{л}} \left( c_{л} + \frac{\sqrt{g}}{\kappa} \right) = \sqrt{B_{п}} \left( c_{п} + \frac{\sqrt{g}}{\kappa} \right) \quad (4)$$

или

$$\sqrt{B_{л}} (c_{л} + 7,83) = \sqrt{B_{п}} (c_{п} + 7,83), \quad (5)$$

где  $c_{л}$  и  $c_{п}$  — коэффициенты Шези для  $B_{л}$  и  $B_{п}$ .

Для определения скоростного коэффициента Шези воспользуемся формулой Агроскина. В случае больших коэффициентов шероховатости, выходящих за пределы значений, рекомендуемых Агроскиным, и малых гидравлических радиусов формулы для определения  $c$  приводят к погрешностям. В таких случаях можно применить формулу Срибного. Таким образом, если  $B \geq 1$ , то коэффициент вычисляется по формуле Агроскина:

$$c = \frac{1}{n} + 7,7 \ln B, \quad (6)$$

если  $B < 1$ ,  $c$  вычисляется по формуле Срибного:

$$c = \frac{1}{n} B^{1,18} \sqrt{n}, \quad (7)$$

где  $n$  — локальный коэффициент шероховатости.

Подставляя (6) и (7) в (5), методом итерации определим положение гидродинамической оси с учетом всех локальных коэффициентов шероховатости.

В сложном сечении гидродинамическая ось определяется отдельно для каждого характерного уровня (в данном сечении) и состоит из нескольких частей, сливающихся на некотором уровне в одну кривую (рис. 1).

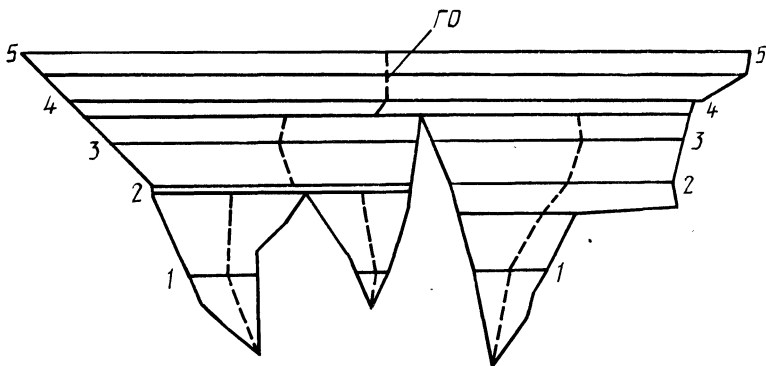


Рис. 1. Схема расположения гидродинамической оси в сложном сечении :  
1, 2, 3, 4, 5 — характерные уровни сечения

Составлена и отлажена программа на ФОРТРАН 4, которая в любом сложном сечении по координатам сечения и локальным коэффициентам шероховатости позволяет определить средний коэффициент шероховатости и координаты гидродинамической оси для нескольких характерных (от пяти до десяти) уровней.

Уточненное положение гидродинамической оси позволяет рассчитать площадь сечения справа и слева относительно нее, а также модули расхода плоского по горизонтали потока справа или слева, что является необходимым условием для определения среднего коэффициента шероховатости в сечениях для характерных уровней, модуля расхода при данном наполнении сечения [1], а также поля продольных осредненных скоростей в руслах как правильной, так и неправильной форм [2, 4]. В работе [5] по 75 полям скоростей, измеренным в потоках различной формы сечения, определена погрешность вычисления продольных скоростей по методике [4] с учетом расположения гидродинамической оси (не превышает 2 %, а с надежностью 0,95 — 3 %).

Погрешности вычисления минимальны для водотоков с плавным изменением формы сечения и локальных коэффициентов шероховатости.

Предложенная методика позволяет определять положение гидродинамической оси в руслах сложной формы сечения с неоднородной по периметру шероховатостью с достаточной степенью точности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Рогуневич 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. — Вып. 8. — 1982. — С. 75—92. 2. Коваленко Э.П. Исследование движения воды в открытых руслах. — Минск, 1963. — 223 с. 3. Бампи С.А. Распределение скоростей в плоском равномерном потоке // Вопросы водного хозяйства Белоруссии. — 1965. — С. 129—136. 4. Рогуневич В.П., Богданович М.И. Распределение продольных скоростей в руслах неправильной формы сечения // Водное хозяйство и гидротехн. стр-во. Минск. — 1983. — Вып. 13. — С. 63—71. 5. Богданович М.И. Метод расчета продольного компонента осредненной скорости в равномерных открытых потоках неправильной формы поперечного сечения // Динамика и термика рек, водохранилищ и эстуариев. Тезисы докл. 2-й Всес. конференции. М., 1984. — Т. 1. — С. 21—24. 6. V.P.Rogunovich /U.S.S.R/: Mathematical Models of Water Motion in Channel Systems (I.C.N.M.C.O.F.W.R.E.A.). Bratislava, 1981.

УДК 532.543:62/.41

В.П.РОГУНЕВИЧ, Ф.Д.ШНИПОВ,  
канд-ты техн. наук (ЦНИИКИВР)

### ВЛИЯНИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ ТЕЧЕНИЙ НА УСТОЙЧИВОСТЬ РУСЕЛ ТРАПЕЦЕИДАЛЬНЫХ КАНАЛОВ

Устойчивость русел земляных каналов в основном определяется величиной динамического воздействия на частицы подстилающего грунта движущегося турбулентного потока. Установлено [3], что в продольно-однородных потоках турбулентные характеристики и динамические усилия распределены по периметру неравномерно. Это объясняется трехмерностью поля осредненных скоростей: в каналах некруглой формы существуют небольшие (1—5 % от средней скорости) поперечные компоненты, образующие совместно с продольным стационарные течения с винтообразными линиями тока [1, 2]. Поперечные течения оказывают значительное влияние на распределение по сечению продольных скоростей и касательных напряжений, транспорт насосов, процессы перемешивания, аэрации, тепло- и массообмена. Существующие методы гидравлического расчета земляных каналов не учитывают влияние поперечного осредненного движения, а, следовательно, реально существующего распределения по периметру придонных характеристик. Это приводит к тому, что сечения, запроектированные по методам допускаемой средней скорости или влекущей силы, подвергаются деформациям, расширяются и мелеют; уменьшается надежность работы каналов, снижается их пропускная способность.

В статье представлены теоретические и экспериментальные данные, подтверждающие влияние поперечных течений на устойчивость русел земляных каналов трапецеидальной формы сечения.

Поперечные компоненты осредненной скорости, создавая поле конвективных токов, зависящее от формы, размеров канала и распределения по сечению турбулентных напряжений, осуществляют концентрированный перенос импульса из зон с большими его значениями к размываемым границам потока, что приводит к перераспределению по периметру придонных скоростей и касательных напряжений на стенке. Измерения последних, выполненные

S.Ghosh, N.Roy [3] в трапецидальных каналах с различным заложением откосов и отношением поперечных размеров, показали, что максимальные значения  $\tau_0$ , как правило, находятся на боковых откосах и при заложении  $m \geq 1$  на 10–100 % превышают среднее по периметру значение  $\tau_0$ . Применительно к условиям эксперимента [3] с помощью созданной математической модели трехмерного поля осредненных скоростей [4] рассчитаны поперечные компоненты скорости (рис. 1, а). Расчетные поперечные течения удовлетворительно объясняют экспериментальное распределение касательных напряжений: локальные максимумы  $\tau_0$  имеют место в зоне встречи нисходящих токов с жесткими границами, локальные минимумы – в зоне восходящих токов.

Для оценки влияния поперечных течений на распределение придонных характеристик в лабораторном лотке с помощью термоанемометрической системы постоянной температуры "DISA" выполнены совместные измерения поперечных компонентов и придонных осредненной и актуальной скорос-

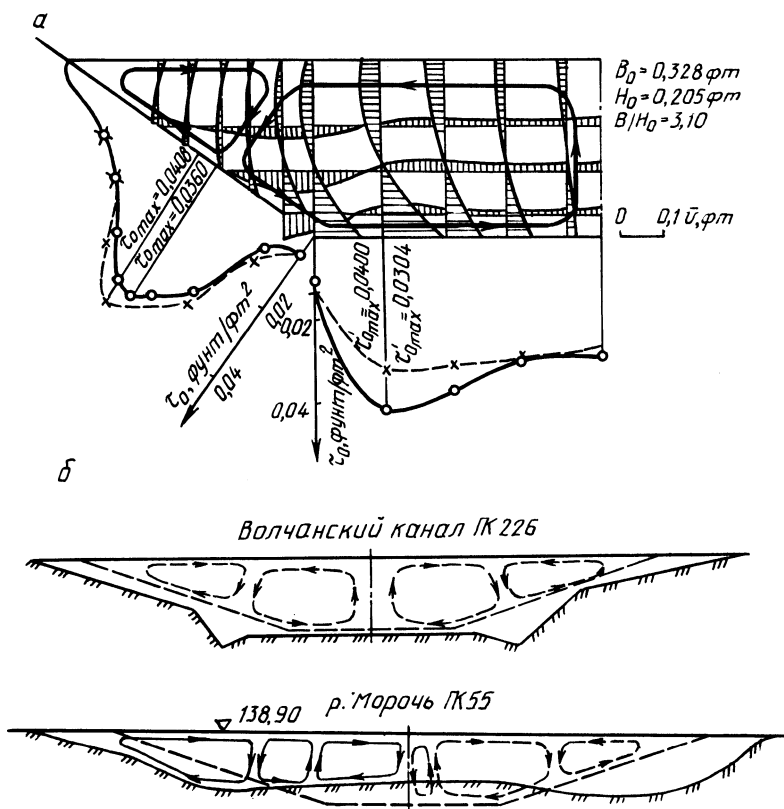


Рис. 1. Схема распределения по периметру локальных касательных напряжений (а) и механизм деформаций русел трапецидальных каналов (б):  $\circ - \circ$  – касательные напряжения (эксперимент);  $\Rightarrow$  } – направление поперечных течений (расчет); - - - - - проектное сечение;  $\text{///}$  – существующее сечение

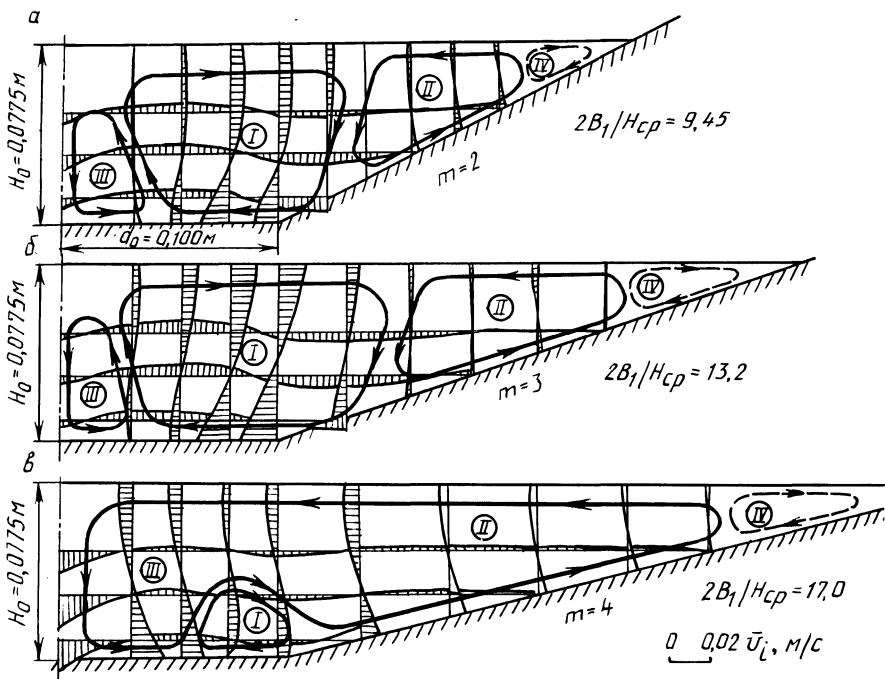


Рис. 2. Расчетное распределение  $\bar{v}_i$  ( $i = 2, 3$ ) по [4] в каналах с различным заложением откосов и параметром формы:  
 а)  $m = 2, \beta = 9,45$ ; б)  $m = 3, \beta = 13,2$ ; в)  $m = 4, \beta = 17,0$

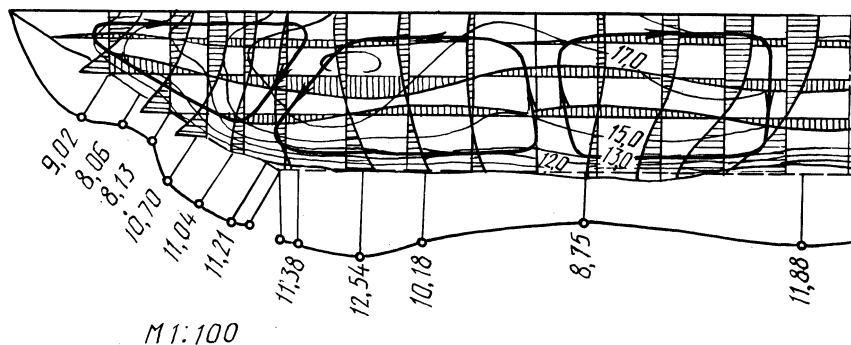


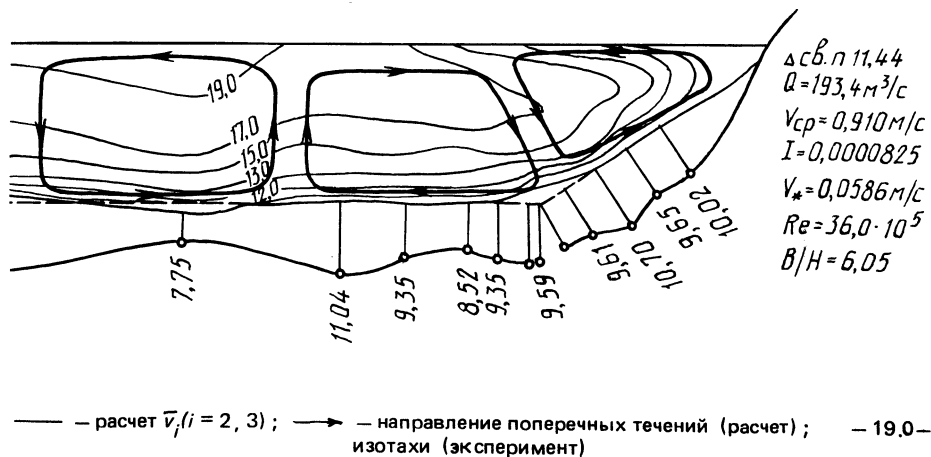
Рис. 3. План экспериментальных изоток и расчетное распределение поперечных скоростей в натурном канале:



тей (0,5 мм от жесткой границы) [5]. Получены аналогичные результаты: локальные максимумы  $\bar{V}_g$  и  $V_{g,a}$  совпадают с зоной нисходящих токов поперечной циркуляции, локальные минимумы имеют место в зоне восходящих токов.

Поперечные течения, концентрированно доставляя к размываемым границам осветленную воду, создают в сечении области с дефицитом взвешенных наносов [6]. Опыты Н.П.Зрелова [7] и Л.Д.Козыренко [8] показали, что формирование отложений является "... не только функцией продольной скорости, но и внутренних винтовых течений". Минимум отложенных наносов наблюдается в углах сечения, максимум — в средней части канала. Линии равных концентраций взвешенных наносов ведут себя подобно изотаксам — "прижаты" в углах сечения и выпуклы к середине потока у сторон [9]. Расчет изоплет без учета влияния поперечных течений приводит к результатам, значительно отличающимся от экспериментальных данных [9]. Таким образом, поперечные течения играют важную роль в транспорте взвешенных наносов, создавая в сечении области с их дефицитами, совпадающие с зонами локальных максимумов придонных скоростей и касательных напряжений на стенке.

Характерной чертой формирования русел прямолинейных земляных каналов является преобладающий размыв боковых откосов и повышение дна, вызванное отложением в этой области наносов [10]. Существование поперечных компонентов осредненной скорости позволяет объяснить такой механизм деформации сечений. Если на прямолинейном участке канала движение было бы параллельноструйным, то через некоторое время можно было бы ожидать стабилизации размыва, т.к. на место унесенной частицы грунта будут доставляться другие из соответствующих точек вышерасположенных сечений. Существование небольшого поперечного осредненного движения приводит к тому, что частицы грунта будут транспортироваться не только вдоль потока, но и перемещаться в поперечном направлении. Таким образом, устойчивость русла будет зависеть как от величины придонной скорости, так и в значительной мере от ее направления, особенно если учесть, что основной формой движения донных наносов являются качение и сальтация [11].



С помощью созданной математической модели трехмерного поля осредненных скоростей [4] выполнен расчет поперечных течений для проектных и существующих сечений канализованных рек Белоруссии (данные наблюдений за деформациями С.К.Ревяшко [12]), р. Морочи и Волчанского канала (данные Белгипроводхоза).

Установлено, что в проектных сечениях нисходящие токи поперечной циркуляции направлены на боковые откосы в район углов и размыв происходит в основном в области их встречи с размываемыми границами (рис. 1, б). Зона преимущественного отложения наносов совпадает с областью восходящих токов. В сформированном русле р. Морочи поперечные скорости направлены на горизонтальное дно и от основания откоса к урезу (рис. 1, б) — осредненное движение повышает устойчивость откосов.

Таким образом, влияние поперечных компонентов осредненной скорости на устойчивость русел земляных каналов значительно и может быть сформулировано в основных трех положениях:

поперечные течения концентрированно доставляют массы воды с поверхности потока к размываемым границам, что приводит в области нисходящих токов к увеличению, а в области восходящих токов — к уменьшению локальных придонных скоростей и касательных напряжений;

они концентрированно доставляют в области повышенных придонных скоростей и касательных напряжений осветленную воду, которая, насыщаясь наносами, перемещается в поперечном направлении, и в области восходящих токов происходит отложение взвешенных наносов;

они способствуют однообразному транспортированию в поперечном направлении данных наносов.

В зависимости от направления поперечных течений осредненное движение способствует повышению (придонные поперечные скорости  $\bar{V}_i$  направлены от основания откоса к урезу) или понижению (направление  $\bar{V}_i$  противоположное) устойчивости частиц грунта на откосах, а следовательно, устойчивости откосов и сечения. Поэтому при гидравлических расчетах устойчивых земляных каналов по методу допускаемой средней скорости выполнение условия: средняя скорость  $\bar{V}$  не превышает допускаемую  $V_0$  — не является достаточным для обеспечения устойчивости сечения. Необходимо, чтобы русло имело такие параметры, при которых области максимальных придонных скоростей и касательных напряжений находились на горизонтальном дне, а поперечные придонные скорости были направлены от основания откоса к урезу и осредненное движение повышало устойчивость сечения.

С целью определения параметра формы  $\beta = 2B_1/H_{cp}$  и угла заложения боковых откосов предельно-устойчивого сечения трапецеидального канала в мелкозернистых грунтах выполнены численные и экспериментальные исследования. С помощью математической модели [4] для канала с параметрами  $2B_0 = 0,20$  м,  $H_0 = 0,0775$  м при  $m = 2, 3, 4$  ( $B_0$  — полуширина по дну,  $H_0$  — максимальная глубина) выполнены расчеты поперечных скоростей (рис. 2). При  $m < 4$  и параметре формы  $\beta = 2B_1/H_{cp} < 17$  ( $B_1$  — полуширина потока поверху) в полусечении существует два основных вихря поперечной циркуляции (I, II), вызванных анизотропностью турбулентных напряжений, и два индуцированных (III, IV). При улоаживании откоса область и интенсивность основного вихря (II) увеличиваются поскольку зона анизотропности турбулен-

тных напряжений смещается на откос к урезу. В сечениях с  $m \geq 4$  ( $\beta \geq 17$ ) основной винт (I) уменьшается, охватывая лишь зону углов, а винты II и III объединяются, образуя циркуляцию с направлением поверхностных струй к оси симметрии, а придонных — вверх по откосу. В соответствии с ранее изложенным в трапецидальном канале с  $m \geq 4$ ,  $\beta > 17$  максимальные значения придонных скоростей будут иметь место на горизонтальном дне и осредненное движение способствует повышению устойчивости откосов: сечение при  $V \leq V_0$  будет сохранять общую устойчивость. Это подтверждается результатами экспериментальных исследований на жесткой и размываемой моделях канала с параметрами:  $2B_0 = 0,20$  м,  $H_0 = 0,082$  м,  $i_0 = 0,01$ ,  $m = 4,3$ ,  $\beta = 18$  ( $i_0$  — уклон дна). Следует отметить, что полученные значения параметров предельно-устойчивых русел удовлетворительно согласуются с экспериментальными [10] и расчетными по гидроморфологическим зависимостям [13] данными.

Существование поперечных компонентов осредненной скорости позволяет с иных позиций объяснить наблюдаемую в опытах [14] и теоретически исследованную с помощью одномерных уравнений движения [15] неустойчивость потока в "большом". Поток в этом случае движется несколькими макроструями и оказывает неблагоприятное влияние на устойчивость русла: небольшие возмущения в состоянии вызвать перемещение гидродинамической оси к одному из откосов и, как следствие, размыв его и меандрирование русла. Поэтому целесообразно проектировать земляные каналы с одноструйным движением потока, когда максимальные значения турбулентных характеристик находятся на оси симметрии, возникшие в потоке возмущения гасятся и не способны значительно сместить гидродинамическую ось.

Поперечные течения, перераспределяя продольные скорости и вызывая появление в сечении нескольких локальных экстремумов, причем области максимумов совпадают с зонами нисходящих токов, а области минимумов — с зонами восходящих токов, и являются причиной неустойчивости потока в "большом" (рис. 3). Созданная математическая модель [4] позволила определить количество и положение макроструй (рис. 3) и установить, что при  $25 > \beta > 17$  движение потока в трапецидальных каналах, сложенных мелкозернистыми грунтами, осуществляется одной макроструей с максимумом турбулентных характеристик на оси симметрии.

Таким образом, выполненные теоретические и экспериментальные исследования позволили:

объяснить неравномерность распределения по периметру канала касательных напряжений и придонных скоростей, наблюдаемый механизм деформации русел, сформулировать основные положения влияния поперечных компонентов осредненной скорости на устойчивость каналов;

гидродинамически обосновать значения параметра формы и угла откоса предельно-устойчивых сечений трапецидальных каналов в мелкозернистых грунтах;

установить предельные значения параметра формы, при которых поток устойчив в "большом" и движение его осуществляется одной макроструей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. О ф и ц е р о в А.С. Вторичные течения. — М., 1959. — 163 с. E i n s t e i n H.A. Li Secondary currents in straights channels // Transaktions Amer. Geophysical Union, 1958. —

V. 36. — N 6, pp. 1085—1088. 3. G h o s h S.N., R o y N. Boundary shear distribution in open channel flow // I. Hydraul. Div. Proc. Amer. Soc. Civ. Eng., 1970.— Vol. 96.— N 4.— pp. 967—994. 4. Р о г у н о в и ч В.П., Ш н и п о в Ф.Д. Расчет поперечных течений в прямолинейных трапецидальных каналах с переменной по периметру шероховатостью // Динамика и термика рек, водохранилищ и эстуариев: Тез. докл. — 2-я Всес. конф. М., 1984. — С. 69—71. 5. Ш н и п о в Ф.Д. Экспериментальные исследования трехмерного поля осредненных скоростей и турбулентных напряжений в прямолинейных потоках трапецидального сечения // Гидравлика открытых русел. — М., 1984. — С. 108—114. 6. Р о з о в с к и й И.Л. О влиянии поперечных течений в потоке на движение взвешенных наносов // Вести ин-ту гидрол. и гидротехники АН УССР, 1963. — № 23 (60). — С. 71—75. 7. З р е л о в Н.П. Циркуляционные течения и осаднения наносов в каналах прямоугольного сечения // Тр. гидравл. лабор. М., 1959. — Вып. 7. — С. 221—262. 8. К о з ы р е н к о Л.Д. Вторичные течения и взвешивание наносов // Тр. Москов. инж.-строит. ин-та. — 1968. — Вып. 1. — № 55. — С. 93—102. 9. C h a o - L i n C h u i, H s i n g D.E. Secondary flow, shear stress and sediment transport // I. Hydraul. Div. Proc. Amer. Soc. Civ. Eng. — 1981. — Vol. 107. — pp. 879—898. 10. М у х а м е д о в А.М., Ж у р а е в Т.Ж., И ш а н о в Х.Х. Исследование устойчивости русел больших каналов на крупномасштабных размываемых моделях. // Гидротехническое строительство. — 1983. — № 8. — С. 21—23. 11. Г р и ш и н Н.Н. Механика придонных наносов. М., 1982. — 160 с. 12. Р е в я ш к о С.К. Устойчивое на размыв поперечное сечение русла // Конструирование и расчеты осушительно-увлажнительных систем. — Минск, 1976. — Вып. 2. — С. 133—141. 13. А л т у н и н В.С. Мелиоративные каналы в земных руслах. — М., 1979. — 266 с. 14. К а д ы р о в А.А., Н у р и т д и н о в З., И р м у х а м е д о в Р. Натурные исследования параметра формы и предельных скоростей течения в Кызылкумском магистральном канале // Сб. науч. тр. САНИИРИ. — Ташкент. — Вып. 168. — 1983. — С. 129—143. 15. В о й н и ч - С е н о ж е н ц к и й Т.Г. Проблема устойчивости течения потока реальной жидкости в каналах конечной глубины // Изв. Тбилисского НИИ сооружений и гидроэнергетики. — 1966. — Т. 16. — С. 18—38.

УДК 532.5

В.И.КРИЧКО (ЦНИИКИВР)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕСЕЧЕНИЙ ПОТОКОВ НА РАЗМЫВАЕМЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ

При проектировании каналов большой протяженности, например, каналов переброски, а также различного рода перепусков приходится решать задачу пересечения ими естественных водотоков. Пропуск воды через пересекаемый водоток осуществляется обычно дюкерами и акведуками. Однако, если разность отметок уровней воды пересекающихся водотоков незначительна, то наиболее рациональными являются узлы пересечения со смешением потоков. Последние почти не используются в гидротехнической практике. Это объясняется недостаточной изученностью взаимодействия пересекающихся потоков.

Большинство работ отечественных и зарубежных авторов посвящено частным случаям пересечения потоков — их слиянию и разделению, что не дает полного представления о характере явлений, возникающих в узле пересечения [1—5]. Особого внимания заслуживают рекомендации [1, 2] для случая пересечения открытых потоков при изменении расстояния между центрами узлов слияния и разделения (база пересечения), где дается расчет скоростей по границе течения и базы пересечения, основанный на применении методов теории функций комплексного переменного. В настоящее время отсутствуют ме-

тодики по прогнозу местных размывов, возникающих при взаимодействии пересекающихся потоков.

Для детального исследования кинематической структуры потоков и оценки деформаций русел в узлах пересечений на русловой площадке ЦНИИ комплексного использования водных ресурсов были построены размываемые гидравлические модели. Последние представляют собой пересечение двух искусственных водотоков полигонального сечения, размеры которых в масштабе 1 : 150 приближались к параметрам большого канала со следующими характеристиками: ширина по верху – 170 м, ширина по дну – 24 м, максимальная глубина – 15 м, заложение откосов – 1:6 и 1:4, уклон дна – 0,000008, расходы воды – 1000–3000 м<sup>3</sup>/с. С целью обеспечения подобия распределения скоростей по высоте потока с натурой плановый и вертикальный масштабы не искажались ( $M_L = M_H$ ). При выборе масштаба моделей учтены положения о необходимости работы моделей в квадратичной области

сопротивления  $\lambda = f\left(\frac{H}{\Delta}\right)$  и соблюдения критерия подобия Фруда  $Fr = \frac{\bar{v}^2}{gH} =$   
 $= \text{idem}$  [6], где  $H$  – глубина потока,  $\Delta$  – абсолютная высота выступов шероховатости,  $\lambda$  – коэффициент гидравлического трения. Каналы, длина которых составляла 18–24 м, строились в выемке на среднезернистом песке с диаметром частиц  $d_{\text{св}} = 0,247$  мм и следующим гранулометрическим составом: фракции 1...0,5 мм – 0,98 %; 0,5...0,4 мм – 9,34 %; 0,4...0,315 мм – 25,64 %; 0,315...0,25 мм – 24,51 %; 0,25...0,2 мм – 16,42 %; 0,2...0,16 мм – 12,29 %; 0,16...0,1 мм – 6,5 %; 0,1...0,071 мм – 2,81 %; меньше 0,071 мм – 1,51 %.

В исследованиях рассматривались случаи пересечения при совпадении дна, а также осей подводящего и отводящего участков пересекающего водотока (нулевая база пересечения) с изменением соотношений расходов, углов пересечения, размеров и формы поперечного сечения каналов. Для равномерного распределения воды применялась полиэтиленовая стружка и две решетки, находившиеся в головной части каждого водотока. Уровни воды регулировались затворами на концевых участках каналов, расходы измерялись треугольными водосливами, а скорости – шариковыми датчиками [7] в характерных створах пятиточечным способом [8]. Количество вертикалей изменялось в диапазоне 7–9 в зависимости от ширины каналов (рис. 1). Длина начального участка водотоков до первого измерительного створа согласно рекомендациям [9] была равна 80–100*R* (*R* – гидравлический радиус). Экспериментальные данные обрабатывались на ЭВМ ЕС 10-60 по специально разработанной программе.

На рис. 1 показаны плановые эпюры осредненных векторов продольных скоростей при пересечении каналов с различным соотношением расходов  $Q_1/Q_2$  и ширины  $B_1/B_2$  водотоков под углами 45 и 90°. Рассматривая течение в узле пересечения потоков, можно выделить: 1) подводящие и отводящие участки канала и водотока (створы 1, 2, 5–7, 9); 2) участки сопряжения потоков (створ 3); 3) участки образования водоворотных зон (створы 4, 8). Анализируя пространственные поля скоростей пересечений водотоков, следует отметить: 1) при пересечении каналов с одинаковыми параметрами и расходами распределение осредненных векторов продольных скоростей как в плане, так и по вертикалям симметрично относительно плоскости  $a-a$  (рис. 1), причем в створе 3 – два максимума скоростей; 2) на подходе к пересечению

(створы 2, 7) и удаленных от него (створы 1, 5, 6, 9) распределение скоростей подобно между собой и близко к распределению скоростей в равномерных потоках; 3) в створе 3, расположенном в месте сопряжения потоков, при пересечении каналов с равными параметрами и соотношением расходов  $Q_1/Q_2$  1–3, как и при пересечении каналов с равными расходами и  $B_1/B_2$  1–2 при  $\alpha = 90^\circ$ , происходит смещение максимальных из осредненных по высоте потока векторов продольных скоростей  $U_{B_{max}}$  (где  $U_{B_{max}}$  – максимальное

из  $U_B = \frac{1}{H} \int_0^H u dh$ ) в сторону канала с меньшим расходом. В том же створе при равных расходах и  $B_1/B_2$  1–2 при  $\alpha = 45^\circ$ , также как и при пересече-

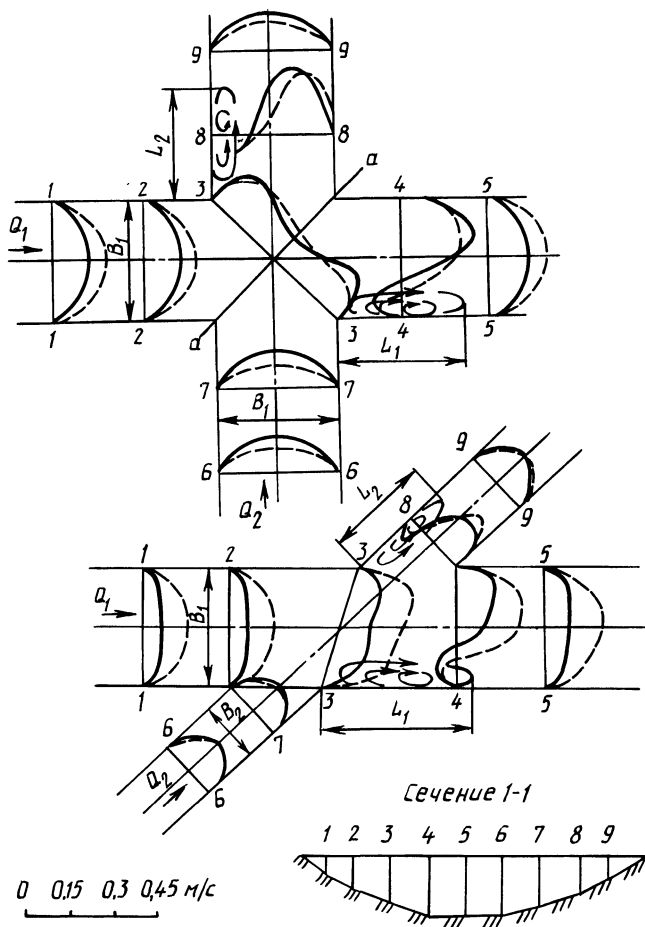


Рис. 1. Плановые эпюры средних на вертикалях осредненных продольных скоростей при пересечении каналов под углами  $45^\circ$  и  $90^\circ$ :  
 ————  $Q_1/Q_2 = 1$ ; - - - -  $Q_1/Q_2 = 3$

## Результаты исследований кинематически пересекающихся потоков

Опыт	Створ	$B_1 = B_2$				$B_1 = 2B_2$			
		$\alpha = 45^\circ$		$\alpha = 90^\circ$		$\alpha = 45^\circ$		$\alpha = 90^\circ$	
		№ верт.	$\frac{U_{В\max}}{U_{В\max\text{ Н.У}}}$	№ верт.	$\frac{U_{В\max}}{U_{В\max\text{ Н.У}}}$	№ верт.	$\frac{U_{В\max}}{U_{В\max\text{ Н.У}}}$	№ верт.	$\frac{U_{В\max}}{U_{В\max\text{ Н.У}}}$
$\frac{Q_1}{Q_2} = 1$	3	2	1,66	1	2,66	7	2,39	3	1,86
		8	1,66	9	2,66				
$Q_2$	4	3	1,62	3	1,56	2	2,38	3	2,53
		8	1,62	7	1,56	5	1,12	4	1,21
$\frac{Q_1}{Q_2} = 2$	3	4	1,26	3	1,11	7	1,64	8	1,13
		4	1,48	3	1,16	2	1,47	3	1,43
$Q_2$	8	8	2,18	8	2,18	6	1,29	6	1,46
$\frac{Q_1}{Q_2} = 3$	3	4	1,16	3	0,92	3	1,37	7	1,13
		4	1,41	2	1,13	3	1,37	2	1,22
$Q_2$	8	9	2,68	8	3,27	6	1,66	7	1,48

нии каналов с  $Q_1/Q_2$ , равном 1–3, а  $B_1/B_2$  1–2 и  $\alpha = 90^\circ$ ,  $u_{В\max}$  смещаются вправо от оси потока с большим расходом, при изменении  $Q_1/Q_2$  1–3, а  $B_1/B_2$  1–2 и  $\alpha = 45^\circ$  – влево от нее. При пересечении каналов с изменением соотношения расходов 1–3 и изменением отношения ширины  $B_1/B_2$  1–2 максимальные из осредненных по высоте потока продольных векторов скоростей перемещаются в створах 4 и 8 при  $\alpha = 45^\circ$  к оси потока, а при  $\alpha = 90^\circ$  – влево от нее.

В табл 1 приводятся отношения  $U_{В\max}/U_{В\max\text{ Н.У}}$  ( $U_{В\max\text{ Н.У}}$  – максимальные из осредненных по высоте потока вектора продольных скоростей (на удалении от узла пересечения) в зависимости от изменения углов пересечения, соотношений расходов и параметров водотоков с указанием вертикалей, на которых находятся  $U_{В\max}$ .

Особого внимания заслуживают участки образования водоворотных зон (створы 4, 8), так как в сжатых сечениях этих участков возникают наибольшие скорости, вызывающие повышенные деформации русел. На рис. 2 показаны зависимости соотношений длин водоворотов  $L_1/L_2$  и отношений длины водоворота основного канала  $L_1$  к его ширине от соотношения расходов  $Q_1/Q_2$ , ширины  $B_1/B_2$  и углов пересекающихся потоков. С помощью этих графиков можно определять плановые размеры водоворотных областей для рассмотренных случаев пересечения.

Проверена устойчивость несвязных грунтов в узлах пересечений посредством сравнения допускаемой на размыв для данного грунта динамической скорости  $u_{*g}$  с фактической динамической скоростью  $u_*$ . Последние вычислялись по зависимости [10]:

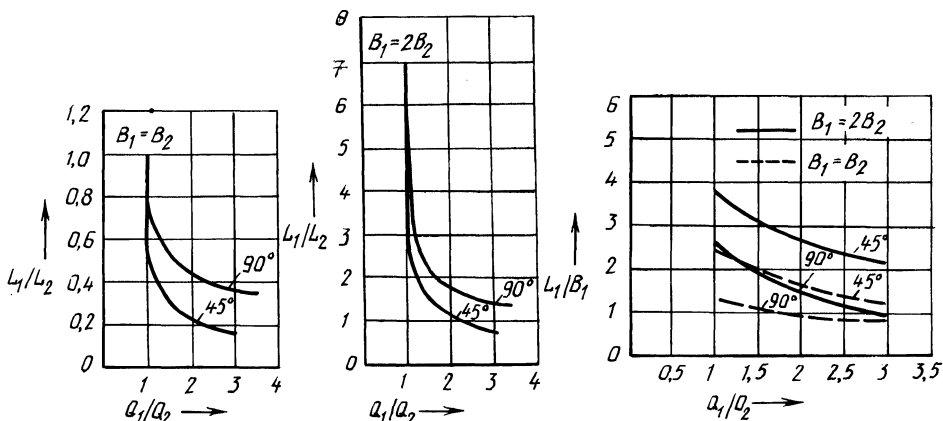


Рис. 2. Графики зависимости соотношений длин водоворотов и отношений длины водоворота основного канала к ширине его от соотношений расходов, ширины и углов пересекающихся потоков

$$U_* = \frac{U_B}{2,6 [3 - 1,07 \frac{\delta}{H} + (1 - 0,655 \frac{\delta}{H}) \ln (\frac{H}{\delta} - 0,655)]}$$

где  $\delta = \frac{\Delta}{7 \frac{\Delta}{H} + 0,369}$ ;  $U_B$  — средний на вертикали вектор продольной скорости;

$H$  — глубина потока,  $\delta$  — толщина придонного слоя;  $\Delta$  — абсолютная величина выступов шероховатости. Допускаемые динамические скорости  $U_{*g}$  для песка, из которого формировались русла, находились также согласно рекомендаций [10]. Образование местных размывов в ходе экспериментов происходило там, где  $U_* > U_{*g}$ , и, следовательно, такой способ оценки деформаций русел может применяться при пересечении водотоков.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Берман Я.Р., Румянцев И.С., Пручкин С.И. Решение задачи пересечения водотоков каналом // Гидравлика и мелиорация. — 1983, № 9. — С. 14–16.
2. Ber man I.R., Rumiantsev I.S. Pruchkin S.I. Methods of hydromechanics to solve the problems of crossing main canals with laterals // XX AHR Congress. Moscow. — 1983. — P. 287–292.
3. Intersecting submerged jet velocity profiles / Maxwell W. Hall C., Snarrason Arni // Eng. Mech. Div. Rroc. Amer. Soc. Civ. Eng. — 1982. — P. 108. — N 5, — P. 975–980.
4. Shligai H., Azam A. On the hydraulic modelling of the Mekong River at Quatre Brash // Rroc. dut. Conf. Water Resour. Eng., Bangkok. Fluvial and Coast. Hydraul, 1978. Vol. 1. — P. 661–683.
5. Platzer B. Berechnung von Druckverlustbeivoerten in rechtvoinkligen Kreugver gungen // Luft — und Källetechn, 1982. — № 4. — P. 219–220.
6. Лятхер В.М., Прудовский А.М. Гидравлическое моделирование. — М., 1984. — 392 с.
7. А. с. № 976382 (СССР). Устройство для измерения скорости течения жидкости // Б.И. № 43.
8. Быков В.Д., Васильев А.В. Гидрометрия. Л., 1977. — 442 с.
9. Структура турбулентного потока и механизм теплообмена в каналах / М.Х.Ибрагимов, В.Н.Субботин, В.П.Бобков, Г.И.Сабелев, Г.С.Таранов. — М. — 1978. — 298 с.
10. Васильченко Г.В. Моделирование размывов несвязных грунтов с применением их заменителей // Водное хоз-во и гидротехнич. стр-во. — Минск. — 1984. — Вып. 14. — С. 49–52.



## ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ РАСЧЕТОВ НЕУСТАНОВИВШЕГОСЯ ДВИЖЕНИЯ ВОДЫ С ПОМОЩЬЮ ПАКЕТА ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММ

Для решения задач, связанных с проектированием и эксплуатацией водохозяйственных систем, управлением водными ресурсами, требуется знание их уровней и расходов. Вычисление последних в системах водотоков, являющихся составной частью водохозяйственных систем, целесообразно выполнять методами математического моделирования, с помощью которых можно получить необходимые параметры, рассчитать объекты любой протяженности и внести изменения в модель. Широкое распространение получили гидродинамические модели, использующие математический аппарат, которые позволяют выполнять расчеты неустановившегося движения воды в сложных системах водотоков различной протяженности. Выполнение гидравлических расчетов вызывает большие трудности, обусловленные сложностью процесса движения воды в водотоках с неправильными формами поперечных сечений, переменной шероховатостью и необходимостью обработки больших объемов исходной информации.

Пакет прикладных программ состоит из ядра и сервисных программ [1]. Программы, входящие в ядро, реализуют последовательность вычислительного процесса, состоящего из создания математической модели объекта (в нашем случае р. Тверцы), расчета неравномерного движения и идентификации параметров движения неустановившегося движения воды. Сервисные программы используются для упорядочения исходной информации, исключения ошибок в ней и подготовки к виду, пригодному для анализа.

При математическом моделировании неустановившегося движения воды в системе водотоков использована система уравнений [1], позволяющая учесть наличие нетранзитных зон в характерных сечениях.

$$\begin{cases} B_0 \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q; \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + 2V \frac{\partial Q}{\partial x} + (C^2 - V^2) B_1 \frac{\partial z}{\partial x} = \Phi, \end{cases} \quad (1)$$

где

$$V = \frac{Q}{w}, \quad C = \sqrt{\frac{gw}{B_1}}, \quad \Phi = [B_1 I_0 + \left(\frac{\partial w}{\partial h}\right)_n] V^2 - \frac{\partial w_1}{K^2} Q |Q|;$$

$Q(x, t)$  — объемный расход;  $z(x, t)$  — ордината поверхности воды;  $w_1(x, t)$  — площадь поперечного сечения транзитного потока;  $h = z(x, t) - z_0(x, t)$  — глубина;  $z_0$  — ордината дна потока;  $B_0$  — ширина поперечного сечения створа, включающая транзитную и нетранзитную части сечения;  $q$  — боковой приток;  $B_1$  — ширина транзитной части;  $I_0$  — уклон дна;  $K(x, z)$  — модуль расхода;  $g$  — ускорение силы тяжести;  $c$  — скорость распространения малых возмущений.

Для решения системы уравнений (1) гиперболического типа используется метод конечных разностей. Дифференциальные уравнения аппроксимируются разностями на шеститочечной неявной схеме с весами слоев и неравномерным шагом по пространству. Полученная система алгебраических уравнений (1) решается методом матричной прогонки. Для ее решения необходимы также начальные и граничные условия. Морфометрические и гидравлические характеристики водотоков вычисляются для различных уровней характерных сечений по специальной программе, входящей в состав пакета прикладных программ.

Для получения начальных условий выполняется расчет неравномерного движения воды в системе водотоков. В результате последнего можно, используя результаты наблюдений за изменением уровней и расходов, идентифицировать некоторые параметры математической модели объекта, в частности коэффициенты шероховатости.

В качестве граничных условий используется гидрологическая информация в виде гидрографов расходов и графиков изменения уровней в крайних гидростворах. В каждом расчетном узле в определенный момент времени определяются расходы, уровни воды и средние скорости.

С целью проверки работы пакета прикладных программ были выполнены расчеты неустановившегося движения воды на р. Тверце при задании всей имеющейся морфометрической, гидравлической и гидрологической информации, оценены погрешности результатов расчета.

Экспериментальные исследования на р. Тверце выполнялись ГГИ на 48-километровом участке, ограниченном в верховом створе плотиной Новотверецкой ГЭС и получающем питание из Вышневолоцкого водохранилища. Верхняя часть экспериментального участка представляет собой искусственный канал, далее следует русло с низкими затопляемыми берегами и широкой (до 400 м) поймой. Нижняя часть экспериментального участка представляет собой беспойменное русло. В границах рассматриваемого участка р. Тверца принимает пять небольших рек и несколько ручьев и каналов. Общий расход всех притоков (около  $0,49 \text{ м}^3/\text{с}$ ) мал по сравнению с величинами попусков, которые колебались в пределах  $20\text{--}120 \text{ м}^3/\text{с}$ . Боковая приточность не могла повлиять на ход неустановившегося движения воды. Однако вследствие необходимости учета аккумулярующей емкости притоков расчеты неустановившегося движения воды велись и по ним.

По участку р. Тверцы имелись исходные данные для 200 характерных поперечных сечений. С целью задания приближенных значений локальных по участкам периметра коэффициентов шероховатости для 200 характерных створов использовалось краткое описание русла и поймы р. Тверцы.

Для наблюдения за водным режимом потока при неустановившемся движении на участке р. Тверцы действовала сеть временных гидрометрических створов и водомерных постов. Всего на участке было размещено 8 гидростворов и 32 водомерных поста. Экспериментальные попуски воды проводились в течение 13 суток (5–17 августа). График попуска предусматривал максимальное разнообразие видов волн. Выбранный участок р. Тверцы по своей протяженности вполне достаточен для того, чтобы в его пределах сглаживались попуски суточного регулирования.

Таким образом, по р. Тверцы имелась достаточно полная исходная инфор-

мация для расчета неустановившегося движения воды.

Порядок расчета был следующим. Вся имеющаяся исходная морфометрическая информация о поперечных сечениях р. Тверцы с помощью сервисной программы, входящей в состав пакета, была распечатана в заданном масштабе, проанализирована, исправлена. Далее по скорректированной информации создавалась математическая модель участка р. Тверцы и ее притоков. Начальные условия задавались путем расчета неравномерного движения на данном участке в момент времени, соответствующий началу попусков. Затем выполнялась идентификация математической модели на момент начала попусков и прохождения максимальных расходов (или уровней). Это позволило учесть изменение гидравлических характеристик русла по времени путем их интерполяции при расчете неустановившегося движения. В результате была получена идентифицированная математическая модель системы водотоков участка р. Тверцы на два момента времени.

На основе гидрологической информации выявлены:

1. Гидрографы  $Q = f(t)$  на левых границах и кривая связи  $Q = f(H)$  на правой границе.

2. Гидрографы распределенной по длине водотоков приточности  $q(t) = f(t)$ . Предварительные расчеты свидетельствуют о необходимости тщательного считывания гидрологической информации. Выполнение расчетов с постоянным шагом по времени приводило к тому, что многие характерные особенности гидрографов (максимумы, минимумы) не совпадали с расчетными моментами времени. Поэтому при расчете неустановившегося движения появлялась необходимость считывать в автоматическом режиме с наперед заданной точностью гидрологическую информацию. Реализация этой возможности осуществлялась с помощью специальной сервисной программы. Продолжительность процесса неустановившегося движения воды при расчетах составляла 4 суток. Время счета этого процесса на вычислительной машине ЕС 1060 составило около одного часа.

Результаты расчетов неустановившегося движения воды выводились на АЦПУ и на магнитный носитель (архив данных). Из архива данных подпрограммами пакета извлекалась следующая информация. В табличном виде распечатывались гидрографы расходов, графики изменения уровней во времени для различных водпостов и гидростворов. В табличном виде выводились огибающие максимальных уровней и расходов, а также время наступления этих характеристик. Для примера (рис. 1—3) приведены опытные и расчетные кривые изменения уровней по двум водпостам. На рис. 2 приведены совмещенные кривые изменения уровней и расходов по гидроствору. Анализ расчетов показал, что вычисленные уровни и расходы по фазе хорошо согласуются с опытными, однако по величине они несколько отличаются от опытных.

Для получения численных характеристик отклонений расчетных величин от опытных сделана их выборка. Из рис. 1—3 видно, что в точках максимумов отклонения достигают наибольших величин. Следует отметить, что характеристики отклонений максимальных расчетных уровней и расходов от опытных являются наиболее важными для проектирования.

Сделанная выборка была обработана статистическими методами [2]. Средняя погрешность максимальных уровней составляла 0,14 м, а с надеж-

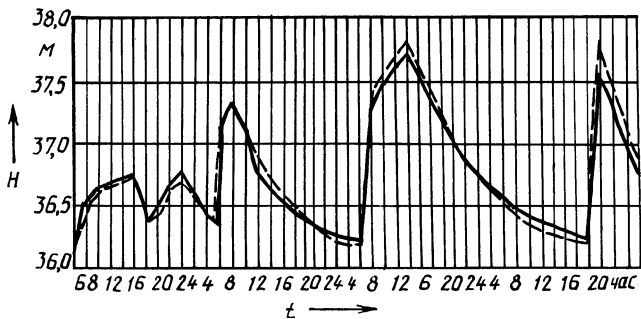


Рис. 1. Графики колебаний уровней воды у водпоста № 8:  
 — наблюдаемые уровни; - - - - - расчетные уровни

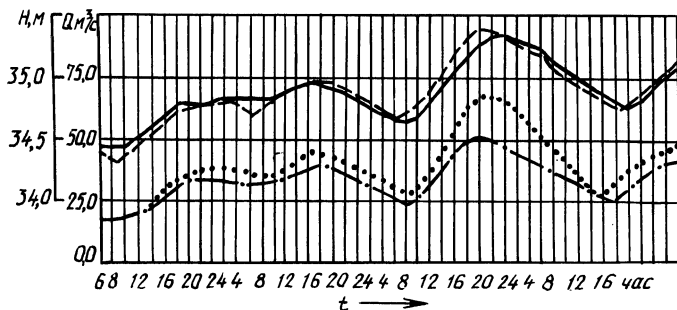


Рис. 2. Совмещенные графики колебаний уровней и расходов воды в гидростворе № 5:  
 — наблюдаемые уровни; - - - - - расчетные уровни; - · - · - · - наблюдаемые расходы; · · · · · расчетные расходы

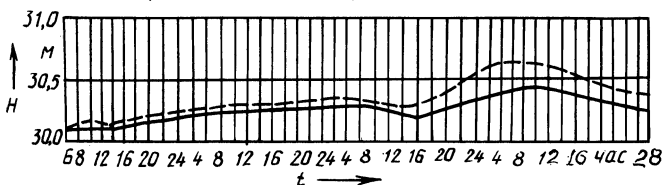


Рис. 3. Графики колебаний уровней воды у водпоста № 31:  
 — наблюдаемые уровни; - - - - - расчетные уровни

ностью 0,95 не превышала 0,18 м; максимальных расходов равна 18 %, а с надежностью 0,95 не превышала 25 %.

Таким образом, предварительные расчеты дают основание считать, что созданный в ЦНИИКИВР пакет прикладных программ приемлем для расчетов неустановившегося движения воды как для существующих, так и для проектируемых объектов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Рогуневич В.П., Войтеховская Э.А., Федорова И.И. Возможность пакета прикладных программ для автоматизации гидравлических расчетов систем водотоков // Гидравлика открытых русел, М., 1984. — С. 19—27. 2. ГОСТ 8.207-76. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. — М., 1981. — С. 1—10.

## МЕТОД РАСЧЕТА НЕУСТАНОВИВШЕГОСЯ ДВИЖЕНИЯ ВОДЫ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ К МАТЕМАТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ПОЛОВОДИЙ

Процесс неустановившегося движения воды описывается следующими уравнениями:

$$-\frac{\partial Z}{\partial s} + \frac{av}{g} \frac{\partial v}{\partial s} + \frac{\alpha_0}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{Q|Q|}{K^2} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial s} + \frac{\partial \omega}{\partial t} = 0, \quad (2)$$

где  $Z$  — отметка уровня свободной поверхности воды;  $v$  — средняя скорость течения;  $\alpha$  — коэффициент Кориолиса;  $\alpha_0$  — коэффициент Буссинеска;  $K$  — модуль расхода;  $Q$  — расход;  $\omega$  — площадь поперечного сечения потока;  $g$  — ускорение свободного падения;  $s$  — продольная координата;  $t$  — время.

В общей постановке задача решения уравнений неустановившегося движения заключается в определении зависимостей  $Z = Z(s, t)$  и  $Q = Q(s, t)$  при задании условий

$$Q(s, 0) = Q(s), \quad 0 \leq s \leq l; \quad (3)$$

$$Z(s, 0) = Z(s), \quad 0 \leq s \leq l; \quad (4)$$

$$Q(0, t) = Q(t), \quad t_0 \leq t \leq T; \quad (5)$$

$$Z(l) = Z(Q) \quad \text{или} \quad Z(l, t) = Z(t). \quad (6)$$

Большинство из известных способов решения системы (1–6) основано на использовании конечно-разностных методов. При этом применяются явные или неявные разностные схемы. Использование явных схем связано с введением чрезвычайно мелких шагов по времени для обеспечения устойчивости решения, что требует больших затрат машинного времени.

Неявные схемы применительно к линейным уравнениям устойчивы при любых шагах по времени. В большинстве случаев для нелинейных и квазилинейных задач вида (1–6) нет доказательств сходимости или хотя бы устойчивости разностных схем. Поэтому прибегают к предварительной линеаризации задачи и на основании анализа выдвигают соображения об устойчивости и сходимости. Однако такой способ не является строго обоснованным и в некоторых случаях может привести к неверным результатам [1].

Нами использован способ, в основе которого лежит разложение сложного процесса неустановившегося движения воды на составляющие его элементы. В соответствии с теорией волновых процессов, параметры потока в заданном створе реки формируются в результате взаимодействия прямой и обратной волн. При этом прямая волна переносит основную часть паводка, которая перемещается под действием силы тяжести со скоростью кинематической волны [2]. Таким образом, можно предположить, что прямая волна пе-

ремещает водные массы по направлению течения, в то время как обратная волна, возникающая в результате действия сил трения и сопротивления, определяет положение свободной поверхности потока. Для расчета расходов использована модель кинематической волны, в состав которой входят уравнение неразрывности (2) и однозначная связь расходов воды и площадей живого сечения

$$Q = Q(\omega, s). \quad (7)$$

Для замыкания система (2), (7) дополняется начальным (3) и граничным (5) условиями. Для численного интегрирования уравнений кинематической волны использован метод конечных разностей. При этом производные в уравнении (2) заменены конечными разностями, составленными по трехточечной разностной схеме бегущего счета:

$$\frac{Q_n^m - Q_{n-1}^m}{\Delta s} + \frac{\omega_n^m - \omega_{n-1}^m}{\Delta t} = 0. \quad (8)$$

Конечно-разностный аналог зависимости (7) принимает вид

$$\frac{Q_{n-1} + Q_n}{2} = f\left(\frac{\omega_{n-1} + \omega_n}{2} \Delta s\right). \quad (9)$$

Разностная схема (бегущего счета) имеет первый порядок аппроксимации, устойчива и надежна в расчете [1]. Хотя формально эта схема считается неявной, фактически при расчете она ведет себя как явная. Значения  $Q_n^m$  в схемах (8) и (9) выражаются через  $Q_{n-1}^m$ ,  $\omega_n^m$  и  $\omega_{n-1}^m$ . Значение решения на нулевом слое  $Q_0^n = Q(S_n)$  известно из начального условия. На следующем (первом) слое  $Q_0^1 = Q(t_1)$  в силу граничного условия вычисляется  $Q_1^1$ . Затем, зная решение на первом слое, точно так же вычисляем его на втором слое ( $Q_1^2$ ) и так для всех слоев первой ячейки. Используя полученные значения  $Q_1^m$  для узлов первой ячейки в качестве граничного условия, находим решение для всех слоев второй ячейки ( $Q_2^m$ ). Так вычисляются расходы во всех узлах разностной сетки.

Модель кинематической волны широко применяется при расчетах движения паводков на реках и речных системах в тех случаях, когда кривые расходов можно считать однозначными [3, 4].

Известно, что в связи с изменениями уклона водной поверхности в периоды подъема и спада паводков эта однозначность нарушается, что проявляется в виде паводочных петель на кривых расхода. Показано [5–7], что изменения уклона, вызванные неустановившимся характером движения половодий и паводков на равнинных реках, не превышают 5 %, а максимальная погрешность расчета не превышает 2,5 % [8].

Следовательно, изменение уклона не оказывает существенного влияния на расход, а неоднозначность их кривых в паводковые периоды вызвана колебаниями уровней водной поверхности при неустановившемся характере движения воды.

В связи с этим отметки уровней свободной поверхности предлагается

рассчитывать по (1), (4) и (6), подставляя в (1) расходы, вычисленные по модели кинематической волны.

Разностный аналог уравнения (1), составленный по трехточечному шаблону, имеет вид

$$\frac{Z_n^m - Z_{n-1}^m}{\Delta s} + \frac{1}{2} \left( \frac{Q_n^2}{K_n^2} + \frac{Q_{n-1}^2}{K_{n-1}^2} \right) m + \frac{v_n^m}{g} \frac{v_n^m - v_{n-1}^m}{\Delta s} + \frac{1}{g} \frac{v_n^m - v_n^{m-1}}{\Delta t} = 0. \quad (10)$$

Счет ячеек в этом случае выполняется справа налево. В остальном расчет аналогичен задаче определения расходов.

Полученное приближенное решение уточняется итерациями. При этом уравнения кинематической волны больше не используются, что соответствует отказу от допущения однозначности кривых расхода. Уточнение расходов осуществляют по уравнению неразрывности, используя вычисленные на предыдущем шаге значения уровней и соответствующие им объемы воды. Найденные расходы вновь подставляются в уравнение Сен-Венана для расчета уровней.

Осуществляя расчеты половодий для конкретных объектов, выполняют калибровку параметров математической модели по имеющимся наблюдениям за водным режимом. При моделировании половодий на конкретной реке адаптация осуществлялась по гидрологическим условиям ближайшего многоводного 1979 г. Для сопоставления расчетов с натурными измерениями использовались данные гидрометслужбы, а также измеренные в 24 створах по основной реке максимальные уровни весеннего половодья 1979 г. Статистическая обработка отклонений расчетных максимальных уровней от опытных позволила определить стандартное отклонение, которое равно  $\pm 8,56$  см при 5 %-м уровне значимости. Результаты свидетельствуют об удовлетворительной сходимости расчетов с натурными измерениями, что подтверждает допустимость основных положений.

Следует отметить абсолютную устойчивость вычислений как по длине водотока, так и во времени.

После идентификации параметров математическая модель была использована для расчета проектных уровней воды в условиях обвалования дамбами затопляемых и незатопляемых полейдеров.

Рассматривалось несколько проектных вариантов размещения полейдеров. Во всех случаях зона меандрирования полностью оставалась в междамбовом пространстве, ширина которого назначалась в соответствии с шириной водоохранной зоны, рекомендуемых нормативными документами для малых рек на территории БССР. Вначале был рассмотрен вариант двустороннего обвалования русла реки и устьевых участков ее притоков дамбами незатопляемых полейдеров при ширине междамбовой полосы 150–1200 м. При этом варианте происходит подъем максимальных уровней по сравнению с существующими условиями до 1,5 м, что вызывает подтопление ряда мелиоративных объектов, расположенных в водосборах притоков.

В связи с этим было рассмотрено еще 4 варианта, где предусматривалось

устройство незатопляемых польдеров в сочетании с затопляемыми, размещаемыми между незатопляемыми дамбами при расстоянии 210—1600 м. Узкие участки поймы ограждали только затопляемыми дамбами, а участки, ширина которых равна водоохранной полосе, не ограждали.

В результате анализа результатов моделирования очередного варианта осуществлялась корректировка положения дамб в районах населенных пунктов, мостов и других участков, где подъем уровней оказывался недопустимым и намечался следующий вариант. Такая последовательность позволила установить наиболее приемлемое инженерное решение. Размещение в пойме реки затопляемых польдеров влияет на режим половодного стока. На фазе подъема половодья, пока уровень воды находится ниже отметок гребня, польдер представляет собой аккумулирующую емкость, затопляемую водой через специальные устройства. При этом часть общего потока задерживается и исключается из дальнейшего течения. Для остальной части польдер представляет собой препятствие, уменьшающее поперечное сечение поймы.

В связи с этим при расчете расходов этого периода в уравнения (8) и (9) включается полное сечение поймы, а при вычислении уровней по (10) часть сечения, занимаемая польдером, исключается из расчета.

Аналогично выполняются расчеты на спаде половодья, когда уровень воды опускается ниже гребня дамбы. В отличие от фазы подъема польдер в этот период возвращает в общее течение накопленную ранее часть объема стока, что учитывается при расчете расходов.

В те периоды, когда уровень воды превышает отметки гребня, характер течения изменяется. Теперь весь поток условно делится на две части, одна из которых протекает мимо, а другая — через затопленный водой польдер. При этом возникает необходимость учета местных сопротивлений, создаваемых поперечными дамбами польдера. При наличии одной поперечной дамбы подпор ( $\Delta h$ ) может быть определен из формулы для затопленного водослива с широким порогом

$$\Delta h = \frac{Q_n^2}{2g\varphi^2 b^2 h_n^2},$$

где  $Q_n$  — расход части потока воды, текущей через затопляемый польдер,  $\varphi$  — коэффициент скорости,  $b$  — ширина водосливного фронта,  $h_n$  — глубина подтопления.

Для  $m$  поперечных дамб местные потери напора

$$\Delta Z_{\text{мест}} = \frac{Q_n^2}{2g} \sum_{i=1}^m \frac{1}{\varphi_i^2 b_i^2 h_{ni}^2} \quad (11)$$

Потери напора по длине польдера выражаются формулой

$$\Delta Z_{\text{дл}} = \frac{Q_n^2}{K_n^2} l_n, \quad (12)$$

где  $l_n$  — расчетная длина польдера,  $\bar{K}_n$  — средний модуль расхода на участке затопляемого польдера.



Суммируя (11) и (12), получаем расчетную формулу

$$\Delta Z_{\text{п}} = \Delta Z_{\text{мест}} + \Delta Z_{\text{дл}} = Q_{\text{п}}^2 \left( \frac{i_{\text{п}}}{K_{\text{п}}^2} + \frac{1}{2g} \sum_{i=1}^m \frac{1}{\varphi_i^2 b_i^2 h_{\text{п}i}^2} \right). \quad (13)$$

При расчетах уровней формула (13) используется совместно с уравнением (10) при соблюдении условий

$$Q = Q_{\text{п}} + Q_{\text{м}}, \Delta Z = \Delta Z_{\text{п}} = \Delta Z_{\text{м}}, \quad (14)$$

где  $Q_{\text{м}}$  — расход части потока воды, текущей мимо польдера;  $\Delta Z_{\text{м}}$  — потери напора этой части потока, определяемые из (10).

Выполненные исследования свидетельствуют о том, что разработанный метод может успешно применяться для расчетов водного режима в сложных русловых системах с поймами при расположении на них затопляемых польдеров. Математическое моделирование половодий на реке показало, что использование затопляемых польдеров является эффективным средством регулирования уровня режима весенних половодий. Опыт практического использования разработанного метода расчета подтвердил его достоверность, устойчивость и высокую экономичность.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. К а л и т к и н Н.Н. Численные методы. — М., 1978. — 512 с.
2. С т о к е р Д.Д. Волны на воде. — М., 1959. — С. 613.
3. Г р у ш е в с к и й М.С. Неустановившееся движение воды в реках и каналах. — Л., 1982. — 288 с.
4. К у ч м е н т Л.С. Модели процессов формирования речного стока. — Л., 1980. — 143 с.
5. З н а м е н с к и й В.А. О возможности применения формулы Шези к расчетам паводков на реках // Метеорология и гидрология. — 1961. — № 6. — С. 7–9.
6. С к о р о д у м о в Д.Е. Вопросы гидравлики пойменных русел в связи с задачами построения и экстраполяции кривых расходов воды // Тр. ГГИ, 1965. Вып. 128. — С. 3–96.
7. Б а р ы ш н и к о в И.Б. Речные поймы. — Л., 1978. — 152 с.
8. Х а в и ч В.А. Допустимые пределы упрощения динамического уравнения неустановившегося движения воды в реках при математическом моделировании // Вопросы гидравлики и инженерной гидрологии. — М., 1983. — С. 113–119.

УДК 627.83:532.533

П.М.БОГОСЛАВЧИК (БПИ)

### ИССЛЕДОВАНИЕ КРИВЫХ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА МОДЕЛЯХ ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН ПРИ ИХ РАЗМЫВЕ ПЕРЕЛИВОМ

Положение кривой свободной поверхности неравномерного потока в общем случае определяется следующим уравнением:

$$\frac{dh}{dx} = - \frac{i - \frac{Q^2}{\omega^2 C^2 R}}{1 - \frac{\alpha Q^2}{g} \frac{B}{\omega^3}}$$

где  $h$  — глубина потока;  $x$  — продольная координата;  $i$  — уклон дна;  $Q$  — расход воды;  $R$  — гидравлический радиус;  $B$  — ширина потока;  $a$  — коэффициент Кориолиса;  $g$  — ускорение свободного падения.

При решении этого уравнения для потока на гребне водослива, в том числе и размываемого, где глубина равна критической  $dh/dx = \infty$ , т.е. касательная к кривой свободной поверхности вертикальная, что противоречит опыту. Таким образом, если исходить с позиций плавноизменяющегося движения, то переход через линию критических глубин становится непонятным [1, 2].

Ранее [3], исходя из гипотезы о линейной зависимости градиентов гидромеханического давления и гравитационной составляющей от продольной координаты, для зон водопада предложено следующее уравнение:

$$g \frac{dz}{dx} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = Kx, \tag{1}$$

где  $z$  — падение свободной поверхности, отсчитываемое от начального уровня в створе, с момента ее резкого падения;  $x$  — продольная координата;  $K$  — константа, имеющая размерность  $[\frac{1}{T^2}]$ ;  $p$  — давление на свободной поверхности. При  $p = \text{const}$  выражение (1) приводится к виду

$$\frac{dz}{dx} = -K \frac{x}{g}. \tag{2}$$

Приведенная зависимость использовалась при исследовании истечения через водосливы [3], а также при построении кривых свободной поверхности в околоскритической зоне в жестких и размываемых руслах [4, 5]. Рассмотрим ее применительно к условиям размыва грунтовых плотин для плоской задачи. В соответствии с [3] кривая свободной поверхности (рис. 1) в рассматриваемом случае имеет две ветви: первая — от начала резкого падения перед водосливом  $O$  до точки перегиба  $O_n$ , вторая — от точки перегиба  $O_n$  до сжатого сечения в нижнем бьефе  $O_1$ . Величина  $dz/dx$  сначала увеличивается, достигая максимума в точке перегиба, затем уменьшается до нуля к сжатому

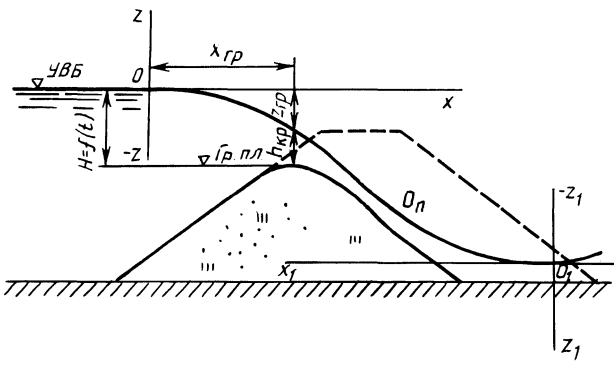


Рис. 1. Схема кривой свободной поверхности при размыве грунтовой плотины переливом

сечению. Из уравнения (2) получаем координаты свободной поверхности верхней ветви

$$z = K \frac{x^2}{2g}.$$

С целью проверки (2) применительно к размывам грунтовых плотин при переливе проведены лабораторные исследования по методике [6]. Модели плотин отсыпались в лотке шириной 0,1 и 0,32 м. Размеры моделей следующие: высота 0,4 м, ширина по гребню 0,2–0,4 м, заложение откосов 1:1,5–1:3,0. Проведено 4 серии опытов. В первой серии модели отсыпались из грунта крупностью 0,25...0,5 мм, во второй – 0,1...1,0 мм, в третьей – 0,5...1,0 мм, в четвертой – 1...2 мм.

Процесс размыва фотографировался с помощью фотосъемки с расстояния 2,5 м через небольшие интервалы времени. Для каждого опыта получено до 10–15 мгновенных профилей плотины с кривой свободной поверхности. Фотосъемка велась через стеклянную стенку лотка, на которой была нанесена масштабная сетка. Изображение с полученных негативов проецировалось на экран и переносилось с исправлением искажения масштабов разноудаленных от объектива объектов. На экране получались профили свободной поверхности потока и очертания размываемого массива грунта в каждый фиксированный момент времени в масштабе 1:5. На полученные профили наносилась ось  $Ox$ , как показано на рис. 1, и для участка кривой  $OO_n$  при различных значениях абсциссы  $x$  измерялась ордината  $z$ . Величина коэффициента  $K$  определялась затем для ряда точек кривой  $OO_n$  по формуле

$$K = \frac{2gz}{x^2}. \quad (3)$$

Начало координат  $O$  подбиралось для каждого профиля последовательным приближением таким образом, чтобы для всех координат кривой  $OO_n$  величина  $K$ , подсчитанная по формуле (3), принимала одинаковые значения. В опытах во все фиксированные моменты времени такое положение начала координат найдено. Это означает, что в любой момент размыва на кривой свободной поверхности имеется точка, начиная с которой уклон свободной поверхности изменяется по линейному закону.

Результаты опытов указывают на то, что параметр  $K$  зависит от напора на гребне размываемой плотины  $H$ , причем зависимость эта хорошо аппроксимируется обратной формулой

$$K = \frac{a}{H}. \quad (4)$$

Результаты исследований обработаны методом наименьших квадратов с целью определения параметра  $a$  в уравнении (4). Получены следующие значения: серия 1 –  $a = 16,78$  дм/с; серия 2 –  $a = 21,96$  дм/с; серия 3 –  $a = 13,25$  дм/с; серия 4 –  $a = 12,78$  дм/с. Таким образом, с увеличением крупности частиц размываемого грунта величина  $a$  уменьшается. На рис. 2 показаны графики  $K = f(H)$  для всех четырех исследованных типов грунтов. Коэффициенты корреляции  $r$ , подсчитанные для четырех кривых, показывают высокую сходимость с опытными данными (рис. 2).

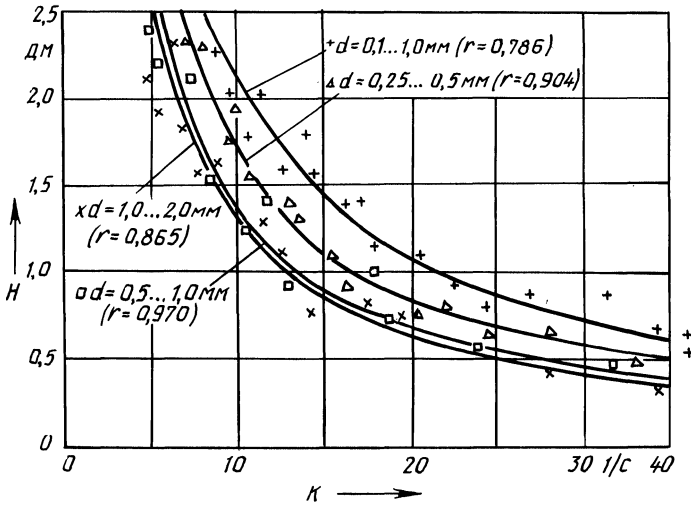


Рис. 2. Графики зависимости параметра  $K$  от напора на гребне

Рассмотрим положение точки  $O$  (рис. 1) относительно гребня размываемой плотины. Обозначим через  $x_{гр}$  расстояние от точки  $O$  до сечения на гребне. Относительная величина этого расстояния  $\epsilon = x_{гр}/H$ . Численные значения  $\epsilon$  для каждого фиксированного момента времени во всех опытах изменялись в сравнительно небольших пределах. Установлено, что с увеличением крупности частиц грунта  $\epsilon$  изменяется: серия 1 —  $\epsilon = 1,3...2,0$ ; серия 2 —  $\epsilon = 1,2...1,7$ ; серия 3 —  $\epsilon = 1,8...2,5$ ; серия 4 —  $\epsilon = 2,0...2,8$ .

Ранее [6] получены уравнения, описывающие процесс размыва грунтовых плотин в условиях плоской задачи, для решения которых необходимо знать положение кривой свободной поверхности на гребне в сечении с продольной координатой  $x = x_{гр} = \epsilon H$ . Из (2) и (4)

$$\frac{dz}{dx} = -\frac{a}{gH} \epsilon H = -\frac{\epsilon a}{g}. \quad (5)$$

Падение свободной поверхности в сечении на гребне

$$z_{гр} = H - h_{кр},$$

где критическая глубина, согласно (5),

$$h_{кр} = 1,26m^{2/3}H.$$

С учетом этого из уравнения (3)

$$K = \frac{2gz_{гр}}{x_{гр}^2} = \frac{2g(1 - 1,26m^{2/3})H}{\epsilon^2 H}. \quad (6)$$

Сравнивая (4) и (6), имеем:

$$a = \frac{1 - 1,26m^{2/3}}{\epsilon^2},$$

где  $m$  — коэффициент расхода.

Проведенные исследования подтверждают справедливость гипотезы о линейном изменении уклонов свободной поверхности потока для случая размыва однородных плотин из песчаных грунтов, что вносит гидравлическую определенность и позволяет получить однозначные решения полученных ранее уравнений [6].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Чертоусов М.Д. Гидравлика. Специальный курс. — М. — Л., 1962. — 630 с.
2. Чугаев Р.Р. Гидравлика. Л., 1982. — 672 с.
3. Ляпин А.Н. О построении кривых свободной поверхности на участках водопада // Гидротехн. стр-во, 1975. — № 11. — С. 22...
24. 4. Ляпин А.Н. Приближенное построение некоторых кривых свободной поверхности неплавно изменяющихся течений // Тр. ГГИ. Л., 1966. — Вып. 136. — С. 18..22.
5. Серопян К.Г. Результаты исследований размыва моделей дамб из несвязных грунтов в условиях плоской задачи // Водозаборные и водопропускные сооружения. Тр. ин-та ВОДГЕО. М. — С. 88..98.
6. Богославчик П.М., Филиппович И.В. К расчету размыва однородной плотины из песчаных грунтов при переливе воды через гребень // Известия вузов СССР. — 1983. — № 2. — С. 100...105.

УДК 626.823

С.П.ГАТИЛЛО (БПИ)

### РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЙ ПО ДНУ СБОРНОГО ТРУБЧАТОГО СООРУЖЕНИЯ

При изучении гидравлических характеристик трубчатых водопропускных сооружений определенный интерес представляет рассмотрение закономерностей распределения давлений в потоке, протекающем через сооружение.

Результаты исследований распределения давлений по дну и стенкам трубчатых сооружений различного поперечного сечения (в основном прямоугольного и круглого) и пульсаций давления изложены в [1–3].

При изучении пропускной способности трубчатых сооружений полукруглого и треугольного поперечных сечений [4] по оси их дна были установлены пьезометры. Опыты проводились в лотке шириной 1 м. В нем был смоделирован участок канала с заложением откосов  $m = 1,5$ .

Модель треугольной трубы изготовлена из оргстекла шириной по дну в свету  $b_{\text{п}} = 10$  см, высотой  $a = 8,1$  см, длиной  $l_{\text{тр}} = 70$  см.

Отверстия пьезометров находились в дне трубы. Они позволяли фиксировать гидродинамическое давление у дна  $p/\gamma \cdot \gamma$ .

При использовании сборных трубчатых сооружений на мелиоративных системах особое значение имеет наличие большого числа стыков в соо-

ружении, при нарушении целостности которых возможно проникновение воды в трубу или из нее. Поэтому установление величины и направления силы давления воды, действующей в стыках в момент их раскрытия, даст возможность определить характер деформации грунта в непосредственной близости от стыков и оценить фильтрационную устойчивость сооружения. Необходимо учитывать также давление фильтрационного потока вне трубы, образующегося в насыпи от напора на сооружение.

Таким образом, для решения поставленной задачи целесообразно оценить взаимодействие обоих потоков и выявить места, в которых опасно размещать стыки.

На рис. 1 показано распределение давлений  $p/\gamma \cdot \gamma$  по всем пьезометрам 1—8 по оси трубы в зависимости от глубины воды перед трубой  $H$  (выходное сечение трубы не подтапливалось).

По показаниям пьезометров можно установить изменение видов движения потока в трубе. При увеличении глубины воды ( $H$ ) перед трубой (0—0,8)  $a$ , т.е. при безнапорном движении, показания всех пьезометров равномерно возрастают, но с разной интенсивностью. При  $H > 0,8a$  начинается изменение эпюр давления, вызванное появлением и передвижением к выходному сечению гидравлического прыжка. Движение по-прежнему безнапорное. При  $H = 1,12a$  величина  $p/\gamma$  достигает максимума во всех сечениях при безнапорном движении, затем при  $H$ , равном  $1,12a—1,22a$  завершается переход к полунпорному движению (вход в трубу затоплен, по всей ее длине — свободная поверхность потока), который характеризуется падением давления, особенно резким в средней части трубы. Во входной части (пьезометры 1 и 2) и в выходной (пьезометры 7 и 8) давление незначительно возрастает.

После установления полунпорного движения давление во всех сечениях стабилизируется. Резкое увеличение давления фиксируется только на входе

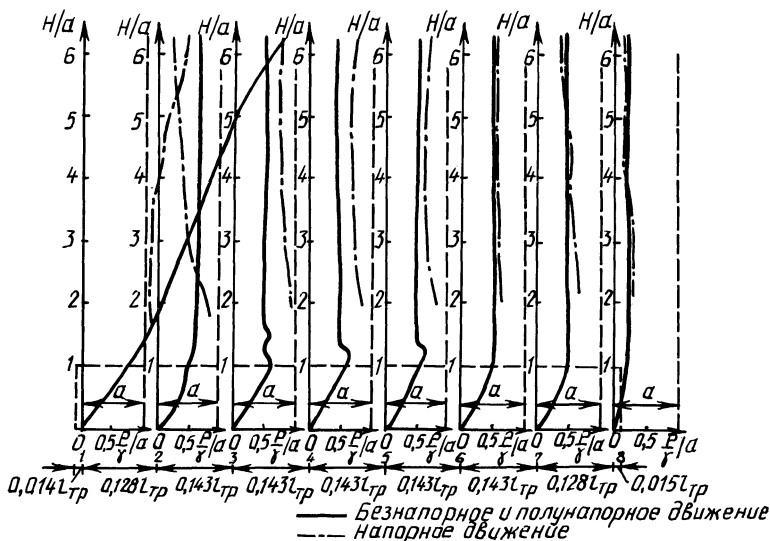


Рис. 1. Распределение давлений по оси дна трубчатого сооружения

(пьезометр 1 и в меньшей степени — 2), а в остальных сечениях его можно принять постоянным.

Распределение давлений при напорном движении значительно отличается.

В треугольной трубе самопроизвольного (без влияния воды нижнего бьефа) перехода к напорному движению не происходит. Последнее наблюдается в результате кратковременного подтопления. Диапазоны существования различных видов движения в треугольной трубе указаны в [4]. При изучении распределения давлений они подтвердились. Кроме того, были выявлены новые переходные области. Переход к напорному движению, как видно из рис. 1, может происходить при уровне воды в ВБ  $H > 1,56 a$ . При этом происходит резкое повышение давлений, что отмечено во всех рассматриваемых сечениях, кроме сечения на входе (пьезометр 1). Труба работает всем сечением не на всей своей длине — на выходе происходит отделение струи от потолка. При увеличении  $H$  длина отделения струи уменьшается и соответственно уменьшается давление во всех сечениях, исключая первое (пьезометр 1), где вначале оно остается постоянным, а затем начинает расти, но гораздо медленнее, чем при полунапорном движении. Самое значительное понижение давления происходит в сечении 2, где оно, как и в сечении 1, становится ниже давления при таком же значении  $H$  и полунапорном движении.

При  $H = 4,2a$  давление достигает своей наименьшей величины в сечениях 3–8, причем в пьезометрах 6–8 равно значению  $p/\gamma \cdot \gamma$  для полунапорного движения. При этом труба начинает работать полным сечением по всей длине.

При  $H > 4,2a$  давление в сечениях 3–6 незначительно растет, а в сечениях 7 и 8 — остается постоянным и совпадает с давлением  $p/\gamma \cdot \gamma$  при полунапорном движении. В сечении 1 давление по-прежнему возрастает, а в сечении 2 — уменьшается.

Самое высокое давление наблюдалось при переходе к работе полным сечением. Значения  $p/\gamma$  нигде, кроме входного сечения, не превышают высоты трубы и никогда не бывают отрицательными.

Теперь рассмотрим, какое давление будет оказывать на дно сооружения фильтрационный поток. Трубчатые сооружения на мелиоративных системах, как правило, имеют длину, превышающую их ширину, поэтому используем рекомендации по расчету фильтрации под сооружениями в пространственных условиях [5]. Так как у нас  $\varphi = b_n/l_0 = 0,143 < 2,5$ , то сооружение работает в пространственных условиях фильтрации. Здесь  $b_n$  — ширина водопропускного отверстия сооружения в свету,  $l_0$  — длина подземного контура,  $\varphi = 2,5$  — критерий пространственности.

Если провести гидротехнический расчет подземного контура сооружения, пользуясь рекомендациями [5], и привести результаты к размерам модели, то в местах установки пьезометров (сечения 1–8) давление на дно будет равно:  $P_1 = 0,92\gamma H$ ;  $P_2 = 0,71\gamma H$ ;  $P_3 = 0,641\gamma H$ ;  $P_4 = 0,582\gamma H$ ;  $P_5 = 0,524\gamma H$ ;  $P_6 = 0,465\gamma H$ ;  $P_7 = 0,40\gamma H$ ;  $P_8 = 0,09\gamma H$ .

Здесь  $H$  — напор на сооружение, то есть разность уровней воды в верхнем и нижнем бьефах сооружения (в условиях опыта в нижнем бьефе уровень воды был равен 0).

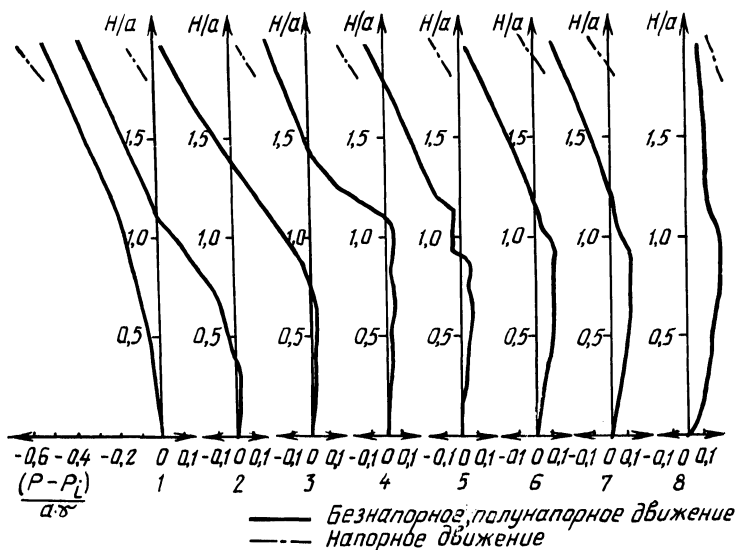


Рис. 2. Распределение результирующей силы гидродинамического и фильтрационного давлений в стыках сборного трубчатого сооружения

Если стыки сооружения открыты, то поток внутри трубы и фильтрационный будут сообщаться, так как они направлены навстречу друг другу. Поэтому сложение сил давлений в каждой точке стыка даст величину и направление силы суммарного давления (рис. 2) в момент раскрытия стыков.

На входном участке трубы (пьезометры 1 и 2) сила давления воды практически всегда будет направлена внутрь трубы (на рис. 2 — отрицательная), причем при полунапорном движении она будет меньше, чем при напорном.

В сечениях 3—6 при безнапорном движении сила давления в стыках приближается к нулю (но все же она есть, направленная наружу с величиной порядка  $(0,01-0,08) a$ ).

В момент перехода к полунапорному движению в трубе (в сечении 3 — раньше) суммарная сила давления становится равной нулю, а в дальнейшем резко увеличивается внутрь. При напорном движении сила давления также направлена внутрь, причем она наименьшая в момент перехода к напорному движению.

На выходном участке (сечения 7 и 8) при безнапорном движении сила давления на стыке направлена наружу (поток поступает из трубы). Она может достигать значений порядка  $(0,1-0,15) a$ . При полунапорном и напорном движениях сила давления всегда направлена внутрь трубы (исключая сечение 8, где противодействие практически снято). При этом в момент перехода к напорному и полунапорному движениям суммарная сила давления практически равна нулю.

Исходя из рассмотренной картины, можно сказать, что при расчетных напорном и полунапорном видах движения воды в трубе стыки дна работают в условиях знакопостоянной нагрузки, направленной внутрь трубы (особенно это относится к входному участку). Сила давления другого знака воз-



можно лишь при малых напорах (перепадах) и в момент перехода к напорному движению. При этом суммарная сила давления, направленная наружу, возникает в основном на выходном участке и достаточно мала.

При проектировании конструкции стыков необходимо учесть указанное распределение сил давления и подобрать наиболее эффективные решения, учитывающие, что стыки в разных местах по длине трубы будут выполнять разные функции в зависимости от величины и направления потока через стыки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Алтунин В.И. Гидравлические исследования сооружений с гладкими и гофрированными трубами. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1977. — 24 с. 2. Кунцевич Н.М. Гидравлические исследования башенных водосбросов рыбоводных прудов. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Минск, 1970. — 25 с. 3. Обухов А.Г. Работа строительных туннелей с переменным режимом течения. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1984. — 16 с. 4. Гатилло С.П., Филиппович И.В. О целесообразности применения треугольной и полукруглой геометрических форм трубчатых водосбросов // Докл. ВАСХНИЛ. 1981. — № 1. — С. 38—40. 5. Руководство по проектированию и гидротехническому расчету регулирующих мелиоративных сооружений. Минск, 1984. — 96 с.

УДК 627.83:627.421

В.М.ЛАРЬКОВ, канд. техн. наук (БСХА)

### О ГИДРАВЛИКЕ РЕШЕТЧАТЫХ ВОДОСЛИВОВ

Решетчатые (щелевые) конструкции широко применяются в гидротехнических сооружениях в качестве водозаборных, наносо- и сороудерживающих устройств, а также в качестве гасителей энергии потока [1\*, 2].

Гидравлика этих устройств зависит от их конструкции, условий работы, назначения. Задачи расчета могут иметь прямые и обратные решения. Например, для принятой конструкции и заданных размеров решетки необходимо определить: расход, пропускаемый через решетку; свободную поверхность, глубину и скорость транзитного потока в расчетном створе.

В ряде случаев необходимо по заданным параметрам потока подобрать размеры и конструкцию решетки.

В данной работе рассматривается гидравлика решетчатых водосливов с большим уклоном при безнапорной работе камеры и неподтопленном режиме работы со стороны нижнего бьефа.

Рассматривая гидравлическую работу решетки как систему с переменной массой (рис. 1, а) и исходя из условия неразрывности плоского потока, можно записать

$$dq_p + dq_T = 0, \quad (1)$$

где  $q_p$  и  $q_T$  — соответственно часть расхода, протекающая через решетку и проходящая по ней сверху (транзитом).

Поскольку

$$q_p = f(x; t) \text{ и } q_T = f(x; t),$$

\* А. с. СССР № 1019050.

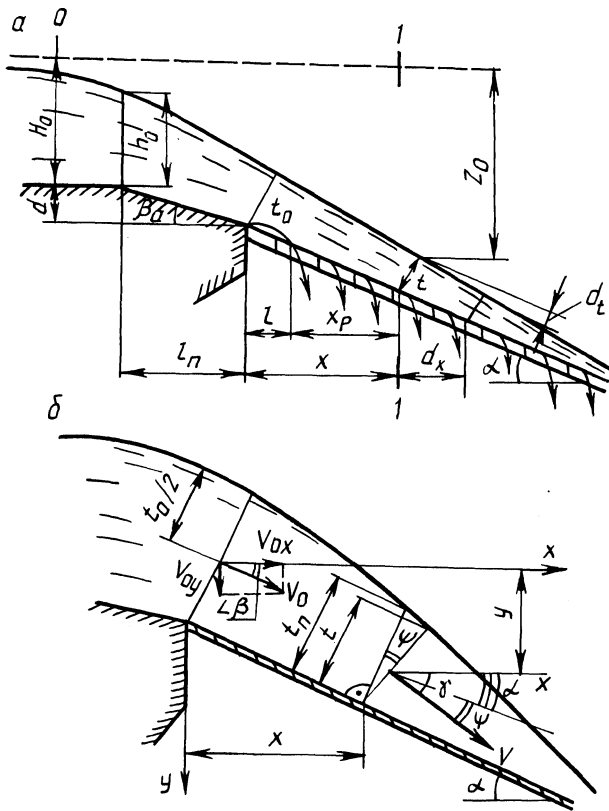


Рис. 1. Гидравлическая модель решетчатых водосливов

где  $t$  — нормальная глубина потока, имеем:

$$dq_T = \frac{\partial q_T}{\partial x} dx + \frac{\partial q_T}{\partial t} dt;$$

$$dq_P = \frac{\partial q_P}{\partial x} dx + \frac{\partial q_P}{\partial t} dt.$$

Подставляя  $dq_T$  и  $dq_P$  в (1), получим

$$\frac{\partial q_T}{\partial x} + \frac{\partial q_P}{\partial x} dx + \frac{\partial q_P}{\partial t} + \frac{\partial q_T}{\partial t} dt = 0$$

или

$$\frac{dt}{dx} = \frac{\frac{\partial q_T}{\partial x} + \frac{\partial q_P}{\partial x}}{\frac{\partial q_T}{\partial t} - \frac{\partial q_P}{\partial t}}.$$

(2)

Для решения (2) определим:

### 1. Транзитный расход

$$q_T = Vt, \quad (3)$$

где  $V$  — средняя скорость потока в расчетном сечении.

Из уравнения Бернулли, записанного для сечений 0—0 и 1—1 (рис. 1)

$$\frac{V^2}{\varphi^2 2g} = z - t \cos \alpha, \quad (4)$$

где

$$V = \varphi \sqrt{2g (H_0 + d + x \operatorname{tg} \alpha - t \cos \alpha)}.$$

Тогда

$$q_T = \varphi \sqrt{2gz}t. \quad (5)$$

Обозначив

$$\lambda_t = \frac{t}{H_0}; \quad \lambda_x = \frac{x}{H_0}; \quad \lambda_d = \frac{d}{H_0}; \quad \lambda_{\alpha} = \frac{t}{H_0} \operatorname{tg} \alpha,$$

$$\lambda_z = 1 + \lambda_d + \lambda_x \operatorname{tg} \alpha - \lambda_t \cos \alpha$$

и произведя замену в (5), получим

$$q_T = \varphi \sqrt{2g} \lambda_t \sqrt{\lambda_z} H_0^{3/2}, \quad (6)$$

где  $\alpha$  — угол наклона плоскости решетки к горизонту.

### 2. Расход через решетку.

В гидравлическом отношении щели, устроенные на водосливе, работают в напорном режиме, для которого справедлива зависимость

$$q_p = \mu \rho \sqrt{2g} \sqrt{P_{\text{ст}} + P_{\text{дин}}} (x - l), \quad (7)$$

где  $\mu$  — коэффициент расхода решетки;  $\rho = \frac{S}{S+d}$  — коэффициент, определяющий площадь живого сечения решетки;  $P_{\text{ст}}$  — гидростатическое давление потока;  $P_{\text{дин}}$  — гидродинамическое давление потока;  $x - l$  — расчетная рабочая длина решетки;  $S$  и  $d$  — соответственно ширина просвета и толщина элемента решетки.

При движении потока по наклонной плоскости

$$P_{\text{ст}} = t \cos \alpha; \quad (8)$$

$$P_{\text{дин}} = \kappa \frac{V^2}{2g} \sin \psi, \quad (9)$$

$$\psi = \gamma - \alpha, \quad (10)$$

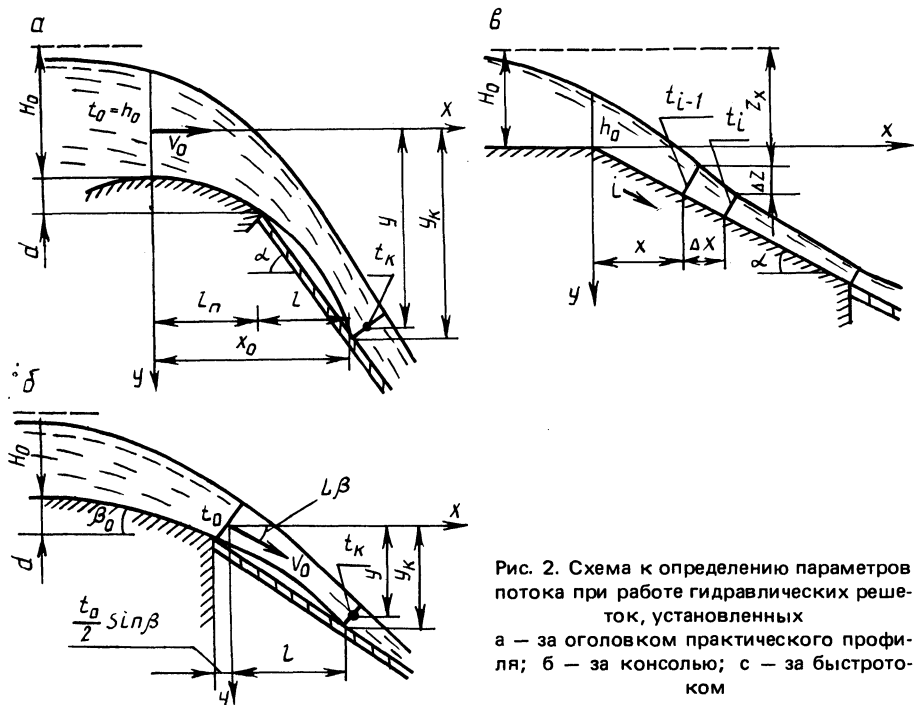


Рис. 2. Схема к определению параметров потока при работе гидравлических решеток, установленных а — за оголовком практического профиля; б — за консолью; с — за быстроходом

где  $\psi$  — угол между вектором скорости и плоскостью решетки (рис. 2);  $V$  — средняя скорость набегания потока;  $\gamma$  — угол между вектором скорости и горизонтом (осью  $X$ );  $k$  — коэффициент динамического давления. С учетом (3–5)

$$P_{\text{дин}} = k \frac{q_T^2}{2gt^2 \cos^2 \psi} \cdot \sin \psi. \quad (11)$$

Решая совместно (7–11) с учетом замен для  $\lambda$ , вместо (7) получим

$$q_p = \mu \rho \sqrt{2gH_0}^{3/2} \sqrt{k \varphi^2 \lambda_z \frac{\text{tg } \psi}{\cos \psi} + \lambda_t \cos \alpha (\lambda_x - \lambda_1)}. \quad (12)$$

### 3. Определение углов $\psi$ и $\gamma$ .

В расчетном сечении значение угла  $\gamma$  можно определить из условия (рис. 1, б)

$$\text{tg } \gamma = \frac{V_y}{V_x}. \quad (13)$$

Здесь

$$V_x = \varphi V_0 \cos \beta; \quad (14)$$

$$V_y = V_0 \sin \beta + \varphi \sqrt{2g \frac{t_0}{2 \cos \beta} + x \operatorname{tg} \alpha - \frac{1}{2} \cos \alpha}, \quad (15)$$

где  $\beta$  — угол между горизонтом и вектором скорости в начальном сечении.  
Решая совместно (13–15), получим

$$\operatorname{tg} \gamma = \operatorname{tg} \beta \frac{1}{\varphi} + \frac{\sqrt{g} \sqrt{(t_0 - t) \cos \alpha + 2x \operatorname{tg} \alpha}}{V_0 \cdot \cos \beta}.$$

В начале решетки средняя скорость

$$V_0 = \frac{q_0}{t_0}.$$

Для водослива

$$q_0 = m_1 \sqrt{2g} H_0^{3/2}, \quad (16)$$

где  $m_1 = m \epsilon \sigma_n$  — приведенный коэффициент расхода. Тогда с учетом (13–16)

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\lambda_{t_0} \sqrt{(\lambda_{t_0} - \lambda_t) \cos \alpha + 2\lambda_x \operatorname{tg} \alpha}}{\sqrt{2} m_1 \cos \beta} + \frac{\operatorname{tg} \beta}{\varphi}.$$

Значение угла  $\psi$  определяется из условия (10).

Нормальная глубина потока в расчетном створе может быть выражена через глубину, измеренную нормально к поверхности решетки (рис. 1, б),

$$t = t_H \cos \psi.$$

4. Решение дифференциальной системы (2).

Рассматривая совместно (2), (6) и (11), имеем:

$$\frac{\partial q_T}{\partial \lambda_x} = \varphi \sqrt{2g} H_0^{3/2} \frac{\lambda_t \operatorname{tg} \alpha}{2\sqrt{\lambda_z}}; \quad (17)$$

$$\frac{\partial q_T}{\partial \lambda_t} = \varphi \sqrt{2g} H_0^{3/2} \left( \sqrt{\lambda_z} - \frac{\lambda_t \cdot \cos \alpha}{2\sqrt{\lambda_z}} \right). \quad (18)$$

Аналогично уравнение (12) в частных производных при  $\alpha = \operatorname{const}$  будет:

$$\frac{\partial q_p}{\partial \lambda_x} = \mu \rho \sqrt{2g} H_0^{3/2} \left[ \sqrt{A} + \frac{k\varphi^2 (\lambda_x - \lambda_p)}{2\sqrt{A}} \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\cos \psi} \right]; \quad (19)$$

$$\frac{\partial q_p}{\partial \lambda_t} = \mu \rho \sqrt{2g} H_0^{3/2} (\lambda_x - \lambda_t) \frac{\cos \alpha - k\varphi^2 \frac{\cos \alpha}{\cos \psi} \left( \operatorname{tg} \psi + \frac{B}{2} \right)}{2\sqrt{A}}. \quad (20)$$

где

$$A = \lambda_t \cos \alpha + k \varphi^2 \lambda_z \frac{\operatorname{tg} \psi}{\cos \psi} ;$$

$$B = \frac{\lambda_{t0}^2 \lambda_z}{2m_1^2} \frac{(1 + \sin^2 \psi) \cos^2 \gamma}{\cos^2 \psi \cos^2 \beta (\operatorname{tg} \gamma - \operatorname{tg} \beta)} . \quad (21)$$

После подстановки выражений (17–18), (21) в уравнение (2) и преобразований получим:

$$\frac{d\lambda_t}{d\lambda_x} = - \frac{\varphi \lambda_t \frac{\operatorname{tg} \alpha}{2\sqrt{\lambda_z}} + \mu \rho \sqrt{A} + \frac{\mu \rho k \varphi^2 (\lambda_x - \lambda_l) \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\cos \psi} (\operatorname{tg} \psi + B)}{2\sqrt{A}}}{\varphi (\sqrt{\lambda_z} - \frac{\lambda_t \cos \alpha}{2\sqrt{\lambda_z}}) + \mu \rho (\lambda_x - \lambda_l) \frac{\cos \alpha - k \varphi^2 \frac{\cos \alpha}{\cos \psi} (\operatorname{tg} \psi + \frac{B}{2})}{2\sqrt{A}}}$$

или

$$\frac{d\lambda_t}{d\lambda_x} = - \frac{\varphi \lambda_t \sqrt{A} \cdot \operatorname{tg} \alpha + 2\mu \rho \sqrt{\lambda_z} A + \operatorname{tg} \alpha (\operatorname{tg} \psi + B) C_1}{\varphi (2\sqrt{\lambda_z} - \lambda_t \cos \alpha) \sqrt{A} + \mu \rho (\lambda_x - \lambda_l) \sqrt{\lambda_z} \cos \alpha - (\operatorname{tg} \psi + \frac{B}{2}) C_1} , \quad (22)$$

$$\text{где } C_1 = \mu \rho k \varphi^2 (\lambda_x - \lambda_l) \sqrt{\lambda_z} \frac{1}{\cos \psi} .$$

Для решения системы (22) необходимо определить также (рис. 1) длину нерабочей части решетки  $l$  (длину отлета струи), глубину потока  $h_0$  в начальном сечении 0–0, толщину струи  $t_0$  в начале решетки, толщину струи  $t_k$  в створе касания струи с решеткой.

Необходимость определения величины  $t_k$  возникает при возможном отрыве струи от сливной грани. При  $l = 0$ ,  $t_k = t_0^k$ .

5. Определение толщины струи на нерабочем участке решетки (свободного падения),

Свободное падение струи наблюдается при отрыве потока от сливной поверхности. Это может быть при работе решетки за водосливом практического профиля, с широким порогом и т.п., если угол наклона решетки больше угла вылета (схода) струи (рис. 2), т.е. когда  $l > 0$ , а угол  $\beta < \alpha$ . На этом участке расход  $q_T = q_0$ ;  $q_D = 0$ .

Для данных условий в любом расчетном створе толщина сплошной струи  $t = q_0 / V$ , а средняя скорость

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} . \quad (23)$$

Вертикальная составляющая вектора скорости (рис. 1)

$$V_y = V_0 \sin \beta + \varphi \cdot \sqrt{2gy} . \quad (24)$$

Для определения ординаты  $y$  воспользуемся следующим уравнением:

$$x = \frac{V_0}{g} \cos\beta (\sqrt{V_0^2 \sin^2\beta + 2gy} \pm V_0 \sin\beta), \quad (25)$$

полученным для описания траектории центральной струйки свободного падающего потока.

При положительном значении угла  $\beta$

$$y = \frac{gx^2}{2V_0^2 \cos^2\beta} + x \operatorname{tg}\beta. \quad (26)$$

Решая совместно (23), (24), (26) и учитывая, что  $V_0 = a_0/t_0$ ;  $t = a_0/V$ ;  $V_x = V_0 \cos\beta$ , имеем:

$$t = \frac{t_0 a_0}{\sqrt{a_0^2 + 2\varphi t_0 \sqrt{P} \operatorname{tg}\beta + P} \frac{\varphi^2 t_0^2}{a_0^2 \cos^2\beta}},$$

где  $P = gt^2 x (gx t_0^2 + a_0^2 \sin 2\alpha)$ .

В безразмерных параметрах

$$\lambda_t = \frac{\lambda_{t_0}}{\sqrt{1 + 2\varphi \operatorname{tg}\beta \sqrt{\lambda_p} + \frac{\varphi^2 \lambda_p}{\cos^2\beta}}}, \quad (27)$$

$$\text{где } \lambda_p = \frac{\lambda_{t_0}^2 \lambda_x^2}{2m_1^2} \left( \frac{\lambda_{t_0}^2}{2m_1^2} + \frac{\sin 2\beta}{\lambda_x} \right).$$

При  $\beta = 0$

$$\lambda_t = \frac{2m_1^2 \lambda_{t_0}}{\sqrt{4m_1^4 + \varphi^2 \lambda_{t_0}^4 \lambda_x^2}}$$

Для случая, когда решетка установлена за водосливом практического профиля (рис. 2, а),  $\lambda_{t_0} = \lambda_{h_0}$ . При этом значение  $\lambda_{h_0}$  будет переменным и зависит от полноты напора на пороге водослива. По экспериментальным исследованиям

$$\lambda_{h_0} = (0,56 - 0,78) H_0.$$

6. Определение глубины при движении потока по сплошной наклонной плоскости (на быстротеке).

Этот случай наблюдается при устройстве решетки в конце длинной консоли или быстротока (рис. 2, б; 2, с).

Используя уравнение неразрывности и уравнение Бернулли, имеем:

$$\frac{q_0^2}{\varphi^2 2gz} = \frac{m^2 H_0^3}{\varphi^2 z},$$

где  $z = H_0 + x \operatorname{tg} \alpha - t \cos \alpha$ .

Обозначим

$$z_x = H_0 + x \operatorname{tg} \alpha,$$

или в безразмерных параметрах

$$\lambda_{zx} = 1 + \lambda_x \operatorname{tg} \alpha.$$

Тогда

$$\lambda_t^3 - \frac{\lambda_{zx}}{\cos \alpha} \lambda_t^2 + \frac{1}{\cos \alpha} \left( \frac{m_1}{\varphi} \right)^2 = 0. \quad (28)$$

Анализ кубического уравнения (28) показывает, что решение имеет физический смысл при

$$\lambda_{zx} > 3 \left( \frac{1}{2} \frac{m_1}{\varphi} \cos \alpha \right)^{2/3}.$$

После соответствующих преобразований (28) получим следующую зависимость:

$$\lambda_t = \frac{\lambda_{zx}}{3 \cos \alpha} \left\{ 1 - 2 \cos \left[ \frac{1}{3} \arccos \left( 1 - \frac{27}{2} \frac{\left( \frac{m_1}{\varphi} \cos \alpha \right)^2}{\lambda_{zx}^3} \right) + \frac{\pi}{3} \right] \right\}, \quad (29)$$

которая справедлива при условии

$$\frac{m_1}{\varphi} < \frac{\lambda_{zx}}{\cos \alpha} \left[ \frac{2}{27} \lambda_{zx} \left\{ 1 - \cos \left[ 3 \arccos \frac{1}{2} \left( \frac{3 \cos \alpha}{\lambda_{zx}} - 1 \right) \right] \right\} \right].$$

Коэффициент скорости

$$\varphi = \frac{V}{\sqrt{2gz_x}}.$$

Коэффициент Шези

$$C = \frac{V}{\sqrt{RI}},$$

откуда при одинаковых  $V$ :

$$\varphi = \frac{C\sqrt{RI}}{\sqrt{2gz_x}} = C\sqrt{\frac{RI}{2gz_x}},$$



или

$$\varphi = C \sqrt{\frac{R}{2g}} \sqrt{\frac{\sin \alpha}{H_0 + x \operatorname{tg} \alpha}} = \sqrt{\frac{C \sin \alpha}{2g}} \sqrt{\frac{\lambda_R}{1 + \lambda_x \operatorname{tg} \alpha}}.$$

Подставляя значения  $\varphi$  в (29), получим

$$\lambda_t = \frac{\lambda_{zx}}{3 \cos \alpha} \left\{ 1 - 2 \cos \left[ \frac{1}{3} \arccos \left( 1 - 27 \frac{g m_1^2 \cos \alpha}{C^2 \lambda_R \lambda_{zx}^2 \operatorname{tg} \alpha} \right) + \frac{\pi}{3} \right] \right\}. \quad (30)$$

7. Определение длины нерабочей части решетки (отлета струи).

Длина нерабочей части решетки (рис. 2) определяется положением решетки и траекторией нижней границы потока. Положение решетки может быть задано начальными координатами и углом наклона, а траектория струи — граничной линией потока, уравнением (25).

Приведем решение поставленной задачи для двух случаев: первый — гидравлическая решетка установлена за водосливом практического профиля (рис. 2, а), второй — решетка установлена за водосливом с широким порогом или консолью (рис. 2, б).

В первом случае начало координат расположено в центре живого сечения, взятом на гребне водослива. Из рис. 2, а

$$y_{\kappa} = y + \frac{t}{2} \cos \alpha, \quad (31)$$

или

$$y_{\kappa} = \frac{h_0}{2} + d + l \operatorname{tg} \alpha. \quad (32)$$

При  $\beta = 0$ ;  $x = x_0 = l + l_n$ ;  $t_0 = h_0$ ;

$$y = \frac{g x_0^2}{2 V_0^2} = \frac{g x_0^2 h_0^2}{2 q_0^2}. \quad (33)$$

Решая совместно (31–33), получим:

$$\frac{g x_0^2}{V_0^2} - 2 x_0 \operatorname{tg} \alpha + 2 l_n \operatorname{tg} \alpha - h_0 - 2d + t \cos \alpha = 0. \quad (34)$$

Обозначив

$b = h_0 + 2d - 2 l_n \operatorname{tg} \alpha - t \cos \alpha$ , уравнение (34) запишем так:

$$x_0^2 - \frac{2 x_0 V_0 \operatorname{tg} \alpha}{g} - \frac{V_0^2}{g} b = 0. \quad (35)$$

Решая (35) относительно  $x_0$ , получим

$$x_0 = \frac{V_0^2}{g} \operatorname{tga} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{gb}{V_0^2 \operatorname{tg}^2 \alpha}} \right),$$

или

$$x_0 = \frac{q_0^2}{gh_0^2} \operatorname{tga} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{gbh_0^2}{q_0^2 \operatorname{tg}^2 \alpha}} \right). \quad (36)$$

В безразмерных параметрах (36) имеем:

$$\lambda_{x_0} = \frac{2m_1^2 \operatorname{tga}}{\lambda_{h_0}^2} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{\lambda_b \lambda_{h_0}^2}{2m_1^2 \operatorname{tg}^2 \alpha}} \right). \quad (37)$$

Выполнив аналогичные решения для второго случая, когда начало координат расположено в центре живого сечения, принятом в конце консоли (рис. 2, б), где  $V_{0x} \neq V_0$ ,  $V_{0y} = V_0$ , получим

$$y_k = y + \frac{t}{2} \operatorname{cosa} = \frac{t_0}{2} + t \operatorname{tga}.$$

В соответствии с (26)

$$y = \frac{g l^2}{2V_0^2 \cos^2 \beta} + t \operatorname{tg} \beta.$$

Тогда

$$\frac{g l^2}{2V_0^2 \cos^2 \beta} + t \operatorname{tga} + \frac{t}{2} \operatorname{cosa} - \frac{t_0}{2} - t \operatorname{tg} \beta = 0,$$

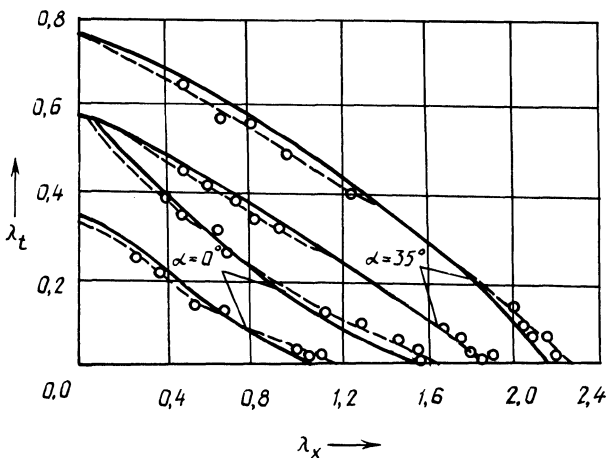


Рис. 3. Графики зависимости  $\lambda_t = f(\lambda_x)$ :  
 - - - теоретическая зависимость; — — — опытные данные

или

$$l^2 + 2l \frac{V_0^2 \cos^2 \beta}{g} (\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta) - \frac{V_0^2 \cos^2 \beta}{g} (t_0 - t \cos \alpha) = 0.$$

Отсюда

$$l = \frac{V_0^2 \cos^2 \beta}{g} (\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta) \left( \sqrt{1 + \frac{g(t_0 - t \cos \alpha)}{V_0^2 \cos^2 \beta (\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta)}} - 1 \right).$$

При выполнении гидравлических расчетов решетчатых водосливов необходимо правильно оценить особенности работы решетки и с учетом этого выбрать начальные условия и способы определения исходных параметров: положение осей координат, начальную глубину потока, длину нерабочей части решетки, ее уклон, конструкцию и т.д. Затем, используя зависимость (27), определить положение свободной поверхности (глубину) транзитного потока. Имея связь  $t = f(x)$  в численном виде, можно определить транзитный расход в расчетном створе  $x_p$ , используя зависимость (12). Расход решетки длиной  $x_p$  составит  $q_p = q_0 - q_T$ .

Учитывая трудоемкость, решение данной гидравлической задачи целесообразно выполнять с использованием ЭВМ. Для облегчения расчетов была разработана программа расчета на ЭВМ ЕС-1020.

На основании полученных расчетных данных составлены графики, удобные для практического использования.

Сопоставление экспериментальных и теоретических данных (рис. 3) указывает на хорошую сходимость. Некоторые отклонения, относящиеся к небольшой глубине транзитного потока (при  $t \leq 1-1,5$  см), можно объяснить нарушением условий автомодельности в результате неучета сил поверхностного натяжения (числа  $W_1$ ).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Л а р ь к о в В.М. Водосливная плотина облегченного типа на р. Быстрая, Горки, БССР. — 1985. — 4 с.
2. Руководство по гидравлическим и русловым расчетам речных гидроузлов. М., 1980. — 12 с.

УДК 532.525.2

И.В.ПОВОРОТНЫЙ, Д.А.ПРОКОПЧУК,  
Д.А.КОЗЛОВ, канд.-ты техн. наук (БПИ)

### ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАСАДКОВ НА РАЗВИТИЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ ЗАТОПЛЕННЫХ СТРУЙ

Биологическое обрастание плавучих морских буровых установок, элементов приливных гидроэлектростанций, корпусов судов ухудшает условия их функционирования. В связи с этим ведутся исследования по разработке и применению наиболее надежных и экономичных способов средств защиты подводных сооружений и конструкций от биологического обрастания.

Цель данной работы: исследование влияния параметров насадков и огра-

ниченности потока на закономерности развития затопленных турбулентных струй.

Для измерения полей скорости и концентрации в изучаемых струйных течениях применялся электрохимический метод. Последний основан на измерении плотности диффузионного тока. Датчики, выполненные в виде электродов-катодов, помещались в изучаемый поток или же монтировались заподлицо в обтекаемую потоком преграду. В качестве электролита использовался раствор ферри-ферроцианида  $K_4Fe(CN)_6$  и  $K_3Fe(CN)_6$ , в котором протекала окислительно-восстановительная реакция. Датчики выполнялись из платины небольших размеров, в то время как другой электрод-анод, выполненный, например, из никеля, имел поверхность, во много раз превышающую площадь датчика-катада, поскольку один из электродов должен быть неполяризован.

Измерения проводились при установлении режима предельного тока (диффузионный режим). По величине предельного диффузионного тока можно судить о величине средней скорости, пульсаций скорости и концентрации электролита (если электролит используется в качестве модельной жидкости, концентрацию которой определяют в потоке) [1, 2].

Электрохимическая методика измерения параметров турбулентных потоков была применена для изучения струйных течений на гидродинамическом стенде (рис. 1). Установка представляет собой гидродинамический лоток 1 с размерами  $l \times b \times h$ , равными 2000 x 1300 x 540 мм, заполненный раствором электролита. При помощи центробежного насоса 3 через ротаметр 4 поток попадает в рабочий участок 5, где он стабилизируется и поступает в исследуемый насадок 6. В проливочном стенде расположена рабочая пластина 8, моделирующая защищаемую поверхность и способная при помощи направляющих 9 изменять свое положение относительно оси исследуемого насадка в интервале  $h^* = 0-200$  мм. Заподлицо с рабочей поверхностью пластины вмонтирована система из 21 электрохимического датчика 10, с помощью которых можно измерять параметры скорости и концентрации в пристенном слое. Кроме этого, на координатнике 11, обеспечивающем перемещение в трех плоскостях, установлен клиновой электрохимический датчик 12, при помощи которого измеряются поля скорости и концентрации исследуемого потока в любой точке гидродинамического стенда.

В случае исследования полей концентрации в гидродинамический стенд заливается чистая вода, а электролит в бак 2, откуда он подает в основной лоток. При исследовании полей скорости гидродинамический лоток работает в циркуляционном режиме. Подача и регулирование расхода жидкости осуществляются при помощи соединительных шлангов 22, 23, 24 и дросселей 13 и 14.

Обработка получаемой при помощи датчиков информации осуществляется двумя способами. Данные, получаемые от датчиков, записанных через сопротивления 16 от источника 15, могут подаваться на приборы измерения и контроля 17 и 18 или же в информационно-измерительную систему (ИИС К 200/1) 19, работающую совместно с перфоратором (ПЛ-1) 20 и осциллографом (С 1-83) 21, а затем выводится для обработки на ЭВМ.

Поскольку в некоторых работах [3] отмечается влияние числа Рейнольдса на характер развития струи при малых числах  $Re$  и наблюдается квазиподобие

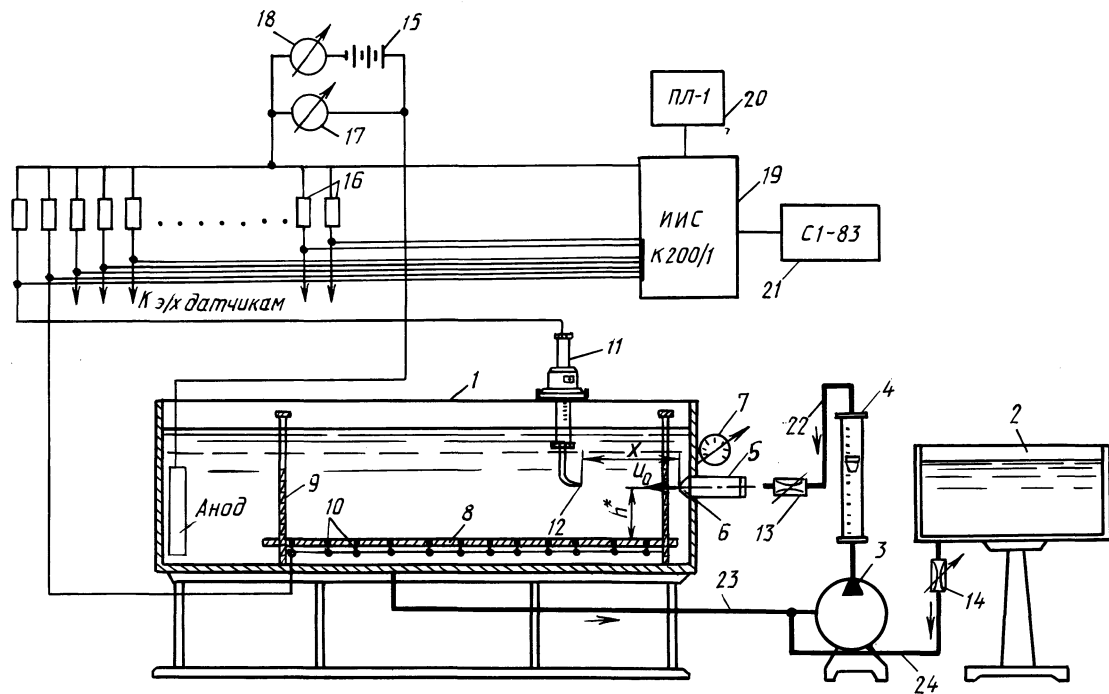


Рис. 1. Схема гидродинамического стенда для исследования струйных течений

при числах  $Re \geq 5 \cdot 10^3$  наши исследования проводились при скоростях истечения струй, соответствующих  $Re = (3,26 - 4,54) \cdot 10^4$  для осесимметричных струй и  $Re = 5,6 \cdot 10^3$  для плоских струй.

На начальном этапе определены гидродинамические характеристики исследуемых насадков.

При помощи дросселя 13 устанавливается фиксированный расход жидкости, контролируемый по ротаметру, при помощи манометра 7 измерялось давление на входе в исследуемый насадок, а шпигенмасштабом измерялась высота столба жидкости над выходным отверстием насадка. Выходная скорость на срезе сопла определялась при помощи э/х датчика 12 и по известным зависимостям, зная расход, скорость и напор, определялись гидравлические коэффициенты расхода  $\mu$ , скорости  $\varphi$ , сопротивления  $\xi$  (табл. 1).

Затем исследовался закон затухания осевой скорости струи и влияние на него формы струеформирующего устройства. На следующем этапе изучалось затухание скорости в свободной и пристенной щелевой струях. Исследовалась плоская струя с числом  $e = d/l = 0,05$ , где  $d$  и  $l$  — высота и длина исследуемой щели (рис. 2).

На рис. 3 представлены результаты исследования законов затухания полуограниченных струй при использовании тех же самых насадков.

Таблица 1

Гидравлические характеристики исследуемых насадков

Тип насадка	$\omega_{с'}^2$ мм <sup>2</sup>	$Q,$ л/с · 10 <sup>-3</sup>	$V,$ м/с	$H,$ м	$Re \cdot 10^3$	$\mu$	$\varphi$	$\xi$
Коноидальный	13,85	135	9,61	4,8	40,5	0,99	0,99	0,14
		230	16,59	14,6	70	0,98	0,98	0,038
Конически сходящийся $n = 7, \alpha = 14^\circ$	15,9	135	8,66	4,1	39	0,947	0,966	0,071
		242	15,53	13,6	70	0,932	0,951	0,106
$n = 11, \alpha = 18^\circ$	22,9	135	6,01	1,9	32,5	0,965	0,985	0,031
		277	12,83	9,3	69,5	0,931	0,95	0,108
$n = 115, \alpha = 38^\circ$	13,2	135	13,53	11,7	55,5	0,675	0,898	0,254
		171	17,15	18,3	70,5	0,685	0,905	0,221
Цилиндрический	14,52	135	9,3	5,65	40	0,883	0,883	0,283
		218	13,99	13,3	60	0,866	0,866	0,16
Отверстие в тонкой стенке	13,2	135	15,96	14,5	65,5	0,606	0,946	0,112
		159	18,83	19,6	77	0,614	0,96	0,084
Полуцилиндрический	27,7	135	4,87	1,7	20	0,844	0,844	0,404
		277	10,01	7,2	42	0,841	0,841	0,414

П р и м е ч а н и е.  $n$  — коэффициент поджатия насадка,  $\alpha$  — угол конусности.

Рис. 2. Затухание осевой скорости в свободных затопленных струях. Щелевые сопла: 1 — данные [3]; 2 — данные [6], щель  $e = 0,06$ ; 3 — щель  $e = 0,05$ ,  
 Насадки:  
 4 — цилиндрический, данные [9]; 5 — коноидальный; 6 — конически сходящиеся; 7 —  $n = 7$ ,  $\alpha = 14^\circ$ ; 8 —  $n = 11$ ,  $\alpha = 18^\circ$ ; 9 —  $n = 115$ ,  $\alpha = 38^\circ$ ; 10 — цилиндрический; 11 — отверстие в тонкой стенке; 12 — полуцилиндрический

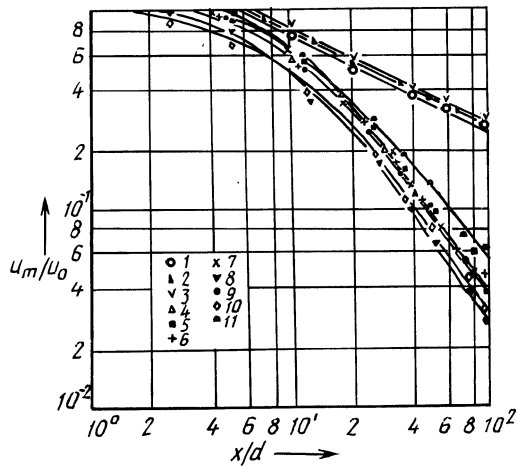
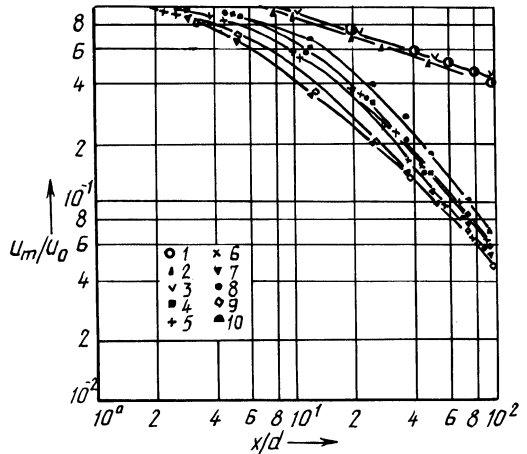


Рис. 3. Затухание осевой скорости в полуограниченных затопленных струях. Щелевые сопла: 1 — данные [7]; 2 — данные [8]; 3 — щель ( $e = 0,05$ ).  
 Насадки:  
 4 — коноидальный; 5 — конически сходящиеся; 6 —  $n = 7$ ,  $\alpha = 14^\circ$ ; 7 —  $n = 11$ ,  $\alpha = 18^\circ$ ; 8 —  $n = 115$ ;  $\alpha = 38^\circ$ ; 9 — цилиндрический; 10 — отверстие в тонкой стенке; 11 — полуцилиндрический



Хорошее согласование полученных данных по щелевым струям с данными других авторов [3–5] дает возможность судить о надежности полученных экспериментальных данных и работоспособности применяемого метода измерений.

На рис. 2 и 3 результаты исследований представлены в относительных координатах  $u_m/u_0 = f(x/d)$ , где  $u_0$  — скорость по оси струи в выходном сечении;  $u_m$  — скорость на оси струи в фиксированной точке;  $x$  — расстояние от среза сопла до точки, в которой производится измерение;  $d$  — характерный размер струеформирующего устройства, для насадка — диаметр, для щелевого сопла — высота щели.

Установлено, что темп затухания относительной осевой скорости в плоских струях оказывается значительно ниже, чем в осесимметричных. Несмотря на это, они не нашли широкого применения при разработке струйных систем защиты от обрастания. Это объясняется повышенным расходом реагента по

сравнению с осесимметричными струями, и поэтому основное внимание исследований было уделено изучению закономерностей развития осесимметричных струй.

Влияние формы струеформирующего насадка на потенциальное ядро имеет место как в случае свободных, так и полуограниченных струй. Это наблюдается в переходной зоне струи, прекращаясь лишь на основном участке, где темп затухания относительной скорости оказывается одинаковым для круглых струй. Для полуограниченных струй это влияние более выражено и сохраняется на удалении от среза насадка порядка 40–50 калибров. В случае свободных струй это ощущается на расстоянии порядка 20–30 калибров.

Форма насадка оказывает влияние на величину начального участка. Наименьшим начальным участком обладают струи, вытекающие из отверстия в тонкой стенке и из насадков с большими углами конусности, что определяется эффектами сжатия струи, присущими данным типа струеформирующих устройств. Таким образом, конструкция применяемого насадка оказывает влияние на процесс развития и распространения как свободной, так и полуограниченной турбулентной осесимметричной струи на участке до 50 калибров. С увеличением расстояния от среза сопла сверх 50 калибров темп затухания относительной скорости  $u_m/u_0$  в струях оказывается одинаковым и независимым от конструкции применяемого насадка, определяясь лишь видом истечения — свободная или пристенная струя.

Исходя из приведенных на рис. 2 и 3 данных можно отметить, что выявлено влияние параметров насадка на характер развития струй, истекающих из различного типа осесимметричных насадков. Так, на начальном и переходном участках наблюдается различие скорости  $u_m/u_0$ , составляющее до 30 % в полуограниченных и 15–20 % в свободных струях. На основном участке отличие составляет уже 10–13 % для свободных и 5–8 % для полуограниченных струй.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Турбулентность принципы и применения / Под ред. У.Фроста, Т.Моулдена. — М., 1980. — 536 с. 2. Z.P. Shulman, N.A.Pokryvaio, D.A.Prokorchuk, A.K.Nesterov. Specific Properties of Turbulent Mass Transfer at the Wall in Dilute Polymer Solutions // Second International Conference on Drag Reduction. Cambridge. 1977. — P. 57–62.
3. Павловский В.А. Экспериментальное исследование плоской затопленной струи // Тр. Ленингр. кораблестроит. ин-та. — Л., 1981. — С. 69–79.
4. Майерс, Шауэр, Юстис. Развитие течения и коэффициент трения в полуограниченной плоской турбулентной струе // Техническая механика. 1963. — С. 58.
5. Хок, Джиджи. Взаимодействие стенки и двумерной турбулентной струи, истекающей параллельно стенке из сопла, установленного на некотором расстоянии от стенки // Теоретические основы инженерных расчетов, 1981. — Т. 103. — № 1. — С. 204–212.
6. З.П.Шульман, Н.А.Покрываило, Н.Д.Ковалевская и В.В.Кулебякин. Об измерении трубкой полного напора структуры турбулентного течения затопленных струй полимерных растворов // ИФЖ. — № 6. — Т. 25. — 1976. — С. 321–323.



## ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДВУХКОНУСНОГО РЗУ С ГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ОЧИСТКОЙ СЕТКИ

Проблема защиты рыбы от попадания в водозаборы, имеющая важное народнохозяйственное значение в связи с большим размахом строительства водозаборных сооружений для ирригации, водоснабжения и гидроэнергетики, может быть решена применением высокоэффективных рыбозащитных устройств (РЗУ).

Конструкция двухконусного РЗУ с импульсной очисткой сетки (КРЗУ) разработана и исследована на кафедре "Гидравлика" БПИ [1]. Экспериментальная установка модели КРЗУ представляет собой бетонный блок с подводным и отводящим каналами (рис. 1). В камере блока, соединенной входным отверстием 2 высотой  $H_K = 0,3$  м с верхним бьефом, установлено РЗУ, представляющее собой сетчатое ограждение 1 из двух вертикально расположенных друг к другу усеченных конусов (диаметр большего основания  $D = 0,6$  м), внутри которых располагается очистное устройство в виде закрепленных на вертикальном валу 3 наклонных пластин 9, представляющих собой укороченные динамические лопатки. На наружной стороне сетки конуса установлен мусоросборный лоток 8, а между конусами смывное устройство 7. Мусор с сетки собирается в мусоросборной лотке и струей из насадка смывного устройства направляется через мусороотводы 5 и 10 в нижний бьеф. Для отвода рыбы из камеры КРЗУ предусмотрен рыбоотвод 6. Приводное устройство позволяет плавно менять число оборотов вала 3 с пластинами в диапазоне 0–200 об/мин.

Бетонный блок экспериментальной установки КРЗУ был смонтирован в гидравлическом лотке шириной 1,5 м и длиной 9 м со стеклянными стенками высотой 0,9 м.

Расход воды, подаваемой из напорного бака в КРЗУ, регулировался с помощью задвижки, а величина его измерялась при помощи двух мерных трехугольных водосливов, расположенных в оголовке лотка. Регулирование уровня воды в лотке и величины перепада на КРЗУ осуществлялось шандорами, установленными в верхнем 4 и нижнем 11 (рис. 1) отводящих каналах. Величина перепада уровней в лотке, подпора в верхнем бьефе, создаваемого при вращении пластин, определялась мерной иглой. Число оборотов вала привода замерялось счетчиком, снабженным торцевым датчиком оборотов.

Как показали опыты, основная часть потока  $Q$  проходит через сетчатое полотно конусов, а меньшая часть  $q$  (до 2–5 %) вместе с рыбой поступает в рыбоотвод. В результате работы очистного устройства, описание и принцип работы которого изложен ранее [2], вокруг сетчатого полотна образуется вращающийся противоток воды, отпугивающий молодь рыбы и препятствующий оседанию мусора на сетке, что позволяет увеличить скорость потока на сетке до 0,5 м/с. При этом частицы мусора находятся в непрерывном скачкообразном движении по сетке до попадания в мусоросборный ло-

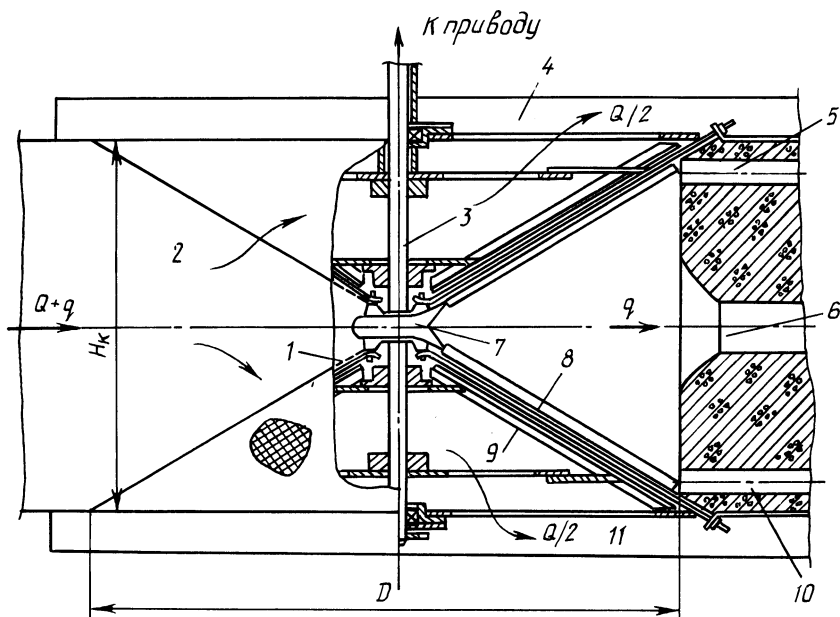


Рис. 1. Двухконусное РЗУ с гидроимпульсной очисткой сетки

ток. При проведении биологических исследований пропускалась молодь рыбы размером 40–50 мм партиями по 20–30 штук. Поведение рыбы и динамика частиц мусора фиксировались на киноплёнке. На основании биологических исследований определена оптимальная форма камеры КРЗУ, создающая лучшие условия для прохода молоди рыбы через камеру и рыбоотвод. При этой форме камеры вертикальные стенки устанавливаются в виде плоских продольных стенок на входе, переходящих в полуцилиндр по тыльному контуру оснований сетчатых конусов, а входное сечение рыбоотвода располагается осесимметрично на задней стенке.

В результате гидравлических исследований определены пропускная способность КРЗУ (при работе с очистным устройством и без него), величина потерь напора при прохождении потока через установку, распределение скоростей во входном сечении и по образующей конусной сетки, а также влияние частоты вращения очистного устройства на параметры потока.

При работе очистного устройства происходит перераспределение расхода на входе КРЗУ, так как большая часть потока проходит в той части камеры, где направление потока совпадает с направлением вращения очистного устройства. Это обстоятельство оказывает влияние на место концентрации основной массы взвешенных частиц мусора, что и определяет месторасположение мусоросборных лотков на сетке. Установлено, что при постоянной отметке горизонта верхнего бьефа увеличение частоты вращения очистного устройства в довольно большом диапазоне (50–150 об/мин) приводит к малому (до 10 %) уменьшению расхода воды, что свидетельствует о незначительном увеличении сопротивления потока, проходящего через КРЗУ. Следует отме-

тить, что при увеличении частоты вращения до 200 об/мин импульс противотока достигает такой величины, при которой частицы мусора отделяются от сетки и некоторый промежуток времени витают в камере, а затем уносятся потоком в рыбоотвод. В этом случае мусоросборные лотки и мусороотводы практически не работают.

В опытах на модели РЗУ с цилиндрической формой сетки были получены необходимые для конструирования и расчета натурной установки КРЗУ энергетические характеристики очистного устройства, основными из которых являются зависимости крутящего момента на валу от геометрических параметров наклонной пластины (угла наклона к сетке, ширины и расстояния от сетки), скорости фильтруемого через сетку потока и частоты вращения.

На основании теоретических и экспериментальных исследований моделей конических и цилиндрических форм сеток с указанным очистным устройством ниже приводится методика расчета подобных РЗУ.

Основным исходным параметром рыбозащитного устройства является расход воды  $Q$ , проходящий через сооружение.

Принимая среднее значение скорости потока на сетке конусов равным 0,4 м/с и угол при вершине конусов  $120^\circ$  (площадь сетчатого полотна двух конусов  $S_c = 1,81D^2$ ), определяем диаметр основания конуса:

$$D = 1,2 \sqrt{Q}, \quad (1)$$

где  $Q$  — расход,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Высота рабочей камеры  $H_k$ , равная высоте двух конусов, составит

$$H_k = 0,577D \text{ м}. \quad (2)$$

Площадь входного сечения в КРЗУ

$$S_{\text{вх}} = DH_k = 0,577D^2 \text{ м}^2. \quad (3)$$

Исходя из формул (1–3), скорость потока на входе в рабочую камеру составит  $v_{\text{вх}} = 1,2$  м/с. При этом площадь каналов, отводящих поток через сетки верхнего и нижнего конусов и направляющих воду к насосным станциям, должна соответствовать (3). В этом случае при одинаковых форме и площади сечения обоих отводных каналов скорость потока в них составит 0,6 м/с. Для обеспечения указанных равных скоростей в нижнем канале следует предусматривать установку регулирующего затвора.

Частота вращения  $n$  вала очистного устройства получена исходя из следующих соображений. Как показали эксперименты, эффективная работа принятой конструкции очистного устройства имеет место при минимальной линейной скорости лопатки, равной 1,0 м/с. Эта скорость должна быть обеспечена на расстоянии от вершины конуса, равном 0,25 длины образующей, так как на этом расстоянии располагаются элементы крепления и регулировки динамических лопаток. При этом расположение лопаток вдоль образующей конусной сетки приведет к линейной скорости лопатки у основания конуса, равной 4,0 м/с. Тогда необходимая частота вращения вала с лопатками с учетом (1) определится

$$n = 64\sqrt{Q} \text{ об/мин.} \quad (4)$$

На основании экспериментальных данных принимаем, что частица мусора на сетке скачкообразно переместится на расстояние, равное 0,03 м за один импульс вращающейся лопатки. Число импульсов в секунду при числе лопаток  $z$  составит  $nz/60$ . Необходимое число лопаток определится в зависимости от времени полного оборота (при одном мусоросбросном лотке) частицы мусора у основания конуса  $t$  (секунды), т.е. времени очистки сетки, зависящего от мутности потока. Число лопаток с учетом (1) и (4) будет

$$z = 118Q/t. \quad (5)$$

При подсчете  $z$  по (5) необходимо иметь в виду, что для обеспечения эффекта очистки сетки число лопаток не должно быть менее трех. Ширина лопатки в зависимости от расхода КРЗУ принимается  $B = 0,06$  м при расходе  $Q \geq 1,0 \text{ м}^3/\text{с}$  и  $B = 0,04$  м при  $Q < 1,0 \text{ м}^3/\text{с}$ . К вершине конуса  $B$  уменьшается и у его вершины составляет соответственно 0,03 и 0,02 м. Лопатка к сетчатому полотну устанавливается под углом  $\beta = 35\text{--}45^\circ$ , где  $\beta$  — угол между направлением относительной скорости и обратным направлением окружной скорости к входной кромке лопатки.

Приводную мощность очистного устройства можно определить следующим образом. Сила взаимодействия лопатки с потоком

$$P = \rho B L, \quad (6)$$

где  $\rho$  — гидродинамическое давление на лопатке;  $B$  и  $L$  — соответственно ширина и длина лопатки.

Крутящий момент на валу очистного устройства для конической формы сетки будет

$$M_{\text{кр}} = \frac{2}{3} \rho \frac{D}{2} z, \quad (7)$$

где  $\frac{2}{3} \frac{D}{2}$  — плечо силы  $\rho$ .

Приводная мощность двухконусного РЗУ при угловой скорости  $\omega$  вала  $N = 2M_{\text{кр}} \omega$  с учетом (6) и (7) будет  $N = 0,07\rho B L D z n$ . Подставляя значения  $D$  из (1) и  $n$  из (4), имеем:

$$N = 5,4\rho B L z. \quad (8)$$

На основании исследований модели РЗУ с цилиндрической сеткой динамическое давление на лопатке при ее линейной скорости 4,0 м/с составляет  $\rho = 3,7$  кПа. Тогда окончательная зависимость для определения приводной мощности на валу очистного устройства двухконусного РЗУ (кВт) имеет вид

$$N = 20B L z. \quad (9)$$

По отношению к предлагаемому очистному устройству наиболее близким по принципу очистки сетки из существующих способов являются вра-

щающиеся флейты. Для достижения аналогичного эффекта очистки сетки при использовании вращающихся флейт необходимо вращать их (при одинаковом числе флейт и лопаток) с одинаковой угловой скоростью и обеспечивать соответствующую мощность струи противотока. В этом случае значительно возрастают сопротивление вращению элементов флейты и сопротивление движению воды в подводных гидротоннелях, что приводит к дополнительным затратам приводной мощности. Проведенный расчет и анализ технико-экономических показателей свидетельствуют об экономической целесообразности конструкции РЗУ.

Таким образом, конструкция двухконусного РЗУ с очистным устройством в виде динамических лопаток обеспечивает эффективную рыбозащиту и очистку сетки при меньших габаритах и затратах энергии, что будет иметь преимущество по сравнению с существующими аналогичными способами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А.с. № 1105547. Рыбозащитное устройство водозаборного сооружения, 1984. — № 28. 2. Воньярский И.П., Варнаков Н.М., Сидоров А.Н., Молочко А.В. Рыбозащитное устройство с импульсной струйной очистной сетки // Водное хозяйство и гидротехн. стро-во, 1984. — Вып. 13. — С. 39—42.

УДК 627.8

Е.М.ЛЕВКЕВИЧ, канд. техн. наук,  
Т.А.КОЗЛОВА (БПИ)

### ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ЧАСТИЦ ГРУНТОВОГО ОТКОСА ПРИ ДЕЙСТВИИ ВОЛН И ГРУНТОВЫХ ВОД

Положение нижней границы крепления грунтовых откосов земляных сооружений и берегов, подвергающихся волновым воздействиям, а также характеристики профиля равновесия размываемых берегов водохранилищ зависят от величины размывающих скоростей для грунтов [1—3].

Определение допустимых волновых скоростей для грунтов, слагающих откос, представляет собой сложную задачу.

В настоящее время для их определения рекомендуется пользоваться графиком [2, 4], полученным для условий горизонтального и слабонаклонного дна и при других факторах, влияющих на устойчивость частиц.

В практике имеют место случаи, когда крутые откосы из несвязных грунтов находятся одновременно под воздействием волн и фильтрационных сил, возникающих в водонасыщенных откосах при резком снижении уровней перед ним или подъеме в них уровня грунтовых вод.

Имеются единичные рекомендации [2], в которых наклон откоса следует учитывать путем уменьшения величины допустимых скоростей, определенных по [5] на величину  $\sqrt{\cos \alpha}$  ( $\alpha$  — угол наклона откоса к горизонту). Рекомендации по учету влияния фильтрационных сил отсутствуют. Вместе с тем наличие подпора грунтовых вод, как показано в [5], оказывает влияние на величину и характер деформации неукрепленного откоса под действием волн.

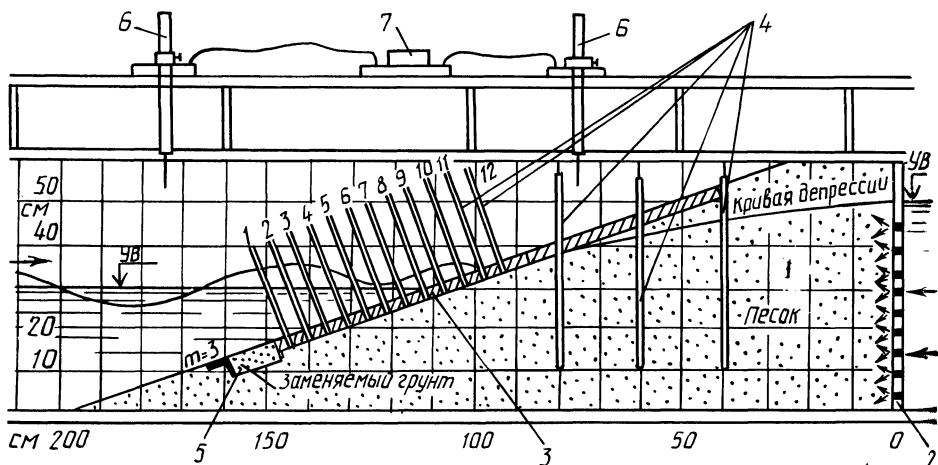


Рис. 1. Опытная установка:

1 — грунтовый откос; 2 — щит с отверстиями; 3 — плита; 4 — пьезометры; 5 — ограничитель; 6 — мерные иглы; 7 — электросигнализатор уровня

Нами проведены лабораторные исследования с целью изучения влияния крутизны откоса и грунтового потока на величину допускаемых волновых скоростей в нижней зоне откоса.

Исследования проводились в волновом лотке размером 12,0 x 0,32 x 0,6 м на размываемой модели. Последняя (рис. 1) представляла собой грунтовый откос с заложением 1:3, уложенный из среднезернистого песка с диаметром частиц  $d_{10} = 0,12$  мм,  $d_{50} = 0,3$  мм,  $d_{60} = 0,4$  мм. С тыльной стороны откос ограничивался щитом с отверстиями, что позволяло насыщать его водой и поддерживать заданный уровень в течение опыта. На поверхность откоса укладывалось непроницаемое покрытие в виде металлической плиты, в которой было установлено 12 пьезометров с шагом 5,0 см. Плита укладывалась на заданную глубину таким образом, чтобы ее нижняя кромка находилась на глубине, превышающей критическую. На расстоянии 10 см от нижнего края плиты вниз по откосу укладывался ограничитель, представляющий собой уголок из оцинкованной жести с полками шириной 4 см. Плита устанавливалась в грунт, чтобы вторая плоскость полки была заподлицо с поверхностью откоса. Ограничитель такой конструкции позволял визуально фиксировать начало подвижек частиц грунта. На участке откоса между нижним краем плиты и ограничителем в зависимости от условий опыта укладывался просеянный песок однородного состава.

При различных уровнях воды и составах грунта откос поочередно подвергался действию волн с увеличивающейся высотой. Увеличение высоты волны производилось до тех пор, пока не начиналась подвижка частиц грунта вниз по откосу у нижней кромки плиты. В каждом опыте фиксировались отметки уровня воды перед и после откоса в пьезометрах и высоты высачивания грунтовой воды, а также высота волны, при которой начиналась подвижка частиц грунта исследуемого состава. Опыты проводились при глубине воды

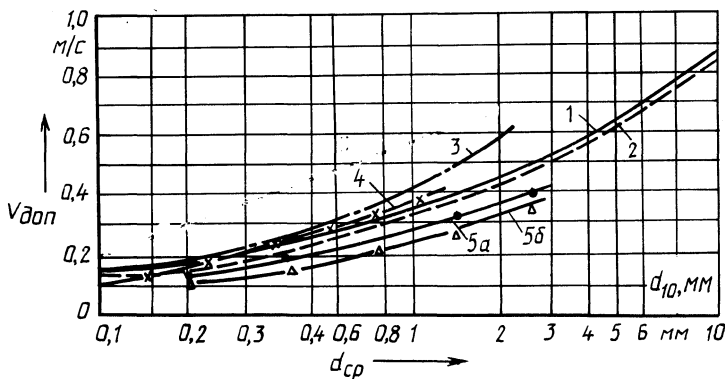


Рис. 2. Графики зависимости размывающих волновых скоростей на откосе при  $m = 3,0$  для несвязных грунтов:

1 — по Шанкину П.А.; 2 — по СНиП 2.06.04-82; 3 — по Божичу П.К.; 4 — по Высоцко-му А.Ф.; 5 — опытные: 5а — при  $\Delta H = 0$ ; 5б — при  $\Delta H = 20,0$  см

в лотке 30,0 см, уровне воды за откосом 30,0–50,0 см, длине волны 100,0 см, высоте, изменявшейся в пределах 4,0–8,0 см, и с однородными песками, имеющими диаметр зерен  $0,25 \leq d \leq 0,5$  мм;  $0,5 \leq d \leq 1,0$  мм;  $1,0 \leq d \leq 2,0$  мм;  $2,0 \leq d \leq 3,0$  мм.

В результате опытов для каждого сочетания уровней воды была получена высота волны, при которой начиналась подвижка частиц грунта исследуемых диаметров.

Для каждого исследованного случая производилось вычисление максимальных донных скоростей по формуле (1):

$$v = \frac{mh}{\sqrt{\frac{\pi\lambda}{g} sh} \frac{4\pi H}{\lambda}}, \quad (1)$$

где  $h$  — высота волны, см;  $\lambda$  — длина волны, см;  $H$  — глубина воды перед откосом, см;  $g$  — ускорение свободного падения,  $\text{см}^2/\text{с}$ ;  $n = 0,6-0,8$  — коэффициент, зависящий от пологости волны.

На рис. 2 представлены зависимости для определения неразмывающих скоростей, а также опытные кривые начала трогания частиц для случаев, когда перепад уровней воды перед откосом и в нем отсутствует, и при перепаде, равном 20 см (с учетом падения напора в теле опытного откоса при  $i = 0,10$ ).

Из графиков видно, что начало подвижки частиц грунта исследованных диаметров происходило при меньших волновых придонных скоростях, чем определенных по рекомендуемому графику [4], как в случае отсутствия перепада уровней, так и при его наличии. При этом уменьшение скоростей при наличии перепада больше, чем при его отсутствии. Графики показывают на влияние заложения откоса и перепада уровней на устойчивость частиц грунта на откосе. Для оценки влияния крутизны откоса и грунтовых вод на устой-

Соотношения между скоростями трогания частиц грунта при волнении на откосе с заложением 1:3 (у низа крепления) при различных уровнях грунтовой воды

Характерные диаметры частиц грунта, мм	Волновые донные скорости, м/с					
	опытные			$\frac{v_{\text{доп}} - v_{\text{оп.о}}}{v_{\text{доп}}}$	$\frac{v_{\text{оп.о}} - v_{\text{оп.20}}}{v_{\text{оп.о}}}$	$\frac{v_{\text{доп}} - v_{\text{оп.20}}}{v_{\text{доп}}}$
	$v_{\text{доп}}$	$v_{\text{оп.о}}$	$v_{\text{оп.20}}$	$v_{\text{доп}}$	$v_{\text{доп}}$	$v_{\text{доп}}$
	при $\Delta H=0$	при $\Delta H=20$ см		х100 %	х 100 %	х100 %
0,25–0,5	0,22	0,18	0,14	18	18	36
0,5–1,0	0,31	0,28	0,24	11	11	22
1,0–2,0	0,4	0,32	0,26	20	15	35
2,0–3,0	0,5	0,4	0,36	20	8	28

чивость частиц грунта на откосе были подсчитаны соотношения между скоростями начала трогания частиц и опытными скоростями, отсутствия напора грунтовых вод и при напоре 20 см.

Из табл. 1 видно, что при коэффициенте откоса  $m=3$  и отсутствии перепада уровней происходит уменьшение скоростей до 20 %, при этом отклонение увеличивается по мере увеличения диаметра зерен грунта; при перепаде уровней, равном 20,0 см ( $i_{\text{гр}} = 0,1$ ), скорости трогания частиц уменьшаются еще на 18 % от  $v_{\text{доп}}$ . Можно видеть, что по мере увеличения диаметра частиц грунта влияние фильтрационных сил уменьшается. Суммарное уменьшение скоростей трогания частиц под совместным воздействием волн и фильтрационных сил составило в условиях опыта в среднем 30 %.

Проведенные опыты показали, что уклон откоса и фильтрационные силы, возникающие при перепаде уровней грунтовых вод, оказывают существенное влияние на устойчивость частиц грунта.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. СНиП П-53-73. Плотины из грунтовых материалов. — М.: Стройиздат, 1974. — 32 с.
2. Методические рекомендации по проектированию креплений откосов земляных гидротехнических сооружений, подверженных действию ветровых волн (П 52-71) ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева. — Л., 1972. — 20 с. З. С и д о р ч у к В.Н. Определение нижней границы крепления откосов // Труды, совещания по гидрологии и инженерной геологии района Днепровских водохранилищ и ирригационных систем Приднепровья. Днепропетровск, 1962. — С. 217–229.
4. СНиП 2.06.04-82. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). — М., 1983. — 40 с. 5. Л е в к е в и ч Е.М. Лабораторные исследования переформирования неукрепленных откосов земляных плотин под действием волн и фильтрационных сил // Энергетика. — 1971. — № 8. — С. 98–102.



## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ ПАРАМЕТРОВ БЕРЕГОВОЙ ОТМЕЛИ, ИМЕЮЩЕЙ ПРОФИЛЬ РАВНОВЕСИЯ С САМООТМОСТКОЙ

Одним из способов защиты размываемых берегов является создание берегозащитных пляжей [1]. Вопросы их проектирования и расчета при отсыпке из однородных несвязных грунтов освещены в литературе [1, 2]. При этом не рассматривалась возможность выполнения берегозащиты из естественных материалов, имеющих повышенную неоднородность. Применение последних, например, в условиях гидротехнического строительства на малых водохранилищах, позволит получить (при креплении верховых откосов плотин, дамб, размываемых берегов) значительный эффект. Как показали исследования [2—4], в результате размыва грунтов, имеющих повышенную неоднородность, волновым потоком в береговой зоне на отмели происходит образование самоотмостки из гравелистых и валунных частиц, которая защищает склон и обеспечивает его устойчивость. Таким образом, использование грунтов с повышенной неоднородностью является актуальным вопросом, однако расчетных зависимостей, учитывающих образование на профиле самоотмостки — в настоящее время не получено.

В связи с этим исследовалось влияние крупности и неоднородности материала на процесс переработки, изучался механизм образования самоотмостки и получены зависимости для расчета профиля равновесия береговой отмели.

Опыты проводились в лабораторных условиях [3, 5] с использованием данных натурных наблюдений [3—5].

В результате опытов по моделированию переработки берегов установлено, что в зависимости от содержания крупных частиц в размываемом грунте возможно образование двух типов самоотмостки. В первом случае (тип 1) гравелистые частицы, образующие самоотмостку, укладывались равномерным слоем по ширине отмели с образованием на урезе призмы (рис. 1, а), причем это явление наблюдалось при содержании крупных частиц  $25 \leq P_{гр} \leq 50\%$  от объема всего грунта. При образовании самоотмостки второго типа и насыщении  $10\% \leq P_{гр} \leq 25\%$  наблюдался вымыв мелких частиц в зоне наката и образование на урезе и примыкающем участке отмели самоотмостки (рис. 1, б).

Необходимо отметить, что с увеличением содержания в грунте крупных включений значительно ускорялся процесс образования самоотмостки, тем самым тормозя (замедляя) процесс переработки и уменьшая величину деформаций профиля.

В общем случае задача определения формы равновесной отмели с самоотмосткой сводится к определению ряда характеристик: ширины самоотмостки ( $B_{\text{соотм}}$ ), мощности самоотмостки ( $\delta_{\text{соотм}}$ ), уклонов надводной ( $i_1$ ) и подводной ( $i_2, i_2'$ ) частей отмели, верхнего ( $a_1$ ) и нижнего ( $a_2, a_2'$ ) пределов размывающего действия волнения (ВНР и ННР).

Опыты показали, что соотношения ширины самоотмостки ( $B_{\text{соотм}}$ ) и подводной части отмели ( $B_{п}$ ) изменяются в пределах 0,3—0,7 для первого

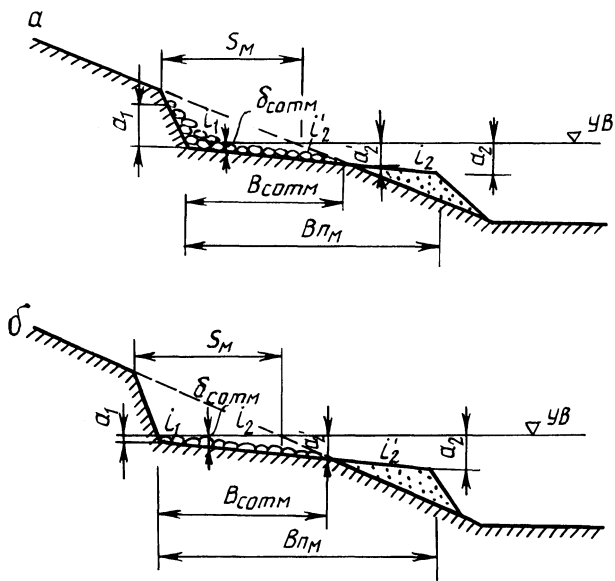


Рис. 1. Типы профиля с самоотстойкой:  
 а) тип 1 при  $25\% < P_{гр} < 50\%$ ; б) тип 2 при  $10\% < P_{гр} < 25\%$

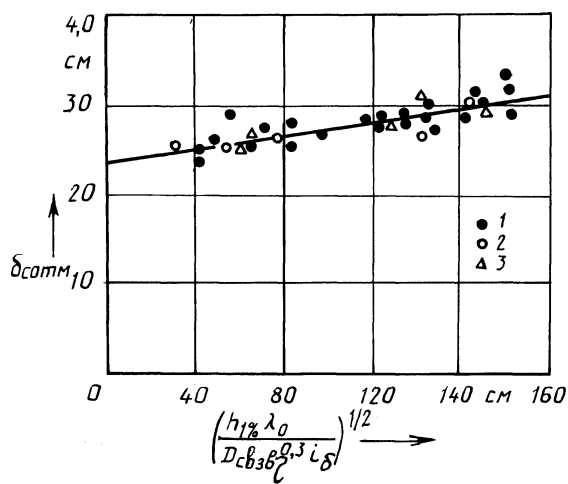


Рис. 2. График зависимости  $\delta_{сотм} = f\left[\frac{h^3_{1\%}\lambda_0}{\eta_{0,3}D_{св}3\beta_{0,3}i\delta}\right]^{1/2}$

и 0,5–0,8 для второго типа профилей равновесия. С увеличением крупности гравелистых включений, а также их неоднородности ширина самоотмостки уменьшается. Мощность ее ( $\delta_{\text{сотм}}$ ) также зависит от крупности и неоднородности гравелистых включений. Средняя толщина отмостки на поверхности отмели, находящейся на стадии равновесия, определяется по зависимостям (1), (2) (рис. 2):

для профиля с самоотмосткой первого типа

$$\delta_{\text{сотм}} = 0,08 \left( \frac{h_{1\%}^3 \lambda_0}{D_{\text{свзв}} \eta^{0,3} i_6} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

для профиля с самоотмосткой второго типа

$$\delta_{\text{сотм}} = 0,03 \left( \frac{h_{1\%}^3 \lambda_0}{D_{\text{свзв}} \eta^{0,5} i_6} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

где  $h_{1\%}$ ,  $\lambda_0$  — соответственно высота и относительная длина волны, м;  $D_{\text{свзв}}$  — средневзвешенный диаметр крупнозернистых включений, м;  $\eta$  — коэффициент неоднородности размываемого грунта;  $i_6$  — исходный уклон берега.

В общем случае элементы профиля статического равновесия при образовании самоотмостки являются функцией параметров волнения, характеристик granulометрического состава грунта и начального уклона берегового склона.

Функциональная зависимость уклонов устойчивой отмели от указанных параметров имеет вид

$$i_1 = i_2 = k_{1,2} f_{1,2} (h_{1\%}, \lambda_0, d_{\text{свзв}}, \eta, i_6). \quad (3)$$

При выводе расчетных зависимостей использовался метод размерностей. Решая задачу в общем виде, после подстановки соответствующих размерностей получаем для  $i_1$  и  $i_2'$  с учетом самоотмостки, расположенной выше и ниже НПУ, следующие уравнения:

$$i_1 = i_2' = k_{1(2)} \left( \frac{h_{1\%} \sqrt[3]{\lambda_0}}{d_{\text{свзв}}} \right)^z f_{1(2)} (\eta, i_6), \quad (4)$$

$$a_2' = k_3 \left( \frac{h_{1\%} \sqrt[3]{\lambda_0}}{d_{\text{свзв}}^{2z}} \right)^{\frac{1+z}{3}}. \quad (5)$$

Чтобы выражения (4) и (5) привести к виду, доступному для использования, были раскрыты функциональные зависимости  $i_{1(2)} = f_{1(2)}(\eta, i_6)$ , найдены численные значения коэффициентов пропорциональности  $k_1, k_2, k_3$  и показатели степени  $z$ . Значения  $z$  и  $k_1, k_2, k_3$  определялись по результатам опытов, проведенных с неоднородным несвязным грунтом на размываемых моделях откосов с последующей корректировкой натуральных данных. Для определения коэффициентов и показателей степени в координатах зависимости (4) были построены графики, из которых установлено:

для случая самоотмостки первого типа

$$i'_2 = 0,028 \left( \frac{h_{1\%} \sqrt[3]{\lambda_0}}{d_{\text{свзв}}} \right)^{2/3} + i_6, \quad (6) \quad i_2 = 0,50i'_2, \quad (7)$$

для случая самоотмостки второго типа

$$i'_2 = 0,012 \left( \frac{h_{1\%} \sqrt[3]{\lambda_0}}{d_{\text{свзв}}} \right)^{2/3} + i_6, \quad (8) \quad i_2 = 0,60i'_2. \quad (9)$$

Зависимости (6) и (8) по структуре аналогичны уравнению для расчета каменнонабросного банкета из горной массы, полученному ранее [6]. В нашем случае уклон надводной части отмели над НПУ у профиля равновесия с самоотмосткой первого типа

$$i_1 = 0,032 \left( \frac{h_{1\%} \sqrt[3]{\lambda_0}}{D_{\text{свзв}} \eta^{0,3}} \right)^{2/3} + i_6, \quad (10)$$

второго типа

$$i_1 = i'_2. \quad (11)$$

В приведенных зависимостях (6–9) в качестве характеристики неоднородного грунта была принята крупность  $d_{\text{свзв}}$ , определяемая по кривой гранулометрического состава. Для более точного расчета параметров профиля равновесия необходимо учитывать как мелкозернистые, так и крупные фракции, которые составляют отмостку и определяют уклон и ширину отмели. Соотношение фракций в исходном грунте  $d_{\text{свзв}}$  и самоотмостке  $D_{\text{свзв}}$  определяется по зависимости (1) из [4].

Подставляя (1) из [4] в (5) имеем: верхний предел размыва (ВПР) по экспериментальным данным равен для профиля равновесия с самоотмосткой первого типа

$$a_1 = (1,5 - 2,0) \delta_{\text{отм}}, \quad (12)$$

второго типа

$$a_1 = \delta_{\text{отм}}. \quad (13)$$

Нижний предел размыва (НПР) для профиля статического равновесия с самоотмосткой может быть рассчитан по зависимостям (14–17):

для профиля первого типа

$$a_2 = a'_2/0,70, \quad (14) \quad a'_2 = 0,36 \left( \frac{h_{1\%}^2 \lambda_0}{\sqrt{D_{\text{свзв}}} \eta^{0,3}} \right)^{2/3}, \quad (15)$$

для профиля второго типа

$$a_2 = a'_2/0,80, \quad (16) \quad a'_2 = 0,27 \left( \frac{h_{1\%}^2 \lambda_0}{\sqrt{D_{\text{свзв}}} \eta^{0,5}} \right)^{2/3}. \quad (17)$$

Исследования показали, что в натуральных условиях зависимости (1–2) и (6–17) могут использоваться при  $h_{1\%} = 0,2–1,0$  м;  $\lambda_0 = 10h_{1\%}$ ;  $d_{свзв} = 0,25–1,0$  мм;  $D_{свзв} = 35,0–200$  мм;  $\eta = 3,5–12,0$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пышкин Б.А. Динамика берегов водохранилищ. — Киев, 1973. — 414 с.
2. Сокольников Ю.Н. Инженерная морфодинамика берегов и ее приложения. — Киев, 1976. — 227 с.
3. Максимчук В.Л., Левкевич В.Е. Экспериментальное исследование образования отмостки в береговой зоне малых водохранилищ // Гидравлика открытых русел. — М., 1985. — С. 45–50.
4. Левкевич В.Е. Учет фактора неоднородности грунта при защите размываемых берегов водохранилищ. 1983. — Вып. 11. — С. 20–23.
5. Левкевич В.Е. Лабораторное исследование деформаций берегов, сложенных грунтами с повышенной степенью неоднородности // Водное хоз-во и гидротехн. стр-во. — 1985. — Вып. 15. — С. 57–61.
6. Хомичкий В.В. Исследование банкетов из горной массы для защиты берега от размыва волнами: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Киев, 1973. — 18 с.

УДК 624.131.52

С.В.СОБОЛЕВСКИЙ (БПИ)

### РАСЧЕТ НАЧАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И НАПОРНОЙ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ ФУНКЦИИ В АНИЗОТРОПНОМ ВОДОНАСЫЩЕННОМ СЛОЕ КОНЕЧНОЙ ТОЛЩИНЫ

Определение распределения напряжений в основаниях конечной толщины — весьма актуальная задача. В [1] исследовано распределение напряжений и перемещений в изотропном основании конечной толщины.

В настоящей работе рассмотрено напряженное состояние водонасыщенного ортотропного основания конечной толщины при воздействии нормальной нагрузки.

Пусть на ортотропный водонасыщенный слой толщиной  $y = h$  с главными направлениями, параллельными и перпендикулярными плоскости  $y = h$ , лежащий на жестком водоупоре  $y < 0$ , в начальный период действует нормальная нагрузка  $P(x)$  (рис. 1).

Определение начальных напряжений и напорной фильтрационной функции возможно при решении:

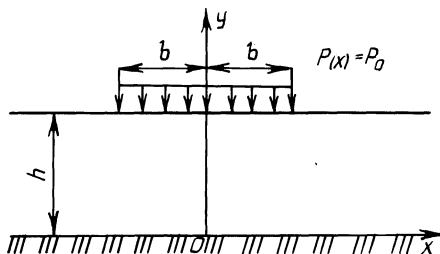


Рис. 1. Схема загрузки основания конечной толщины

уравнений равновесия скелета водонасыщенного грунта:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \gamma \frac{\partial H}{\partial x} = 0,$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \gamma \frac{\partial H}{\partial y} = 0,$$

где  $\gamma$  — объемная масса воды,  $H$  — напорная фильтрационная функция; уравнения напорной фильтрационной функции [2]

$$K_x \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = 0 \text{ или } n^2 \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = 0,$$

где  $n^2 = \frac{K_x}{K_y}$ ,  $K_x, K_y$  — коэффициенты фильтрации соответственно в горизонтальном и вертикальном направлениях;

уравнения неразрывности скелета в начальный период загрузки [5] при  $\sigma_x + \nu^2 \sigma_y = 0$ :

$$\frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial y^2} + m^2 \frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial x^2} = \nu \gamma \frac{\partial^2 H}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где

$$m^2 = \frac{1 - \mu_{yz}^2 + (\mu_{yx} + \mu_{zx} \mu_{yz}) \nu^2}{E_y} \frac{\nu^2}{2G}$$

$$\frac{1}{2G} - \frac{(1 - \mu_{xz}^2) \nu^2 + \mu_{xy} + \mu_{xz} \mu_{zy}}{E_x}$$

$$\nu = \frac{n^2 - 1}{2G \left[ \frac{1}{2G} - \frac{(1 - \mu_{xz}^2) \nu^2 + \mu_{xy} + \mu_{xz} \mu_{zy}}{E_x} \right]}$$

$$\nu^2 = \frac{E_x (1 - \mu_{yz}^2) - E_y (\mu_{xy} + \mu_{xz} \mu_{zy})}{E_y (1 - \mu_{xz}^2) - E_x (\mu_{yx} + \mu_{zx} \mu_{yz})},$$

где  $E_x, E_y$  — модули деформации по главным направлениям  $x, y$ ;  $G = \frac{E_y}{2(1 + \mu_{xy})}$  модуль сдвига,  $\mu_{ij}$  — коэффициенты Пуассона.

Вывод уравнения (1) для случая плоской деформации ортотропного водонасыщенного основания, подчиняющегося обобщенному закону Гука, опирается на теорию Н.М.Герсеванова — В.А.Флорина. Нагрузка, применен-

ная к водонасыщенному основанию, в начальный период целиком передается на грунтовую воду [3]. Водосодержание элементарного объема водонасыщенного основания в начальный период приложения внешней нагрузки не изменяется. Следовательно, если пренебречь сжатием защемленного в воде воздуха, то в начальный момент времени грунтовый скелет может испытывать только лишь деформации изменения формы, но не объема, т.е.  $\epsilon_x + \epsilon_y = 0$  [4].

Рассмотрим случай, когда между упругим ортотропным водонасыщенным слоем и жестким водоупором трение отсутствует. Граничные условия на поверхностях  $y = h$  и  $y = 0$  для поставленной контактной задачи имеют вид

$$\sigma_x|_{y=h} = 0, \quad \sigma_y|_{y=h} = 0, \quad H = \begin{cases} \frac{P(x)}{\gamma} & \text{при } -b \leq x \leq +b; \\ 0 & \text{при } |x| > b, \end{cases}$$

$$\frac{\partial H}{\partial y} |_{y=0} = 0, \quad \tau_{xy}|_{y=0} = 0.$$

Применяя к решению задачи интегральное преобразование Фурье [6]

$$\bar{f}(s) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{isx} dx,$$

получим:

$$iv^2 s \bar{\sigma}_y + \frac{d\bar{\tau}_{xy}}{dy} - is\gamma \bar{H} = 0, \tag{2}$$

$$-is\bar{\tau}_{xy} + \frac{d\bar{\sigma}_y}{dy} + \gamma \frac{d\bar{H}}{dy} = 0;$$

$$-n^2 s^2 \bar{H} + \frac{d^2 \bar{H}}{dy^2} = 0; \tag{3}$$

$$\frac{d^2 \bar{\sigma}_y}{dy^2} - m^2 s^2 \bar{\sigma}_y = -v\gamma s^2 \bar{H};$$

$$\bar{\sigma}_x(s, y)|_{y=h} = 0, \quad \bar{\sigma}_y(s, y)|_{y=h} = 0,$$

$$\bar{H}(s, y)|_{y=h} \begin{cases} \frac{\bar{P}(x)}{\gamma} & \text{при } -b \leq x \leq +b; \\ 0 & \text{при } |x| > b, \end{cases}$$

$$\frac{d\bar{H}(s, y)}{dy} |_{y=0} = 0, \quad \bar{\tau}_{xy}|_{y=0} = 0.$$

Общий интеграл уравнения (3) имеет вид

$$H = C ch nsy + D sh nsy, \tag{4}$$

где  $C$  и  $D$  — произвольные параметры от  $s$ .

Теперь уравнение (1) примет вид

$$\frac{d^2 \bar{\sigma}_y}{dy^2} - m^2 s^2 \bar{\sigma}_y = -v\gamma s^2 (C \operatorname{ch} nsy + D \operatorname{sh} nsy). \quad (5)$$

Общий интеграл уравнения (5) будем искать методом Лагранжа вариации произвольных постоянных.

Общий интеграл однородного уравнения, соответствующего уравнению (5):

$$\bar{\sigma}_y = A \operatorname{ch} msy + B \operatorname{sh} msy, \quad (6)$$

где  $A$  и  $B$  — произвольные функции  $y$ .

Согласно методу Лагранжа, функции  $A$  и  $B$  определяются из системы

$$\operatorname{ch} msy \frac{dA}{dy} + \operatorname{sh} msy \frac{dB}{dy} = 0;$$

$$ms \operatorname{sh} msy \frac{dA}{dy} + ms \operatorname{ch} msy \frac{dB}{dy} = -v\gamma s^2 (C \operatorname{ch} nsy + D \operatorname{sh} nsy).$$

Решая ее, получим следующие выражения:

$$\frac{dA}{dy} = \frac{v\gamma}{m} s \operatorname{sh} msy (C \operatorname{ch} nsy + D \operatorname{sh} nsy);$$

$$\frac{dB}{dy} = -\frac{v\gamma}{m} s \operatorname{ch} msy (C \operatorname{ch} nsy + D \operatorname{sh} nsy).$$

Интегрируя, получим произвольные функции от  $y$ :

$$A = \frac{v\gamma}{2m} \left\{ C \left[ \frac{\operatorname{ch} (m+n)sy}{m+n} + \frac{\operatorname{ch} (m-n)sy}{m-n} \right] + D \left[ \frac{\operatorname{sh} (m+n)sy}{m+n} - \frac{\operatorname{sh} (m-n)sy}{m-n} \right] \right\} + A_1(s),$$

$$B = -\frac{v\gamma}{2m} \left\{ C \left[ \frac{\operatorname{sh} (m+n)sy}{m+n} + \frac{\operatorname{sh} (m-n)sy}{m-n} \right] + D \left[ \frac{\operatorname{ch} (m+n)sy}{m+n} - \frac{\operatorname{ch} (m-n)sy}{m-n} \right] \right\} + B_1(s),$$

где  $A_1(s)$ ,  $B_1(s)$  — произвольные параметры от  $s$ .

Подставив  $A$  и  $B$  в (6), найдем общий интеграл уравнения (5):

$$\bar{\sigma}_y = A_1 \operatorname{ch} msy + B_1 \operatorname{sh} msy + \frac{v\gamma}{m^2 - n^2} (C \operatorname{ch} nsy + D \operatorname{sh} nsy). \quad (7)$$

Выражения для  $\bar{\sigma}_x$  и  $\sigma_z$  возьмем из [5]:

$$\bar{\sigma}_x = -v^2 \bar{\sigma}_y, \quad \bar{\sigma}_z = (\mu_{zy} - v^2 \mu_{zx}) \bar{\sigma}_y.$$



Из второго уравнения системы (2) найдем

$$\bar{\tau}_{xy} = \frac{1}{is} \left( \frac{d\bar{\sigma}_y}{dy} + \gamma \frac{d\bar{H}}{dy} \right).$$

Подставляя в это уравнение  $\bar{H}$  и  $\frac{d\bar{\sigma}_y}{dy}$  из (4) и (7), получим трансформанту касательного напряжения

$$\bar{\tau}_{xy} = -i \left[ m(A_1 sh msy + B_1 ch msy) + \frac{v + m^2 - n^2}{m^2 - n^2} n\gamma (C sh nsy + D ch nsy) \right]. \quad (8)$$

Граничное условие  $\bar{H}|_{y=h} = \frac{\bar{P}(s)}{\gamma}$  дает

$$\frac{\bar{P}(s)}{\gamma} = C ch nsh + D sh nsh.$$

Условие на границе  $\frac{d\bar{H}}{dy}|_{y=0} = 0$  позволяет получить произвольные параметры  $D = 0, C = \frac{\bar{P}(s)}{\gamma} \frac{1}{ch nsh}$ .

Уравнение (4) примет вид

$$\bar{H} = \frac{\bar{P}(s)}{\gamma} \frac{ch nsy}{ch nsh}. \quad (9)$$

Применяем граничное условие  $\bar{\sigma}_y|_{y=h} = 0$  в (7):

$$A_1 ch msh + B_1 sh msh + \frac{v}{m^2 - n^2} \bar{P}(s) = 0.$$

Используя условие на границе  $\bar{\tau}_{xy}|_{y=0} = 0$  применительно к (8), получим произвольные параметры

$$B_1 = 0, A_1 = - \frac{v}{m^2 - n^2} \cdot \frac{\bar{P}(s)}{ch msh}.$$

С учетом их значений трансформанты напряжений примут окончательный вид:

$$\bar{\sigma}_y = \frac{v}{m^2 - n^2} \bar{P}(s) \left[ -\frac{ch msy}{ch msh} + \frac{ch nsy}{ch nsh} \right];$$

$$\bar{\sigma}_x = -v^2 \bar{\sigma}_y, \quad \bar{\sigma}_z = (\mu_{zy} - v^2 \mu_{zx}) \bar{\sigma}_y;$$

$$\bar{\tau}_{xy} = \frac{i\bar{P}(s)}{m^2 - n^2} \left[ m v \frac{sh msy}{ch msh} - (v + m^2 - n^2) n \frac{sh nsy}{ch nsh} \right].$$

По формуле обращения  $f(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{f}(s) /^{-ixs} ds$  [6], принимая во внимание, что  $\bar{P}(s) = \int_{-\infty}^{\infty} P(\xi) /^{is\xi} d\xi$ , получим:

$$\sigma_y(x, y) = \frac{1}{2\pi} \frac{v}{(m^2 - n^2)} \int_{-\infty}^{\infty} \left[ -\frac{ch\ mys}{ch\ nhs} + \frac{ch\ nys}{ch\ nhs} \right] /^{-ixs} \times$$

$$\times ds \int_{-\infty}^{\infty} P(\xi) /^{is\xi} d\xi;$$

$$\sigma_x = -v^2 \sigma_y, \sigma_z = (\mu_{zy} - v^2 \mu_{zx}) \sigma_y;$$

$$\tau_{xy}(x, y) = \frac{i}{2\pi(m^2 - n^2)} \int_{-\infty}^{\infty} \left[ mv \frac{sh\ mys}{ch\ mhs} - (v + m^2 - n^2)n \frac{sh\ nys}{ch\ nhs} \right] /^{-ixs} \times$$

$$\times ds \int_{-\infty}^{\infty} P(\xi) /^{is\xi} d\xi;$$

$$H(x, y) = \frac{1}{2\pi\gamma} \left[ \int_{-\infty}^{\infty} \frac{ch\ nys}{ch\ nhs} /^{-ixs} ds \int_{-\infty}^{\infty} P(\xi) /^{is\xi} d\xi + 2P(\xi) \kappa\pi \right].$$

Выполняя перестановку порядка интегрирования, получим:

$$\sigma_y = \frac{v}{\pi(m^2 - n^2)} \int_{-\infty}^{\infty} P(\xi) d\xi \int_0^{\infty} \left[ -\frac{ch\ mys}{ch\ mhs} + \frac{ch\ nys}{ch\ nhs} \right] \cos(x - \xi) s ds;$$

$$\sigma_x = -v^2 \sigma_y, \sigma_z = (\mu_{zy} - v^2 \mu_{zx}) \sigma_y;$$

$$\tau_{xy} = \frac{1}{\pi(m^2 - n^2)} \int_{-\infty}^{\infty} P(\xi) d\xi \int_0^{\infty} \left[ mv \frac{sh\ mys}{ch\ mhs} - (v + m^2 - n^2)n \times \right.$$

$$\times \left. \frac{sh\ nys}{ch\ nhs} \right] \sin(x - \xi) s ds;$$

$$H = \frac{1}{\pi\gamma} \left[ \int_{-\infty}^{\infty} P(\xi) d\xi \int_0^{\infty} \frac{ch\ nys}{ch\ nhs} \cos(x - \xi) s ds + P(\xi) \kappa\pi \right].$$

Интегрируя по переменной  $s$  [7], получим решение задачи при воздействии нормальной нагрузки  $P(x)$  в однократных интегралах:

$$\sigma_y = \frac{1}{h} \frac{v}{(m^2 - n^2)} \int_{-\infty}^{\infty} P(\xi) \left[ -\frac{1}{m} \frac{\cos \frac{\pi y}{2h} \cdot ch \frac{\pi(x-\xi)}{2mh}}{\cos \frac{\pi y}{h} + ch \frac{\pi(x-\xi)}{mh}} + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{n} \frac{\cos \frac{\pi y}{2h} \cdot ch \frac{\pi(x-\xi)}{2nh}}{\cos \frac{\pi y}{h} + ch \frac{\pi(x-\xi)}{nh}} \right] d\xi;$$

$$\sigma_x = -v^2 \sigma_y, \quad \sigma_z = (\mu_{zy} - v^2 \mu_{zx}) \sigma_y;$$

$$\begin{aligned} \tau_{xy} &= \frac{1}{h(m^2 - n^2)} \int_{-\infty}^{\infty} P(\xi) \left[ v \frac{\sin \frac{\pi y}{2h} \operatorname{sh} \frac{\pi(x-\xi)}{2mh}}{\cos \frac{\pi y}{h} + ch \frac{\pi(x-\xi)}{mh}} \right. \\ &\quad \left. - (v + m^2 - n^2) \frac{\sin \frac{\pi y}{2h} \cdot \operatorname{sh} \frac{\pi(x-\xi)}{2nh}}{\cos \frac{\pi y}{h} + ch \frac{\pi(x-\xi)}{nh}} \right] d\xi; \\ H &= \frac{1}{\pi \gamma} \left[ \frac{1}{nh} \int_{-\infty}^{\infty} P(\xi) \frac{\cos \frac{\pi y}{2h} ch \frac{\pi(x-\xi)}{2nh}}{\cos \frac{\pi y}{h} + ch \frac{\pi(x-\xi)}{nh}} d\xi + \kappa P(\xi) \right]. \end{aligned}$$

Подставляя в вышеуказанные формулы значения равномерно распределенной нагрузки  $P(\xi) = P_0$  и выполняя интегрирование и простейшие преобразования, найдем распределение напряжений и напорной фильтрационной функции в слое водонасыщенного анизотропного грунта толщиной  $h$ , лежащего на жестком водоупоре:

$$\begin{aligned} \sigma_y &= \frac{vP_0}{\pi(m^2 - n^2)} \left\{ \left[ \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{sh} \frac{\pi(x-b)}{2mh}}{\cos \frac{\pi y}{2h}} - \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{sh} \frac{\pi(x+b)}{2mh}}{\cos \frac{\pi y}{2h}} \right] - \right. \\ &\quad \left. - \left[ \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{sh} \frac{\pi(x-b)}{2nh}}{\cos \frac{\pi y}{2h}} - \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{sh} \frac{\pi(x+b)}{2nh}}{\cos \frac{\pi y}{2h}} \right] \right\}; \end{aligned}$$

$$\sigma_x = -v^2 \sigma_y, \quad \sigma_z = (\mu_{zy} - v^2 \mu_{zx}) \sigma_y;$$

$$\begin{aligned} \tau_{xy} &= \frac{P_0}{2\pi(m^2 - n^2)} \left\{ v \operatorname{mln} \frac{[\sin \frac{\pi y}{2h} + ch \frac{\pi(x-b)}{2mh}] [\sin \frac{\pi y}{2h} - ch \frac{\pi(x+b)}{2mh}]}{[\sin \frac{\pi y}{2h} - ch \frac{\pi(x-b)}{2mh}] [\sin \frac{\pi y}{2h} + ch \frac{\pi(x+b)}{2mh}]} \right. \\ &\quad \left. - (v + m^2 - n^2) \operatorname{mln} \frac{[\sin \frac{\pi y}{2h} + ch \frac{\pi(x-b)}{2nh}] [\sin \frac{\pi y}{2h} - ch \frac{\pi(x+b)}{2nh}]}{[\sin \frac{\pi y}{2h} - ch \frac{\pi(x-b)}{2nh}] [\sin \frac{\pi y}{2h} + ch \frac{\pi(x+b)}{2nh}]} \right\}; \\ H &= \frac{P_0}{\gamma} \left\{ \frac{1}{\pi} \left[ \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{sh} \frac{\pi(x+b)}{2nh}}{\cos \frac{\pi y}{2h}} - \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{sh} \frac{\pi(x-b)}{2nh}}{\cos \frac{\pi y}{2h}} \right] + \kappa \pi \right\}, \end{aligned}$$

где  $\kappa = 1$  для  $-b \leq x \leq b$  и  $\kappa = 0$  для  $|x| > b$  при  $y = h$ ; при  $y < h$   $\kappa = 0$ .

Данные формулы отвечают поставленным граничным условиям, уравнениям равновесия и неразрывности. Используя их, получим распределение напряжений и фильтрационного напора в любой точке ортотропного водонасыщенного слоя грунта, подстилаемого жестким водоупором.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Егоров К.Е. Распределение напряжений и перемещений в основании конечной толщины // Механика грунтов. — 1961. — № 43. — С. 42–63. 2. Соколовский Ю.А. Водонасыщенные откосы и основания. — Минск, 1975. — 398 с. 3. Герсеванов Н.М. Основы динамики грунтовой массы. — М., 1937. — 241 с. 4. Флорин В.А. К вопросу о гидродинамических напряжениях в грунтовой массе. — М., 1938. — 5 с. 5. Соколовский С.В. Распределение напряжений и напорной фильтрационной функции в анизотропном водонасыщенном основании в начальный период приложения внешней нагрузки // Водное хоз-во и гидротехнич. стр-во. 1985. — Вып. 14. — С. 1–3. 6. Снеддон И.Н. Преобразования Фурье. — М., 1955. — 667 с. 7. Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов сумм, рядов и произведений. — М., 1963. — 11 с.

УДК 502 (083.74)

И.Е.КУКСИН, канд. техн. наук,  
С.И.ГОРБАЧЕВА (ЦНИИКИВР)

#### МЕЖДУНАРОДНЫЕ СТАНДАРТЫ ПО ОХРАНЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Проблема охраны окружающей среды носит ярко выраженный международный характер. Особенно это касается таких основных жизненно важных ее компонентов, как атмосферный воздух и водная среда. Это обусловлено общностью интересов различных стран при использовании водных ресурсов рек, озер, водохранилищ и морей, а также атмосферного воздуха. Вопросы загрязнения водной и воздушной среды давно уже стали предметом исследования и изучения в рамках различных международных организаций. Важную роль в деле унификации требований по вопросам охраны окружающей среды играет стандартизация. Именно стандарт в силу своего статуса, как обязательного нормативного документа, может оказать большую помощь в деле унификации требований по охране среды.

Разработкой стандартов по охране окружающей среды занимаются многие международные организации. Среди них Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ), международная организация по водоснабжению, продовольственная и сельскохозяйственная организации ООН и др. Так, например, в рамках ВОЗ разработаны международные и европейские стандарты питьевой воды, справочник "Важнейшие методы защиты качества вод" и т.п. [1, 2]. Необходимо отметить, что советский стандарт качества питьевой воды предъявляет более жесткие требования к концентрации химических веществ, встречающихся в природных водах или добавленных к воде в процессе ее обработки. Это очевидно, если сравнить хотя бы европейские стандарты питьевой воды [2] с ГОСТ 2874–82 [3], который введен в действие с 01.01.1985 г. Так, например, по ГОСТ 2874–82 концентрация свинца не должна превышать

0,03 мг/л, а европейские стандарты допускают ее до 0,1 мг/л. В СССР количество нитратов не должно превышать 45 мг/л, а европейские стандарты допускают до 100 мг/л, селена — соответственно 0,001 и 0,01 мг/л, сульфатов — 250 и 500 мг/л и т.д.

Однако основную роль в разработке международных стандартов по охране окружающей среды играет ИСО (международная организация по стандартизации). В тесном контакте с другими организациями она решает задачи охраны человеческого организма и окружающей среды от шума и радиоактивного загрязнения, а также охраны природных сред (воды, воздуха) от загрязнения вредными веществами.

Непосредственная деятельность ИСО по разработке международных стандартов осуществляется в рамках технических комитетов (ТК), которые являются ее рабочими органами.

Разработка стандартов по охране окружающей среды в рамках ИСО начала сравнительно недавно. В 1972 г. были созданы новые технические комитеты ИСО/ТК 146 "Качество воздуха" и ИСО/ТК 147 "Качество воды". Перед ними поставлена задача по охране важнейших компонентов окружающей среды — атмосферного воздуха и воды.

За сравнительно короткий период, учитывая актуальность вопросов в этой области, разработано уже свыше десятка стандартов.

По охране атмосферного воздуха разработаны стандарты на термины и определения, отбор проб, единицы измерений, определение содержания в воздухе наиболее вредных веществ, таких как сернистые соединения, кислые газообразные отходы и т.п.

В области охраны вод также разработаны стандарты на терминологию, по методике отбора проб и анализов воды, определению в воде вредных для здоровья человека компонентов, таких как ртуть, мышьяк. Ряд стандартов регламентирует определение характеристик качества воды, ее пригодность для использования в различных целях (определение содержания растворимого кислорода, железа и других ингредиентов). Перечень международных стандартов, разработанных в рамках ТК 146 и ТК 147 по состоянию на 1984 год, приводится в табл. 1 [6]. В их разработке активную роль сыграли советские ученые и специалисты.

Стандарты ИСО корреспондируются с методами определения отдельных компонентов, содержащихся в воде, которые приняты в СССР и странах социалистического содружества. Так, например, методика определения содержания мышьяка (СТ ИСО 6341-82) совпадает с аналогичной методикой, рекомендованной в СССР (ГОСТ 4152-81). Иодометрический метод определения содержания растворенного в воде кислорода рекомендуется как СТ ИСО 5813-83, так и руководством [4], которое принято в СССР и ряде стран-членов СЭВ. Фотометрический метод определения содержания железа рекомендован СТ ИСО 6332-82, а также [5].

При разработке инструкции по отбору проб сточных вод, которая введена в СССР с 1 ноября 1985 г., использованы стандарты ИСО по этому вопросу.

Таким образом, международные стандарты имеют большое значение в улучшении состояния окружающей среды и способствуют углублению сотрудничества в этой области.

## Стандарты ИСО по охране воздуха и воды

№ п.п.	№ стандарта ИСО	Стандарт
<b>ТК 146. Качество воздуха</b>		
1.	4219-79	Определение газообразных сернистых соединений в окружающем воздухе. Пробоотборное оборудование.
2.	4220-83	Определение показателя загрязнения воздуха кислыми газообразными отходами. Титриметрический метод с применением индикатора или потенциометрическое определение конечной точки.
3.	4221-80	Определение концентрации по массе двуокиси серы в окружающем воздухе. Спектрофотометрический метод с применением торина.
4.	4225-80	Основные аспекты. Словарь терминов (на английском и французском языках).
5.	4226-80	Общие положения. Единицы измерений.
6.	6879-83	Эксплуатационные характеристики и понятия, связанные с методами измерения качества воздуха.
<b>ТК 147. Качество воды</b>		
1.	5667/1-80	Отбор проб. Часть 1. Руководство по составлению программ выборки.
2.	5667/2-82	Отбор проб. Часть 2. Руководство по методикам отбора проб.
3.	5666/1-83	Определение содержания общей ртути спектрометрическим методом атомной абсорбции без пламени. Часть 1. Метод после варки с перманганатом и персульфитом.
4.	5813-83	Определение содержания растворимого кислорода. Иодометрический метод.
5.	6107/1-80	Словарь терминов. Часть 1 (на английском, французском, русском и немецком языках).
6.	6107/2-81	Словарь терминов. Часть 2 (на английском, французском и немецком языках).
7.	6332-82	Анализ воды. Определение содержания железа фотометрическим методом с применением 1,10-фенантролина.
8.	6341-82	Определение ингибирования подвижности <i>Daphnia magna stretus</i> (Cladocera crustacea).
9.	6595-82	Определение содержания общего мышьяка. Спектрофотометрический метод с применением диэтилдитнокарбоната серебра.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Европейские стандарты питьевой воды. 2-е изд. — Женева, 1972. — 60 с. 2. Международные стандарты питьевой воды. 3-е изд. — Женева, 1973. — 78 с. 3. Вода питьевая: Сб. стандартов. — М., 1984. — 240 с. 4. Унифицированные методы анализа вод. — Ч. 1. — Л., 1978. — 144 с. 5. Л у р ь е Ю.Ю. Аналитическая химия промышленных сточных вод. — М., 1984. — 448 с. 6. Международные стандарты ИСО: Указатель 1984 г. — М., 1984. — 224 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

Г а т и л л о П.Д. Об учете интересов охраны рек на предпроектной стадии разработ- ки систем водообеспечения городов БССР. . . . .	3
П л у ж н и к о в В.Н., Э л ь п е р В.Л. Оценка использования воды промышлен- ностью в бассейнах малых рек. . . . .	8
Г р и н е в и ч Л.А., Р у т к о в с к и й П.П. Определение рациональных режимов ис- пользования противаварийных резервных емкостей в инженерных системах защиты от наводнений. . . . .	13
В о р о н и н А.Г., О в с я н и к о в В.Г. Очистка сточных вод горнодобывающих предприятий. . . . .	18
Д м у х а й л о Е.И., О в с я н и к о в В.Г., В а с и н Н.В. Массопередача кислорода при поверхностной струйной аэрации. . . . .	21
Б у д е к а Ю.Ф., М о й ч е н к о В.А. Удаление гилса из оборотной воды с помощью ультразвука. . . . .	26
В и х р о в В.И. Прогноз весенних влагозапасов суглинистых почв под орошаемыми многолетними травами в Белоруссии. . . . .	29
К у м а ч е в В.И. Устойчивость нелинейной гидромелиоративной системы регули- рования водного режима почвы. . . . .	33
В а р н а к о в Н.М., Ш а т а л о в И.М., С т а в р о в а Т.В. Лабораторные исследова- ния полимерных фильтров для мелиоративных водозаборов из открытых водоемов . . . . .	37
И в а щ е к и н В.В., К о н д р а т о в и ч А.Н., П р о к о п ч у к Д.А. Эксперимен- тальное исследование газодинамического способа воздействия на фильтр и прифилтровую зону скважин. . . . .	41
Р о г у н о в и ч В.П. К определению приведенного коэффициента шероховатости не- однородных границ водотоков сложной формы сечения . . . . .	46
Б а м п и С.А. Определение положения гидродинамической оси в сечениях сложной формы. . . . .	48
Р о г у н о в и ч В.П., Ш н и п о в Ф.Д. Влияние поперечных течений на устойчивость русел трапециевидальных каналов . . . . .	52
К р и ч к о В.И. Исследование пересечений потоков на размываемых гидравлических моделях. . . . .	58
А з а н о в и ч А.Л., К у т а к о в С.И. Оценка погрешностей расчетов неустановивше- гося движения воды с помощью пакета прикладных программ. . . . .	63
Х а в и ч В.А. Метод расчета неустановившегося движения воды и его применение к математическому моделированию половодий. . . . .	67
Б о г о с л а в и ч П.М. Исследование кривых свободной поверхности на моделях грунтовых плотин при их размыве переливом . . . . .	71
Г а т и л л о С.П. Распределение давлений по дну сборного трубчатого сооружения . . . . .	75
Л а р ь к о в В.М. О гидравлике решетчатых водосливов. . . . .	79
П о в о р о т н ы й И.В., П р о к о п ч у к Д.А., К о з л о в Д.А. Влияние параметров насадков на развитие турбулентных затопленных струй . . . . .	89
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 методи- ка расчета двухконусного РЗУ с гидроимпульсной очисткой сетки . . . . .	95
Л е в к е в и ч Е.М., К о з л о в а Т.А. Исследование устойчивости частиц грунтового откоса при действии волн и грунтовых вод . . . . .	99
Л е в к е в и ч В.Е. Определение расчетных параметров береговой отмели, имеющей профиль равновесия с самоотмосткой . . . . .	103
С о б о л е в с к и й С.В. Расчет начальных напряжений и напорной фильтрационной функции в анизотропном водонасыщенном слое конечной толщины . . . . .	107
К у к с и н И.Е., Г о р б а ч е в а С.И. Международные стандарты по охране окружаю- щей среды. . . . .	114

## **ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО**

Выпуск 16

Зав. редакцией А.Я. Канторович

Редактор В.С. Шевчук

Мл. редакторы А.Я. Сыромятникова, Т.И. Крюčkова

Худож. редактор И.А. Демковский

Техн. редактор Л.И. Счисленок

Корректор Н.Б. Назарева

Верстатель М.К. Борисова



ИБ № 2429

Подписано в печать 30.12.86 г. АТ 13882. Формат 60 x 90 1/16. Бумага офсет. Офсет. печать. Гарнитура Универс. Усл.печ.л. 7,75. Ус.кр.-отт. 8,25. Уч.-изд.л. 9,23. Тираж 570 экз. Зак. 5004. Цена 1р. 50 к.

Издательство "Вышэйшая школа" Государственного комитета БССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 220048, Минск, проспект Машерова, 11.  
Типография "Победа". 222310, ул. Тавлая, 11.

Отпечатано с оригинала-макета, подготовленного в издательстве "Вышэйшая школа".

## РЕФЕРАТЫ

УДК 628.1/2.001.63 (–21) (476)

**Г а т и л л о П.Д.** Об учете интересов охраны рек на предпроектной стадии разработки систем водообеспечения городов БССР // Водное хозяйство и гидротехническое строительство. – 1987. – Вып. 16. – С.

Анализируется состояние разработок ТЭО (схем, обосновывающих материалов) водоснабжения, канализации и водного благоустройства городов республики. Рассматриваются недостатки этих разработок, а также соответствующие мероприятия в области решения водохозяйственных вопросов охраны рек от истощения и загрязнения. – Библиогр. 12.

УДК 556.53

**П л у ж н и к о в В.Н., Э л ь п е р В.Л.** Оценка использования воды промышленностью в бассейнах малых рек // Водное хозяйство и гидротехническое строительство. – 1987. – Вып. 16. – С.

Показан подход к оценке использования водных ресурсов, их воспроизводства и предотвращения загрязнения в бассейнах малых рек. Рассматриваются показатели повторного использования воды в промышленности, критерии оценки рациональности водопользования. – Табл. 1. Библиогр. 3.

УДК 624.514

**Г р и н е в и ч Л.А., Р у т к о в с к и й П.П.** Определение рациональных режимов использования противоаварийных резервных емкостей в инженерных системах защиты от наводнений // Водное хозяйство и гидротехническое строительство. – 1987. – Вып. 16. – С.

Рассмотрено применение противоаварийных резервных емкостей с целью обеспечения безаварийной работы инженерной системы защиты от наводнений в виде дамб обвалования. Предлагается управление процессом их заполнения при прохождении катастрофического паводка путем секционирования длины водосливного фронта. Предлагается методика определения рациональных режимов заполнения емкостей. – Табл. 2. Ил. 1. Библиогр. 6.

УДК 628.543

**В о р о н и н А.Г., О в с я н и к о в В.Г.** Очистка сточных вод горнодобывающих предприятий // Водное хозяйство и гидротехническое строительство. – 1987. – Вып. 16. – С.

Приводятся результаты экспериментальных исследований по очистке сточных вод горнодобывающих предприятий с использованием высокомолекулярных флокулянтов ВПК-101, ВПК-402. – Табл. 1. Ил. 2. Библиогр. 5.

УДК 628.356.3

**Д м у х а й л о Е.И., О в с я н и к о в В.Г., В а с и н Н.В.** Массопередача кислорода при поверхностной струйной аэрации // Водное хозяйство и гидротехническое строительство. – 1987. – Вып. 16. – С.

Рассматривается механизм процесса массопередачи кислорода из воздуха в жидкость при поверхностной струйной аэрации. Приводится критериальное уравнение этого процесса. — Ил. 3. Библиогр. 2.

УДК 628.3

Будека Ю.Ф., Мойченко В.А. Удаление гипса из оборотной воды с помощью ультразвука // Водное хозяйство и гидротехническое строительство. — 1987. — Вып. 16. — С.

Изложены результаты исследования стабилизации оборотной воды по сульфату кальция при обработке ее ультразвуком. Приведены уравнения для расчета остаточной концентрации сульфата кальция в воде в зависимости от рН, температуры, интенсивности и продолжительности озвучивания. — Табл. 2. Ил. 3. Библиогр. 4.

УДК 631.67:633.2/.3 :631.445.2 (476)

Вихров В.И. Прогноз весенних влагозапасов суглинистых почв под орошаемыми многолетними травами в Белоруссии // Водное хозяйство и гидротехническое строительство. — 1987. — Вып. 16. — С.

На основании анализа фактических данных о весенних влагозапасах суглинистых почв под многолетними травами установлена их статистическая связь с определяющими факторами. Полученные зависимости позволяют уточнить расчеты проектного режима орошения многолетних трав и могут использоваться при планировании их эксплуатационного режима орошения. — Табл. 1. Ил. 1. Библиогр. 3.

УДК 631.6

Кумачев В.И. Устойчивость нелинейной гидромелиоративной системы регулирования водного режима почвы // Водное хозяйство и гидротехническое строительство. — 1987. — Вып. 16. — С.

Предлагается использовать метод фазовых траекторий для анализа устойчивости мелиоративной системы управления водным режимом почвы. Полученные траектории позволяют оценить устойчивость уровня режима грунтовых вод при управлении. На конкретном примере выполнен графо-аналитический расчет устойчивости гидромелиоративной системы с заданными параметрами объекта и управляющего устройства. Показана эффективность метода фазовых траекторий для гидромелиоративных систем управления водным режимом почв. — Ил. 2. Библиогр. 11.

УДК 626.83.067.01

Варнаков Н.М., Шаталов И.М., Ставрова Т.В. Лабораторные исследования полимерных фильтров для мелиоративных водозаборов из открытых водоемов // Водное хозяйство и гидротехническое строительство. — 1987. — Вып. 16. — С.

Приведены методика и результаты лабораторных исследований прочностных свойств, пропускной способности, кольтматации и промыва полимерных фильтров (полиэтиленхолстов). Даются рекомендации по оптимальной компоновке полиэтиленхолстов для мелиоративных водозаборов из открытых водоемов. — Ил. 1. Табл. 2. Библиогр. 2.

УДК 628.112.24

Ивашечкин В.В., Кондратович А.Н., Прокопчук Д.А. Экспериментальное исследование газодинамического способа воздействия на фильтр и прифильтровую зону скважин // Водное хозяйство и гидротехническое строительство. — 1987. — Вып. 16. — С.

Приведены результаты лабораторных исследований параметров волн сжатия и фильтрационного потока в прифильтровой зоне обрабатываемого образца фильтра при использовании в качестве энергоносителя водородно-кислородной смеси. На основе скоростной киносъемки рассчитана энергия пульсаций парогазового пузыря при различном уровне заполнения взрывной камеры. — Ил. 3, Библиогр. 2.

УДК 556.536

**Р о г у н о в и ч В.П.** К определению приведенного коэффициента шероховатости неоднородных границ водотоков сложной формы сечения // Водное хозяйство и гидротехническое строительство. — 1987. — Вып. 16. — С.

Излагаются основы методики определения приведенного коэффициента шероховатости водотоков сложных поперечных сечений с неоднородными границами при однородном по длине течении. — Ил. 1, Библиогр. 3.

УДК 532.543

**Б а м п и С.А.** Определение положения гидродинамической оси в сечениях сложной формы // Водное хозяйство и гидротехническое строительство. — 1987. — Вып. 16. — С.

Предлагается метод нахождения гидродинамической оси в сечениях сложной формы с неоднородной шероховатостью на участках смоченного периметра для определения среднего значения коэффициента шероховатости и, следовательно, пропускной способности русла. — Ил. 1, Библиогр. 6.

УДК 532.543:627.41

**Р о г у н о в и ч В.П., Ш н и п о в Ф.Д.** Влияние поперечных течений на устойчивость русел трапецидальных каналов // Водное хозяйство и гидротехническое строительство. — 1987. — Вып. 16. — С.

Изложены результаты исследований по оценке влияния поперечных течений на устойчивость русел земляных каналов. Объяснены неравномерность распределения по периметру придонных характеристик движения потока и наблюдаемый механизм деформаций сечений каналов. Гидродинамически обоснованы значения параметра формы и угла откоса предельно-устойчивых русел трапецидальных каналов в мелкозернистых грунтах, а также предельные значения параметра формы устойчивого потока в "большом". — Ил. 3, Библиогр. 15.

УДК 532.5

**К р и ч к о В.И.** Исследование пересечений потоков на размываемых гидравлических моделях // Водное хозяйство и гидротехническое строительство. — 1987. — Вып. 16. — С.

Приводятся результаты исследований пространственной кинематики пересекающихся потоков. Дан анализ распределения продольных осредненных скоростей в плане и на вертикалях и рекомендации по оценке деформаций русла в местах пересечений по допускаемым на размыв динамическим скоростям. — Табл. 1, Ил. 2, Библиогр. 10.

УДК 566.048

**А з а н о в и ч А.Л., К у т а к о в С.С.** Оценка погрешностей расчетов неустановившегося движения воды с помощью пакета прикладных программ // Водное хозяйство и гидротехническое строительство. — 1987. — Вып. 16. — С.

Дается расчет водного режима сложных систем водотоков с помощью пакета при-

кладных программ. Для модельного объекта выполнены расчеты и оценены погрешности вычислений максимальных уровней и расходов. — Ил. 3. Библиогр. 2.

УДК 627.533.2:51.001.57

**Х а в и ч В.А. Метод расчета неустановившегося движения воды и его применение к математическому моделированию половодий // Водное хозяйство и гидротехническое строительство. — 1987. — Вып. 16. — С.**

Излагается метод расчета неустановившегося движения воды в реках. Для определения расходов предлагается использовать модель кинематической волны, а уровни вычислять по уравнению Сен-Венана. Приводится математическая модель, разностные схемы численного интегрирования, последовательность расчетов. Дается алгоритм расчета протекания воды через затопляемые дамбы. — Библиогр. 8.

УДК 627.83:532.533

**Б о г о с л а в ч и к П.М. Исследование кривых свободной поверхности на моделях грунтовых плотин при их размыве переливом // Водное хозяйство и гидротехническое строительство. — 1987. — Вып. 16. — С.**

Экспериментально подтверждены основные свойства неплавно изменяющихся течений в условиях разрушения грунтовой плотины при переливе воды через гребень. Получены зависимости отдельных параметров потока от напора на гребне и гранулометрического состава размываемого грунта. — Ил. 2. Библиогр. 6.

УДК 626.823

**Г а т и л л о С.П. Распределение давлений по дну сборного трубчатого сооружения // Водное хозяйство и гидротехническое строительство. — 1987. — Вып. 16. — С.**

Рассматриваются закономерности изменения результирующей силы гидродинамического давления потока воды в трубе и фильтрационного давления под сооружением в стыках по оси дна сборного трубчатого сооружения. — Ил. 2. Библиогр. 5.

УДК 627.83: 627.421

**Л а р ь к о в В.М. О гидравлике решетчатых водосливов // Водное хозяйство и гидротехническое строительство. — 1987. — Вып. 16. — С.**

Приведены аналитические решения уравнений, описывающих движение жидкости на наклонных решетчатых водосливах с потерей транзитного расхода вдоль пути. — Ил. 3. Библиогр. 2.

УДК 532.525.2

**П о в о р о т н ы й И.В., П р о к о п ч у к Д.А., К о з л о в Д.А. Влияние параметров насадков на развитие турбулентных затопленных струй // Водное хозяйство и гидротехническое строительство. — 1987. — Вып. 16. — С.**

На основании использования электрохимического метода измерения характеристик полей скорости в струйных потоках приводятся данные по закономерности затухания максимальной осевой скорости в затопленных турбулентных осесимметричных струях. Исследованы случаи истечения свободных и полуограниченных струй из насадков различного типа. Выявлено влияние формы изучавшихся насадков на начальном участке развития струи. — Табл. 1, Ил. 3. Библиогр. 6.

УДК 626.88

**Вопнярский И.П., Сидоров А.Н., Молочко А.В. Исследования и методика расчета двухконусного РЗУ с гидроразрывной очисткой сетки // Водное хозяйство и гидротехническое строительство. — 1987. — Вып. 16. — С**

Дается описание модели и результаты исследований дв конусного рыбозащитного устройства (РЗУ) с очистным устройством в виде укороченных динамических лопаток, создающих противоток воды, отпугивающий молодь рыбы и препятствующий оседанию мусора на сетке. На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований приводится методика расчета РЗУ. — Ил. 1. Библиогр. 2.

УДК 627.8

**Левкевич Е.М., Козлова Т.А. Исследование устойчивости частиц грунтового откоса при действии волн и грунтовых вод // Водное хозяйство и гидротехническое строительство. — 1987—Вып. 16. — С.**

Излагаются результаты экспериментальных исследований устойчивости частиц грунтового откоса при совместном воздействии волн и грунтового потока. Установлено, что при наличии фильтрационного потока в откосе начальные скорости трогания частиц грунта уменьшаются на 25—30 %.

Приводится графическая зависимость размывающих скоростей для частиц грунта различной крупности. — Табл. 1. Ил. 2. Библиогр. 5.

УДК 627.8.81:626.627

**Левкевич В.Е. Определение расчетных параметров береговой отмели, имеющей профиль равновесия с самоотмосткой // Водное хозяйство и гидротехническое строительство. — 1987. — Вып. 16. — С.**

Получены эмпирические зависимости для расчета профиля равновесной отмели у размываемых берегов водохранилищ, сложенных несвязными грунтами с повышенной неоднородностью при условии образования естественной самоотмостки. — Ил. 2. Библиогр. 6.

УДК 624.131.52

**Соболевский С.В. Расчет начальных напряжений и напорной фильтрационной функции в анизотропном водонасыщенном слое конечной толщины // Водное хозяйство и гидротехническое строительство. — 1987. — Вып. 16. — С.**

Рассматривается плоская деформация водонасыщенного ортотропного слоя грунта, подстилаемого жестким водоупором, в начальный период приложения внешней нормальной нагрузки. Даны формулы для определения напряжений и напорной фильтрационной функции для любого вида нагрузки в однократных интегралах. В окончательном виде представлены формулы для равномерно распределенной нагрузки. — Ил. 1. Библиогр. 7.

УДК 502 (083.74)

**Куксин И.Е., Горбачева С.И. Международные стандарты по охране окружающей среды // Водное хозяйство и гидротехническое строительство. — 1987. — Вып. 16. — С.**

Дается краткая характеристика и перечень международных стандартов по охране воды и воздуха, разработанный в рамках ИСО по состоянию на 1984 год. — Табл. 1. Библиогр. 6.