

М.Г. Красник, Р.И. Герман,  
Е.С. Санкович, В.И. Прокопович

## О ПЛАНОВОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В ОБХОД НАСЛОННОГО УСТОЯ ПЛОТИН ЗАПАННОГО ТИПА

На первоначальных водных путях во многих случаях представляется целесообразным использование переносных плотин запанного типа [1]. Они требуют сравнительно небольших затрат времени и труда на монтаж и демонтаж, что значительно повышает их эффективность.

Для обоснования метода гидротехнического расчета таких плотин в 1971 г. на кафедре водного транспорта леса и гидравлики БТИ им. С.М. Кирова были начаты исследования по изучению напорной фильтрации под гибкими флютбетами и в 1972 г. была разработана методика гидротехнического расчета напорной фильтрации. В 1973 г. были начаты опыты по изучению плановой фильтрации.

Основные опыты проводились в фильтрационном лотке: длиной 6000 мм, шириной 1800 мм, высотой стенок 1200 мм.

Первый опыт был проведен с целью изучения в лабораторных условиях процесса разрушения плановым потоком незащищенных откосов за наслонным устоем плотины. В качестве модели русла был принят канал трапецеидальной формы с размерами: ширина по дну 300 мм, коэффициент заложения откоса  $m = 2,0$ . Толщина водопроницаемого слоя 300 мм. В опытах использовался грунт – средний песок с коэффициентом неоднородности  $\eta = 6,8$ .

Модель флютбета и устоев была выполнена из технической резины толщиной 1 мм. Для изучения планового потока в обход плотины использовались пьезометры-скважины, оборудованные трубками из бронзовой сетки с размерами ячеек 0,05 мм.

При напоре 71 мм на откосе появились первые признаки его разрушения, которые выразились в виде оползней нижней части откоса у самого устоя. Они постепенно увеличивались в размерах и при напоре 83 мм достигли критических размеров, указанных на рис. 1.

Затем были поставлены опыты с устройством дренажа на откосе под наслонным устоем. Дренаж представлял собой трубчатый сетчатый фильтр. Место прикрепления дренажа в опытах менялось. Для отвода воды, попадающей в дренаж, в нижней части имелась трубка, уложенная вдоль откоса канала и выве-

Рис. 1. Вид разрушения откоса в трапециевидном русле при напоре  $H = 83$  мм:

а — откос нижнего бьефа;  
 б — урез воды в канале;  
 в — линия сопряжения откоса с дном;  
 г — стенка лотка; д — область разрушения.

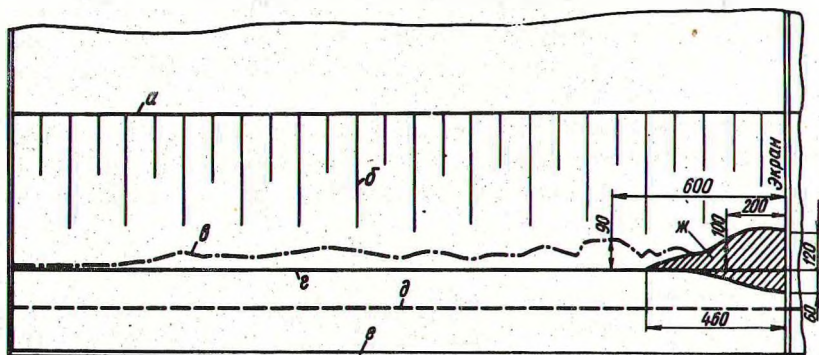
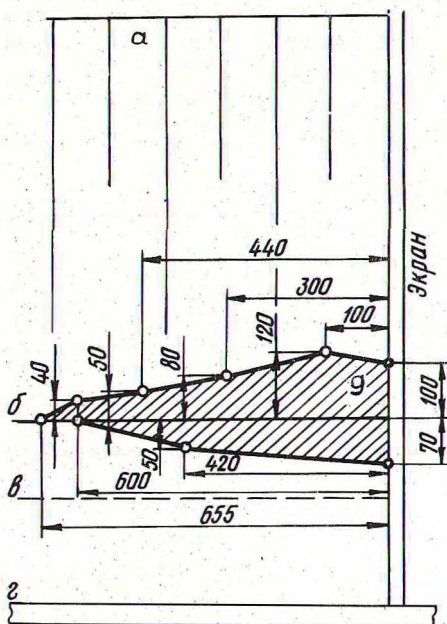


Рис. 2. Вид разрушения откоса в трапециевидном русле при наличии дренажа:

а — бровка откоса; б — нижний бьеф; в — линия высачивания;  
 г — урез воды; д — линия сопряжения;  
 е — стенка лотка; ж — область разрушения.

денная в нижний бьеф. Разрушения, полученные в этой серии опытов, показаны на рис. 2.

Были также поставлены опыты при наличии открылков у наклонного устоя. Они представляли собой резиновые полоски, прикрепленные в его нижней части. Полученные разрушения показаны на рис. 3.

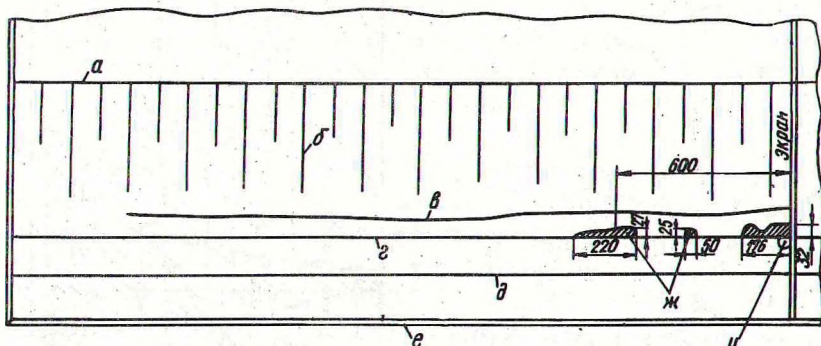


Рис. 3. Вид разрушения откоса при наличии открылков у наклонного устоя:

а — бровка откоса; б — нижний бьеф; в — линия высачивания; г — урез воды; д — линия сопряжения; е — стенка лотка; ж — область разрушения; и — выпор.

Все опыты с дренажом и открылками начинались с напора 80 мм, т.е. с напора, при котором в первом опыте появились критические разрушения откоса. Некоторые результаты опытов приведены в табл. 1.

Характерной особенностью процесса разрушения в первых двух сериях опытов было появление, в первую очередь, оползания откоса в подводной его части. При этом величина разру-

Таблица 1.

Тип защитного устройства	Размеры разрушений, мм		Напор, при котором разрушения достигли критических размеров
	длина вдоль потока	ширина	
Без защитного устройства	800	130	84
Дренаж	460	120	128
Низовой открылок	300	40	105



шений при наличии дренажа оказалась большей, чем при его отсутствии. На надводной же части откоса размеры разрушений при наличии дренажа уменьшились.

В опытах с открылками подводных разрушений вообще не наблюдалось. Таким образом, можно придти к заключению, что начало разрушений при отсутствии открылков было обусловлено причинами, не связанными с плановым потоком.

Одной из возможных причин появления оползания подводной части откоса явилась сосредоточенная фильтрация вдоль сопряжения откоса с дном канала. На этом переломе не было плотного прилегания флютбета к грунту.

Рассматривая систему сил гидростатического давления, действующих на гибкий флютбет у сопряжения откоса с дном, можно придти к заключению, что изгиб резиновой пластины в этом месте будет происходить без перелома по некоторой кривой, к которой касательны линии откоса и дна. Между этим изгибом и местом сопряжения откоса с дном и происходила сосредоточенная фильтрация. Анализ выходных градиентов по гидродинамической сетке, построенной в сечении за устоем, показывает, что разрушение в первую очередь должно произойти в области высачивания, непосредственно примыкающей к поверхности воды в нижнем бьефе, а не в подводной части откоса. При искусственном прижатии резины к углу, образованному откосом и дном, а также при наличии открылка источник сосредоточенной фильтрации ликвидируется и, как следствие, размеры оползания подводной части откоса уменьшаются. В этом случае наличие дренажа в значительной степени уменьшает выходные градиенты, в результате чего уменьшаются и размеры деформаций откоса над поверхностью воды в нижнем бьефе (рис. 1, 2). В связи с этим при оценке роли дренажа нами исключались из рассмотрения разрушения подводной части откоса. Сравнивались разрушения при наличии дренажа только в области высачивания над поверхностью воды в канале. Такое сравнение (рис. 1, 2) показывает, что эффективность трубчатого дренажа зависит от места его укладки, однако по сравнению с открылками она небольшая. Поэтому при укладке флютбета плотин запанного типа необходимо предусматривать некоторую планировку русла реки с тем, чтобы ликвидировать резкие переломы в его сечении. С учетом этого дальнейшие опыты по изучению плановой фильтрации проводились нами в руслах параболического сечения. Экран и флютбет были выполнены из тех же материалов, что и для трапецеидальных русел. Опыт начат с на-

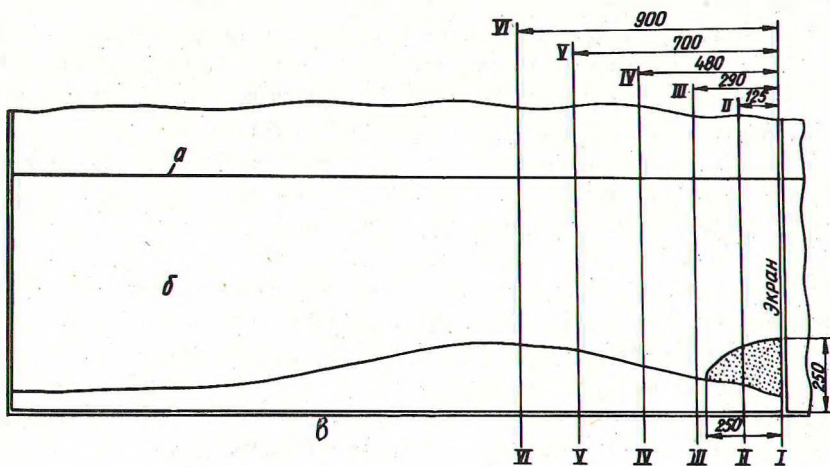


Рис. 4. Вид разрушения откоса в параболическом русле при напоре  $H = 204$  мм;  
 а — бровка откоса; б — нижний бьеф; в — стенка лотка.

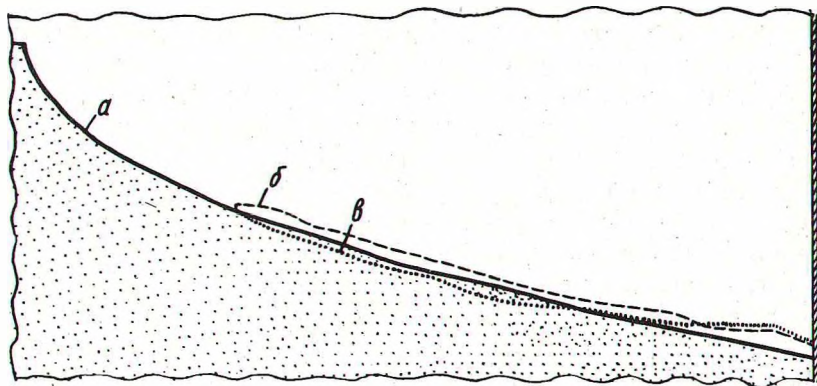


Рис. 5. Поперечный профиль русла в месте разрушения в сечении I — I;  $M1 : 4$ ;  
 а — теоретический профиль русла; б — деформация русла под воздействием грунтового потока; в — остаточная деформация после снятия напора.

пора 45 мм. Первые признаки разрушения появились при напоре 68 мм. При напоре 204 мм опыт был прекращен. На рис. 4 показаны размеры разрушений. Поперечный профиль в месте разрушения русла показан на рис. 5, 6.

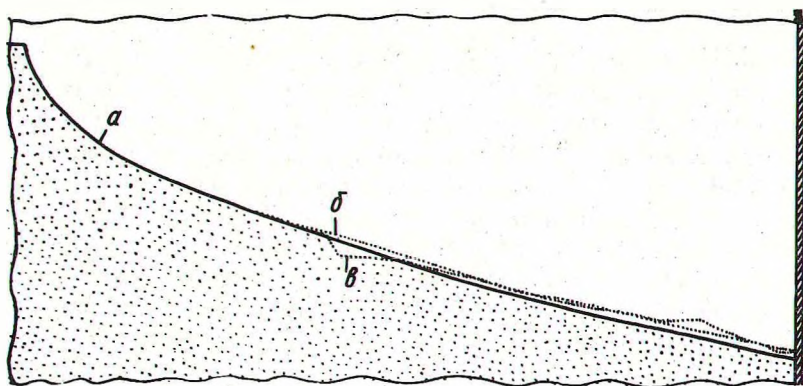


Рис. 6. Поперечный профиль русла в месте разрушения в сечении П - П; М1 : 4:  
 а — теоретический профиль русла; б — деформация русла под воздействием грунтового потока; в — остаточная деформация после снятия напора.

Предварительный анализ опытных данных показывает, что наилучшим из рассмотренных защитных устройств от разрушения откосов водотоков плановым фильтрационным потоком можно считать одиночные трубчатые фильтры, уложенные в грунт откоса. Форма поперечного сечения русла на начало разрушения откосов плановым фильтрационным потоком существенного влияния не оказала. Первые признаки разрушения в параболическом и трапецидальном руслах были замечены при напорах соответственно 55 мм и 54 мм. Однако русло параболической формы при повышении напора оказалось более устойчивым. Размеры образовавшихся в нем разрушений оказались значительно меньшими при напоре 205 мм, чем в опыте с трапецидальным руслом при напоре 102 мм. В опытах без защитных устройств первые признаки разрушений появились примерно при напоре 54 – 55 мм. Применение защитных устройств повышает эту величину в 2 раза.

С целью проверки полученных результатов были поставлены натурные опыты в полевой лаборатории ЦНИИЛесосплава на

Таблица 2

№ проб	1	2	3	4	5
$\eta$	3,44	3,04	3,07	3,82	6,28

р. Тайвоколе. В 1973 г. была произведена плановая и вертикальная съемка выбранного участка и подготовительные работы, которые заключались в удалении со дна реки свай, камней, завалов; была произведена также планировка дна и берегов реки и взяты пробы грунта. Коэффициент неоднородности по взятым пробам приведен в табл. 2.

По полученным данным произведен гидротехнический расчет плотины, выбрана длина флютбета. Для наблюдения за плановым потоком в период наполнения плотины и ее эксплуатации опытная площадка была оборудована наблюдательными скважинами.

Первый опыт был начат 29 сентября 1973 г. и продолжался в течение 22 суток, однако заметных изменений в структуре грунта на откосах в нижнем бьефе не наблюдалось.

Проведенные опыты по напорной фильтрации в 1972 г. показали, что оценку масштаба времени можно вести исходя из критерия Рейнольдса по формуле

$$\delta_t = \frac{\delta_p \delta_1^2}{\delta_\mu} = \frac{\delta_p \delta_1^2}{\delta_\nu \delta_p} = \frac{\delta_1^2}{\delta_\nu} \quad (1)$$

Так как в опытах применялась вода, то масштаб кинематической вязкости можно принять равным 1. Тогда масштаб  $\delta_t$  будет равен линейному масштабу  $\delta_1$  в квадрате, т.е.

$$\delta_t = \delta_1^2 = \frac{t_n}{t_\mu} \delta_1^2; \quad (2)$$

откуда

$$t_n = t_\mu \delta_1^2 \quad (3)$$

Это дает возможность заключить, что длительность натурального опыта недостаточна для выявления размеров и характера переработки берега.

В связи с этим 27 октября 1974 г. был начат повторный опыт. Однако из-за оползания и обвала правого берега в створе плотины опыт длился меньше 20 суток и был прекращен.



Анализ лабораторных и полевых опытов показал, что разрушение откоса за наклонным устоем плотины запанного типа зависит от вертикального размера зоны высачивания. Как видно из рис. 1, высота зоны высачивания вдоль берега нижнего бьефа уменьшается, и можно найти некоторую высоту, при которой разрушение грунта на откосе не происходит. Такое явление можно объяснить связью между градиентом фильтрационного потока у выхода на откос и высотой высачивания. Было также замечено, что если не изменять напора, полученное разрушение откоса не разрастается. При этом наблюдалось как явление суффозии, так и явление выпора. Явление суффозии, как указывает многими исследователями [3, 4, 5], относится к циклическому процессу. При этом если при заданном напоре произошла суффозия, то она может прекратиться при выносе определенной фракции грунта; если напор не увеличивать, то происшедшая суффозия может и не привести к разрушению откоса сооружения.

Наблюдения за зоной высачивания показали, что суффозия обычно происходит в конце зоны высачивания, а выпор — в начальной ее части, примыкающей к устью.

А.Н. Патрашев [5] явление выноса (механической суффозии) делит на циклы, каждый из которых соответствует определенному напору и определенному диаметру выносимых частиц. При некотором цикле в период его максимального развития может произойти нарушение устойчивости первоначальной структуры грунтового скелета, которое вызовет полное разрушение откоса.

Проектирование гидротехнических сооружений постоянного типа обычно ведется из условия невозможности появления первого цикла выноса, который считается началом разрушения. В плотинах же запанного типа с гибким экраном и флютбетом, которые должны поддерживать напор в данном створе реки продолжительностью не более 100—120 дней [3] в навигационный период, первый цикл может не считаться началом разрушения.

Выпор представляет собой такое разрушение грунта, при котором приходит в движение часть объема грунта со всеми слагающими его фракциями. При выпоре, как правило, часть грунта, отделившаяся от всего массива, увеличивается в объеме, при этом увеличивается как пористость, так и размеры пор этой части грунта. Е.А. Замарин [3, 4] различает две разновидности выпора: в первом случае намечается легкое выпучивание грунта, т.е. увеличение в объеме некоторой части его, которое сопровождается разрушением его первоначальной



структуры. Этот вид разрушения происходит чаще, чем вторая его разновидность, которая представляет собой отдельные бьющиеся ключики (грифоны) из мелких частиц.

В опытах чаще наблюдалась первая разновидность выпора непосредственно у низового обреза устоя. При этом первое же появление выпучивания грунта приводило непосредственно к его сползанию с откоса (рис. 5). Как видно из рис. 5, 6, этот вид деформации наблюдался в области больших значений высоты высачивания.

Основным условием выпора неподвижного слоя является равенство градиента сопротивления, в этом слое насыпному весу последнего

$$\frac{\Delta P}{l_0} = (\gamma_t - \gamma) (1 - \epsilon_0), \quad (4)$$

где  $\Delta P$  — перепад давления в слое;  $\gamma_t$  — удельный вес твердой фазы;  $\gamma$  — удельный вес воды;  $\epsilon_0$  — начальная пористость;  $l_0$  — размер слоя до выпора.

Если учесть, что это происходит на откосе, то предельные допустимые градиенты для фильтрации, направленной вертикально вверх, должны быть несколько увеличены в зависимости от коэффициента заложения откоса.

В качестве исходных допустимых градиентов могут быть приняты предложенные нами расчетные градиенты для напорной фильтрации [2].

#### Л и т е р а т у р а

1. Борисовец Ю.П. Переносная плотина запанного типа.— "Лесная промышленность", 1971, № 11.
2. Отчет по теме "Исследование и составление методики гидротехнического расчета плотины запанного типа с гибким экраном". Минск, 1972.
3. Замарин Е.А. Движение грунтовых вод под гидротехническими сооружениями. М., 1931.
4. Замарин Е.А. Расчет движения грунтовых вод. Ташкент, 1928.
5. Патрашев А.Н. Напорное движение грунтового потока, сопровождающееся выносом мелких частиц грунта. Л., 1938.