

С. Х. Будыка, М. Г. Красник, С. С. Лебедь,  
В. И. Прокопович

## О ПРИЛЕГАНИИ ГИБКОГО ФЛЮТБЕТА К ГРУНТУ ОСНОВАНИЯ В ПЛОТИНАХ ЗАПАННОГО ТИПА

Эффективность использования на лесосплаве гидротехнических сооружений, регулирующих сток, доказана как теоретически, так и многолетним опытом их эксплуатации. В настоящее время весьма перспективным для этих целей представляется использование плотины запанного типа [1], состоящей из гибкого флутбета, укладываемого на дно русла, и установленного над ним гибкого экрана, перекрывающего поток и удерживаемого в створе посредством двух лежней. Лежни (тросы) крепятся за береговые опоры. Детальная разработка конструкции этой плотины потребовала исследования ряда вопросов. Один из них — изучение условий плотного прилегания гибкого флутбета к грунту основания. Достичь плотного прилегания флутбета к грунту весьма трудно, так как дно перед укладкой не профилируется. Кроме того, под водой нельзя убрать образовавшиеся при укладке всякого рода неровности. Предполагается, что плотное прилегание флутбета к грунту основания происходит после начала фильтрации за счет разности давлений поверхностного и грунтового потоков.

В связи с этим задачей исследований являлось выявление процесса уплотнения флутбета и оптимальных условий его укладки, обеспечивающих последующее уплотнение.

Для решения поставленной задачи в лаборатории водного транспорта леса и гидравлики Белорусского технологического института была создана специальная установка, состоящая из лотка длиной 6000 мм, шириной 1800 мм, высотой 1200 мм и водооборотного устройства (рис. 1). Кроме того, использовался специально оборудованный лоток длиной 6000 мм, шириной 300 мм и высотой стенок 1500 мм. При этом необходимо было выявить влияние формы русла, материала флутбета, напора и характера рельефа дна на плотность прилегания флутбета к грунту основания.

Критерием плотного прилегания служило сравнение эпюр противодействия и фильтрационных расходов опытов с гладкой поверхностью грунта и с неровностями. В связи с этим была принята следующая методика проведения опытов.

В лотке моделировалось русло правильной формы в виде канала трапецеидального сечения. В связи с тем, что русла рек в естественном состоянии имеют эллиптическую или параболическую форму поперечного сечения, без резких переломов, то было решено принять русло трапецеидального сечения как наиболее выгодное с точки зрения прилегания флутбета к грунту русла, и ограничиться одной этой формой. Были приняты следующие размеры канала: ширина по дну — 30 см, глубина наполнения — 34 см, коэффициент заложения откосов в опытах  $m=2,0$  (рис. 2). Толщина водонепроницаемого слоя  $T=40$  см. Ширина канала была принята таких размеров, чтобы поставленные в средней

части флютбета пьезометры давали показания, близкие к полученным при решении плоской задачи.

Для проведения опытов в этом лотке принят грунт — средний песок. Угол внутреннего трения этого песка: табличный  $33^\circ$  (сухого) и  $28^\circ$  (влажного), опытный соответственно  $34^\circ$  и  $29^\circ$ .

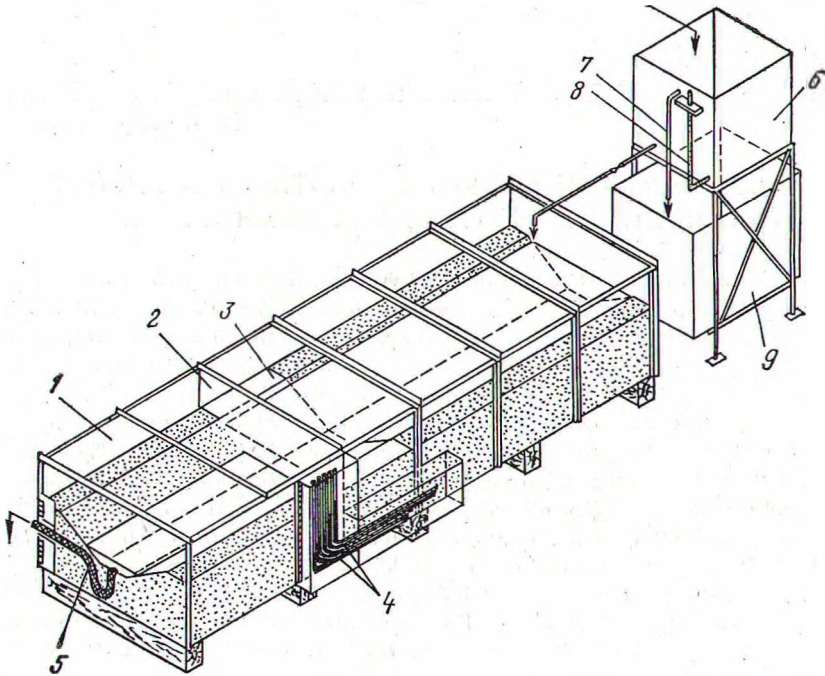


Рис. 1. Схема установки по выявлению процесса уплотнения флютбета: 1 — фильтрационный лоток; 2 — плотина; 3 — флютбет; 4 — пьезометры; 5 — шланг измерения фильтрационного расхода; 6 — верхний бак; 7 — сливная трубка; 8 — водомерное стекло; 9 — нижний бак.

Перед устройством канала грунт предварительно смачивался. Уплотнение грунта производилось трамбовкой равномерно для предотвращения появления отдельных переуплотненных мест и слоев.

В качестве материала для модели флютбета использовалась техническая резина. Опыт повторялся несколько раз — при гладком грунте и с различными неровностями. Для получения неровностей использовались камни, которые укладывались под модель флютбета. При этом предполагалось, что при некотором давлении камни будут полностью охвачены резиновым флютбетом. Камни укладывались вблизи пьезометров, чтобы те сигнализировали о работе флютбета. Величина отношения площади неровностей к общей площади флютбета рассматривалась как основной параметр, влияющий на изменение фильтрационного расхода и противодавления в зависимости от условий прилегания модели флютбета к грунту основания. Задавались несколькими значениями высоты неровностей и их расположением в плане.

Для измерения противодавления использовались пьезометры (10 пьезометров в верхнем бьефе и один — в нижнем). Схема расположения пьезометров показана на рис. 2. Пять из них (1, 2, 3, 4, 5) устанавливались под моделью флютбета в осевом продольном створе. Количество пьезометров выбрано с таким расчетом, чтобы сохранить структуру грунта. Кроме того, 5 точек достаточно для оценки криволинейной эпюры противодавления. По длине флютбета эти пьезометры расположены с большей плотностью на выходе фильтрационного потока.

Для того чтобы оценить плотность прилегания модели флютбета,

в точках сопряжения откоса канала и дна установлены пьезометры 6 и 7, показания которых сравнивались соответственно с показаниями 2 и 4 пьезометров, установленных в осевом створе; пьезометры 8 и 9 установлены на середине откоса; 10 и 11 — соответственно в нижнем и верхнем бьефах за пределами линии тока.

После установки пьезометров к жесткому экрану, выполненному из органического стекла и имеющему форму поперечного сечения канала, прикреплялась модель гибкого флюتبета длиной  $L=60$  см. Экран крепился к ферме из металлических уголков. Вся конструкция устанавливалась в канал, причем ферма с экраном жестко, с помощью болтов, крепилась к стенкам лотка, а модель флюتبета укладывалась на подготовленный грунт. Для создания герметичности в месте соединения модели флюتبета с экраном стык промазывался воском. При установке экран был приподнят над грунтом, чтобы соблюдалась подвижность гибкого флюتبета. Верховой край модели флюتبета плотно прижимался к грунту бронзовым прутком.

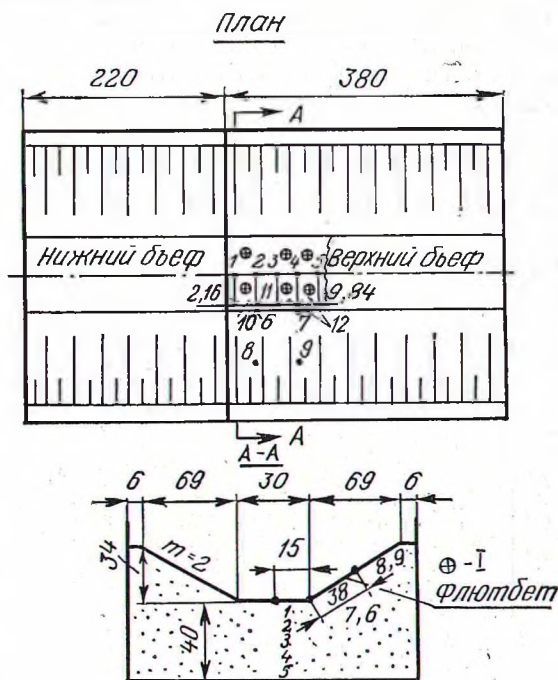


Рис. 2. Схема расположения пьезометров в лотке:

1 — камни, расположенные под флютбетом.

После установки флюتبета начиналось заполнение верхнего бьефа водой. Заполнение велось медленно с тем, чтобы не зацемить воздух в порах грунта. В опытах использовались вода из водопроводной сети. Для предотвращения появления микроорганизмов применялись гербициды и хлорамин, которые регулярно заливались в верхний напорный бак.

Изменение напора производилось при установившихся показаниях пьезометров и неизменном фильтрационном расходе. Это объясняется тем, что теоретическая модель, служащая эталоном для решения поставленной задачи, имеется для установившегося движения. Средняя продолжительность опытов составляла от 7 до 20 суток в зависимости от шага увеличения напора и от времени установления постоянных фильтрационных расходов.

Напор в верхнем бьефе создавался в пределах возможного, до 40 см, чтобы не разрушить откосы канала. Шаг увеличения напора выбран от 20 до 90 мм в зависимости от характера рельефа дна (большой шаг — при гладком дне, меньший — при наличии неровностей) для получения точного значения напора, при котором начинается плотное прилегание флюتبета к грунту. За плотностью прилегания модели флюتبета к грунту в верхнем бьефе и состоянием грунта в нижнем бьефе велись визуальные наблюдения.

Для определения теоретического напора с целью сравнения его с опытным использовалось гидромеханическое решение Н. Н. Павловского для схемы — плоский незагубленный флютбет при конечной глубине водопроницаемого слоя из однородного грунта.

Первые два опыта были поставлены без неровностей под флютбетом и предназначались для получения эталонных данных.

На рис. 3 даны кривые расходов всех пяти опытов. Как видно из рисунка, связь между напором и расходом в первом опыте линейная только в начале опыта, примерно до напора 140 мм. При большем напоре имеется тенденция перехода ее в криволинейную, что связано с оползанием откосов в нижнем бьефе, обусловленным плановой фильтрацией. Так как флютбет на откосе представляет собой наклонный устой

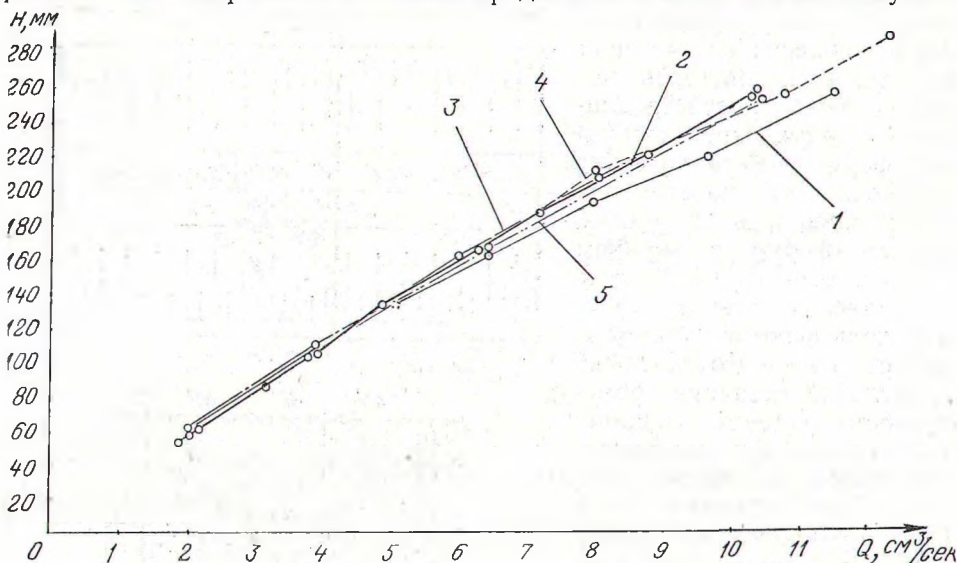


Рис. 3. Схема опытов 1—5.

без заглубленных в откос конструкций, плановая фильтрация вокруг него и вызвала оползание откоса за плотиной. Поэтому в опыте 2 и во всех последующих опытах откосы канала в нижнем бьефе за плотиной укреплялись гравелистой отсыпкой с наклонным обратным фильтром. В эту конструкцию была также включена мелкоячеистая (0,063 мм) металлическая сетка.

Следует также отметить, что опыт 2 производился без поднятия флютбета и каких-либо нарушений в грунте основания после опыта 1. Поэтому можно считать, что самозаглубление флютбета и стабилизация основания произошла в опыте 1, тем более что в опыте 2 максимальный напор (258 мм) был меньше, чем в опыте 1 (284 мм). Поэтому в качестве эталона приняты данные этого опыта.

Для проведения дальнейших опытов по выявлению влияния всякого рода неровностей под флютбетом на его плотное прилегание к грунту принято, как основное правило, избегать каких-либо изменений в укладке флютбета на откосах и в низовой его части.

В опытах 3, 4 и 5 под флютбет, не нарушая его низовую часть, были уложены небольшие камни, имитирующие неровности дна. Камни укладывались с таким расчетом, чтобы создавалось местное выпучивание вблизи какого-либо пьезометра и общий подъем флютбета на некотором участке, охватывающем несколько пьезометров.

В опыте 3 было уложено два камня: у пьезометров 2 и 5 (см. рис. 2). Действующий напор в опыте изменялся от 86 мм до 282 мм шагом 50 мм. Сравнивая данные опытов 2 и 3, можно прийти к заключению, что в месте укладки камня при малых напорах имеется неплотное прилегание флютбета, которое сказывается и на показаниях соседнего пьезометра. При этом давление в полости около камня несколько выше, чем при отсутствии его. Это указывает на уменьшение потерь напора под

флютбетом, вследствие чего требуется дополнительное давление поверхностного потока для плотного прилегания флютбета при наличии неровностей.

В опыте 4 число камней было увеличено до четырех. Камни располагались у пьезометров 3 и 5, а также между пьезометрами 2 и 6, 4 и 7 на расстоянии 7,5 см соответственно от пьезометров 2 и 4 (см. рис. 2). Действующий напор изменялся от 57 мм до 290 мм шагом 35—60 мм.

Анализ данных показывает, что четыре камня приподняли флютбет так, что образовалась сплошная полость. Дальнейшее увеличение напора несколько уменьшило размеры полости со стороны верхового конца флютбета, однако стабильности в размерах полости не наступало, очевидно за счет пульсации давлений под флютбетом. Сравнивая кривые расходов опыта 4 и опыта 2 (рис. 3), можно считать, что расходы практически не изменились.

В опыте 5 число неровностей увеличено до шести, расположены они в два ряда параллельно пьезометрам. На рис. 2 показана схема расположения этих неровностей. Действующий напор изменялся от 78 мм до 252 мм шагом 50—90 мм.

При сопоставлении показаний пьезометров в этом опыте с эталонными (опыт 2) можно прийти к заключению, что месторасположение неровностей весьма чувствительно сказывается на характеристике фильтрационного потока. Так, в опыте 5 при напоре 52,5 мм, несмотря на большое наличие камней, показания пьезометров дают основания предполагать, что флютбет был прижат ко всем пяти пьезометрам. Так как камни расположены в два ряда параллельно пьезометрам, достаточно небольшого давления, чтобы резина в промежутке между камнями изогнулась и прилегла к грунту, что и обусловило работу пьезометров. Как и в предыдущих опытах, заметных изменений в фильтрационных расходах грунтового потока не наблюдалось.

В жестких флютбетах образование щелей вдоль горизонтальных элементов контура происходит обычно весьма часто. Это обусловлено рядом причин: неравномерностью осадки основания, отсутствием плотного прилегания жесткого флютбета к основанию при его подготовке к укладке, деформацией жесткого флютбета под воздействием разного рода нагрузок и другими причинами. Раскрытие щели вдоль горизонтального участка контура приводит, как указывается в литературе, к нежелательным явлениям, как-то: увеличение фильтрационного расхода, повышение напора в выходном фрагменте флютбета и др. [2, 3].

В проведенных опытах созданные нами искусственные щели имели размеры в начальный момент, равные высоте камней, т. е. в пределах от 17 до 28 мм, при этом длина щели вдоль фильтрационного потока была наибольшей в опыте 4 и достигала 36 см при длине флютбета 60 см. Показания пьезометров 6 и 7 в указанном опыте свидетельствовали о неплотном прилегании флютбета и вдоль подошвы откоса. Таким образом, общая площадь щели составляла больше 50% от горизонтальной части флютбета. Однако фильтрационный расход по сравнению с эталоном, а также с опытами 3 и 5 практически остался неизменным (рис. 3).

Таким образом, можно прийти к заключению, что наличие продольных горизонтальных щелей практически весьма незначительно влияет на величину фильтрационного расхода.\* Проведенные по этому поводу исследования Б. И. Коротковым [3] для жестких флютбетов привели его к следующей зависимости, обуславливающей увеличение фильтрационного расхода под сооружением

$$\frac{l}{T} \geq 1,5 \frac{S}{T} + 1,0,$$

где  $l$  — длина горизонтального участка контура, вдоль которого раскрывается щель;  
 $T$  — расчетное заглубление водоупора;  
 $S$  — длина шпунта.

Учитывая, что в наших опытах заглубление флютбета  $S=0,04L$  [4], найдем

$$\frac{l}{T} = \frac{36}{40} < 1,5 \frac{0,04 \times 60}{40} + 1,0,$$

$$0,9 < 1,09.$$

Таким образом, и по данным Б. И. Короткова [3] получается, что увеличение фильтрационного расхода не должно было наблюдаться.

Однако нами был поставлен дополнительный опыт по выявлению влияния щелей под гибким флютбетом на величину фильтрационного расхода. Он проводился в лотке размерами  $6000 \times 300 \times 1500$  (мм). В качестве флютбета принята резина радиозондовой оболочки. Длина модели флютбета 45 см, ширина по дну 30 см. Действующий напор изменялся от 125 мм до 296 мм шагом 30—50 мм. Щель имитировалась путем поднятия оболочки (флютбета). Вначале была создана щель диаметром 5 см, которая постепенно увеличивалась до размера 17 см. Затем началось увеличение напора. При увеличении напора диаметр щели уменьшался. В конце опыта при напоре 260—280 мм диаметр щели уменьшился до 9,5 см. Щель была заполнена водой, а в верхней части — воздухом.

В процессе опыта велись наблюдения за фильтрационным расходом и давлением фильтрационного потока под флютбетом.

Отметим в первую очередь, что в конце опыта за счет отсутствия возможности щели уменьшатся под давлением, началась вибрация оболочки.

Анализ данных показывает, что при действующем напоре до 200—250 мм плотного прилегания материала флютбета за границами приподнятой части его не было, в связи с чем величина фильтрационного расхода была значительно больше, чем в подобных опытах без щели. Плотное прилегание наступило в основном в момент уменьшения щели до диаметра 9,5 см, когда расходы данного опыта оказались сопоставимыми с подобными без щели.

Анализ опытных полученных данных [4] показал, что наиболее опасным является случай, когда щель расположена близко к верхнему бьефу и движение еще не установилось. В этом случае может начаться самозаглубление флютбета перед щелью и намыв грунта в щель.

Таким образом, можно прийти к заключению, что наличие щели, изолированной от верхнего и нижнего бьефов, не вносит существенных изменений в гидродинамическую характеристику установившегося грунтового потока под флютбетом. Однако наличие щели в начальный момент работы флютбета, после его укладки при неустановившемся движении грунтового потока, может привести к деформации грунта под флютбетом, а также увеличивает вероятность сообщения щели с нижним или верхним бьефами. Поэтому крупные камни должны удаляться с мест укладки флютбета; кроме того, гибкость материала флютбета должна быть больше, а его толщина меньше, чем меньше проектируемый напор на сооружение. После укладки флютбета необходимо также принудительное прижатие верхнего и нижнего краев его к грунту основания. Верхний край прижимается достаточно тяжелой цепью или тросом. Желательно также такое прижатие осуществлять и по линии контакта флютбета с экраном, которое будет компенсировать неплотное прилега-

ние флютбета к экрану в начальный момент поднятии напора. В дальнейшем это прижатие должно осуществляться за счет вертикальной составляющей давления воды на экран.

Следует также указать, что при выборе места для установки плотины необходимо отдавать предпочтение участкам реки, имеющим слегка вогнутое дно по направлению течения, и избегать участков с большой выпуклостью дна.

#### *Литература*

1. Ю. П. Борисовец. Переносная плотина запанного типа. Лесная промышленность, № 11, 1971.
2. С. М. Проскурников. Новые расчетные данные по фильтрации под лесосплавными и другими плотинами. — ЦНИИЛесосплава. Сб. научных трудов по лесосплаву, № 2, М.—Л., 1957.
3. Б. И. Коротков. Оценка роли горизонтальных путей фильтрации при проектировании подземного контура плотин на нескольких основаниях. — Автореф., Л., 1960.
4. Отчет по теме: «Исследование и составление методики гидротехнического расчета плотины запанного типа с гибким экраном», раздел 4. БТИ им. С. М. Кирова. Мн., 1972.