

8. В дальнейшем рассматриваем условный расчетный откос (высотой  $H_{\text{усл}}$ ), сложенный неводонасыщенным сыпучим грунтом с объемным весом  $\gamma_{\text{ср}}$  и углом внутреннего трения  $\varphi$ .

9. Коэффициент запаса устойчивости расчетного откоса определяется по преобразованной известной формуле [4]:

$$K_{\text{зап}} = \frac{\text{tg } \varphi_{\text{расч}}}{\text{tg}(\alpha + \theta_z)},$$

Резюме. Рассматривается расчетная схема оценки общей устойчивости, основания на конформном отображении откосного поля фильтрационных сил в полуплоскость.

### Л и т е р а т у р а

1. Баранов Н.Н. Расчет динамической устойчивости водонасыщенного откоса методом конформного преобразования областей. - В сб.: Водное хозяйство Белоруссии. Вып. 2. Минск, 1972.
2. Павловский Н.Н. Приток грунтовой воды к каналам и рекам и возникающие при этом фильтрационные силы. Собр. соч., т. 2. М.-Л., 1956.
3. Соболевский Ю.А. Криволинейные очертания однородных откосов. Минск, 1969.
4. Указания по расчету устойчивости земляных откосов. ВСН 04-71. Л., 1971.
5. Чугаев Р.Р. Земляные гидротехнические сооружения (теоретические основы расчета). Л., 1961.

УДК 627.83:532.55

В.М.Ларьков, канд.техн.наук

### ФОРМЫ ПРОСТРАНСТВЕННОГО СОПРЯЖЕНИЯ БЬЕФОВ И РЕЖИМЫ ДВИЖЕНИЯ ПОТОКА ЗА ДОННЫМИ ТРУБЧАТЫМИ ВОДОСБРОСАМИ

Сопряжение бьефов за водосбросными гидротехническими сооружениями осуществляется, как правило, в условиях пространственной задачи. Пространственное сопряжение бьефов отличается от плоской задачи характером движения потока, особенностью форм сопряжения и условиями их возникновения.

Большинство исследований, посвященных вопросу пространственного сопряжения бьефов [1-7], выполнены с открытыми (безнапорными) потоками, без учета влияния режима работы сооружения и формы струи в начальном створе. Однако в них не дается полного представления об особенностях его форм и режимов, в частности недостаточно освещена сбойная форма течения в нижнем бьефе и способы борьбы с ней.

Цель наших исследований заключалась в изучении форм сопряжения и условий их возникновения за напорными трубчатыми водосбросами. Исследования проводились на модели с трубами прямоугольного сечения  $0,1 \times 0,1$  м в гидравлическом лотке переменной ширины  $B$  и охватывали диапазон числа  $\beta = B/b_0 = 2-8$  и числа Фруда  $Fr_0 = V_0^2/g h_0 = 1,5-16$  ( $b_0$  - ширина сосредоточенного потока). При проведении опытов использовались данные М.З.Абрамова [1], Ф.И. Пикалова [7] и М.А. Михалева [6].

Приведем результаты исследований бурных потоков.

1. Основные формы сопряжения бьефов. В работах [2, 7, 1, 6] описаны разнообразные формы сопряжения бьефов в пространственных условиях. Отсутствие классификации форм пространственного сопряжения затрудняет их изучение и усложняет задачу расчета и проектирования нижнего бьефа водосбросных сооружений. В связи с этим предлагается все формы пространственного сопряжения объединить в основные группы, классифицируя их по режиму движения потока в нижнем бьефе.

На основании анализа литературного материала, а также результатов наших исследований и наблюдений [5] можно выделить следующие основные формы сопряжения: 1) свободное растекание (рис. 1,а); 2) свободное растекание с образованием прямого прыжка (рис. 1,б); 3) сбойное бурное течение (рис. 1,в); 4) сбойное спокойное течение (рис. 1,г).

Свободное растекание характеризуется образованием листа растекания, возникновением косых прыжков и волн возмущения. Такая форма сопряжения наблюдается при отсутствии влияния глубины нижнего бьефа  $h_{н.б}$  на картину растекания потока, т.е. когда  $h_{н.б} < h_{к.р}$ .

Свободное растекание потока возможно в относительно широком русле при незначительной глубине нижнего бьефа. Область симметричного свободного растекания предлагается делить на три зоны: первая - зона расширения, вторая - косых прыжков, третья - зона отраженных волн.

Косые гидравлические прыжки возникают в створе максимального расширения потока в результате интерференции волн возмущения, образующихся на границе твердой стенки. В местах образования косых прыжков наблюдается резкое увеличение глубины воды и значительная концентрация удельных расходов. На участке фронта косого прыжка происходит изменение глубины потока и направления линий тока листа растекания.

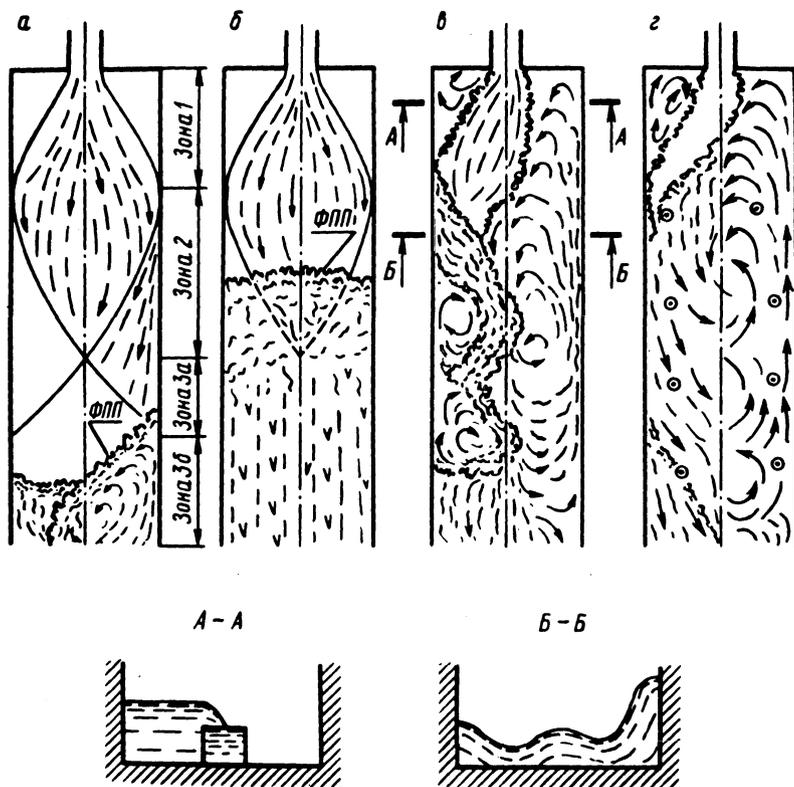


Рис. 1. Формы пространственного сопряжения бьефов при  $\beta = 2$  (а),  $\beta = 3$  (б),  $\beta = 4$  (в),  $\beta = 8$  (г).

В первой зоне, которая располагается между выходным сечением трубы и створом максимального растекания, происходит расширение сосредоточенного потока шириной  $b_0$  до максимальной ширины  $b$ .

Вторая зона расположена между створом максимального расширения и точкой встречи косых прыжков - точкой С. В этой зоне можно выделить три характерные течения: цент-

ральное или транзитное ядро течения и два боковых, ограниченных фронтом косых прыжков и боковыми твердыми границами (стенками).

В третьей зоне, ниже точки встречи косых прыжков, образуется результирующая волна. Фронт этой волны при симметричном растекании распространяется вдоль потока, а при несимметричном растекании повернут в сторону ближнего берега. Волны возмущения, образующие косые прыжки, продолжая движение ниже точки С, вызывают систему отраженных волн небольшой высоты.

Геометрические и кинематические параметры потока в каждой зоне свободного растекания зависят от относительной ширины нижнего бьефа  $\beta = B_1/b_0$ , числа Фруда  $Fr_0$ , глубины нижнего бьефа  $h_{н.б}$ , а также от уклона свободной поверхности струи в начальном сечении [5].

При определенных граничных условиях в третьей зоне возникает прямой гидравлический прыжок (рис. 1,а), который с увеличением бытовой глубины перемещается во вторую зону. Так образуется форма подтопленного свободного растекания, которая (рис. 1,б) представляет собой начальный участок свободного растекания, подтопленный прямым гидравлическим прыжком, ниже которого движение потока близко к плоскому. Прямой гидравлический прыжок возникает при глубине нижнего бьефа  $h_{н.б} > h_{кр}$ . С увеличением бытовой глубины фронт прямого прыжка (ФПП) перемещается вверх по течению. При этом картина свободного растекания бурного потока выше фронта прыжка не изменяется.

Режим сопряжения в форме подтопленного свободного растекания можно отнести к благоприятному: происходит более интенсивное гашение избыточной кинетической энергии, за прямым прыжком возникает спокойный поток с выравненным удельным расходом по всей ширине отводящего русла. Однако эта форма сопряжения может существовать в весьма узком диапазоне колебания уровня нижнего бьефа:

$$h_{сб} > h_{н.б} > h_{кр} ,$$

где  $h_{сб}$  - глубина нижнего бьефа, при которой фронт прямого прыжка переходит в первую зону и спокойный несбойный режим течения в нижнем бьефе переходит в сбойное течение.

Форма бурного сбойного течения (рис. 1, в) характеризуется образованием больших и малых водоворотных зон по обе стороны транзитной бурной струи, которая, как правило,

имеет криволинейную динамическую ось. Эту форму сопряжения отличает резко выраженная неравномерность эпюры скоростей и удельных расходов по живому сечению и вдоль пути движения, и ее следует считать наиболее тяжелой и неблагоприятной для работы устройств нижнего бьефа и гашения избыточной кинетической энергии сбросного потока.

Сбойное бурное течение возникает при прорыве фронта прямого прыжка из второй зоны свободного растекания через створ максимального расширения в первую зону. Установлено, что форма сбойного бурного движения возникает и существует при глубине нижнего бьефа

$$h_{\text{пр}}^{\text{II}} > h_{\text{н.б}} > h_{\text{сб}},$$

где  $h_{\text{пр}}^{\text{II}}$  – глубина нижнего бьефа, обеспечивающая затопление бурного потока на выходе из отверстия трубы. Ликвидировать сбойную форму бурного течения можно путем снижения уровня воды в нижнем бьефе до так называемой предельной глубины  $h_{\text{пр}}$ . Как показали опыты, глубина нижнего бьефа  $h_{\text{н.б}} \ll h_{\text{сб}}$ , т.е. наблюдается так называемый гистерезис уровней воды при смене форм свободного растекания с образованием прямого прыжка на сбойное бурное течение в прямой и обратной последовательности.

Форма спокойного сбойного течения вызывает повышенный интерес у исследователей и проектировщиков, поскольку при этой форме сопряжения создаются наиболее благоприятные условия гашения избыточной кинетической энергии и требуется наиболее легкое крепление нижнего бьефа. Установлено, что форма сбойного движения спокойного потока имеет ряд разновидностей или типов. Возникновение того или иного типа зависит от формы выходных отверстий и их расположения относительно оси отводящего русла, режима работы водосбросных отверстий и степени бурности потока.

В технической литературе нет единой точки зрения на результаты исследований сбойной формы спокойного потока. Например, даже сам факт перехода от сбойного движения бурного потока в сбойное течение спокойного потока в условиях пространственной задачи одни авторы называют гидравлическим прыжком, другие – просто спокойным течением, третьи – затоплением бурного потока. На наш взгляд, исходя из принятых в гидравлике понятий, явление перехода от бурного состояния в спокойное следует называть гидравлическим прыжком, в каких бы условиях он не возникал.

Опыты с прямоугольными напорными трубчатыми водосбросами позволили выявить два характерных типа сбойного движения спокойного потока: образование вертикального вальца при несимметричном одностороннем затоплении транзитной струи на выходе из трубы (рис. 1, г) и форму симметричного двустороннего затопления транзитного потока с образованием системы небольших вертикальных вальцов-водоворотов [1].

В первом случае образуется большой вертикальный валец, который захватывает всю ширину сопрягающего русла, прилегающего к водосбросу. В этом водовороте, как и в горизонтальном вальце плоского прыжка, происходят значительные потери кинетической энергии воды. Наблюдается также существенное различие в положении границы раздела водоворотной области пространственного прыжка. Глубина нижнего бьефа, при которой происходит затопление бурного потока и образование прыжка в пространственных условиях, должна удовлетворять условию  $h_{н.б.} \geq h_{пр}^{II}$ .

2. Определение граничных условий возникновения спокойного и бурного сбойных течений в нижнем бьефе. Исследования показывают, что режим сопряжения бьефов в условиях пространственной задачи значительно отличается от плоской задачи кинематической структурой потока, а также формами сопряжения и условиями их существования.

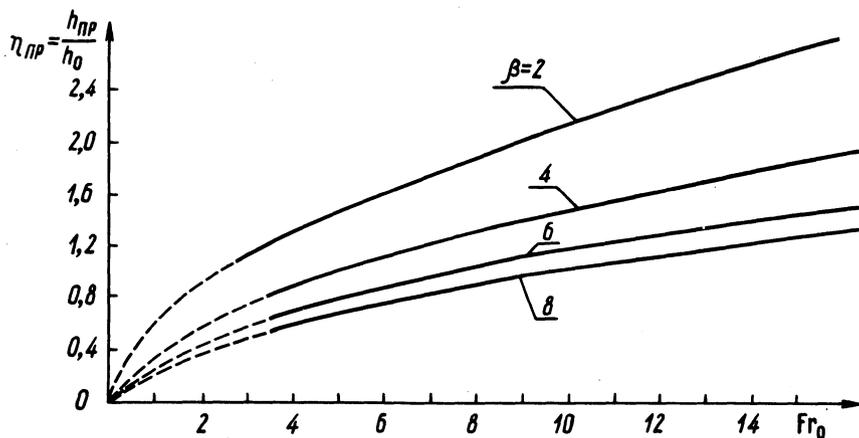


Рис. 2. Определение предельной глубины нижнего бьефа  $h_{пр}$ .

Форма сопряжения бьефов зависит прежде всего от глубины нижнего бьефа. Следовательно, чтобы установить характер течения потока и картину сопряжения, необходимо знать,

при какой глубине  $h_{н.б}$  возникает и существует та или иная форма и режим движения. Граничные значения глубины нижнего бьефа  $h_{пр}$ ,  $h_{сб}$  и  $h_{пр}^H$  определялись опытным путем.

Результаты исследования условий возникновения форм сбойного движения бурного потока представлены на графиках  $\eta_{пр} = f(\beta, Fr_o)$ , построенных для горизонтальной трубы, работающей в напорном режиме (рис. 2). Как видно, на величину предельной глубины  $h_{пр}$  влияет относительная ширина нижнего бьефа  $\beta$ , степень бурности потока  $Fr_o$ , а также форма струи в начальном створе [5]. Чем больше значение числа  $Fr_o$  и чем меньше относительная ширина  $\beta$ , тем больше глубина  $h_{пр}$  и шире диапазон существования второй формы сопряжения.

Получена зависимость для определения предельной глубины нижнего бьефа  $h_{пр}$ :

$$\eta_{пр} = \frac{1}{2\beta} \left( 1 - 0,36 \sqrt{1 - \frac{1,1}{\beta + 0,1}} \right) \left( \sqrt{1 + 8Fr_o \beta - 1} \right), \quad (1)$$

где  $\eta_{пр} = h_{пр} / h_o$  - относительная предельная глубина;  $h_{пр}$  - верхняя предельная глубина, при которой в нижнем бьефе еще существует устойчивая форма подтопленного растекания;  $h_o = h_{тр}$  - глубина потока в начальном створе (на выходе из трубы).

Глубина нижнего бьефа  $h_{сб}$ , при которой возникает форма сбойного бурного потока, также определялась опытным путем. В результате обработки опытных данных получена следующая эмпирическая зависимость для определения глубины  $h_{сб}$ :

$$\eta_{сб} = \sqrt[3]{\alpha Fr_o \frac{\beta + 2}{\beta^2}}. \quad (2)$$

Для определения глубины  $h_{н.б} = h_{пр}^H$ , при которой в условиях внезапного расширения сопрягающего русла происходит смена сбойного движения бурного потока на спокойный режим сбойного течения, предложен ряд способов и зависимостей:

М.З.Абрамовым [1]:

$$\frac{2Fr_o(1-\eta)}{\eta} = 1 - \eta\beta + (\beta - 1) \left( 1 + \frac{2(\eta - 1)}{m+1} + \frac{(\eta - 1)^2}{2m+1} \right);$$

Д.И.Куминым [4]:

$$\frac{A}{\xi_1} + \frac{\xi_1^2}{2} = \frac{A^2}{\xi_2} + \frac{\xi_2^2}{2};$$

Ф.И.Пикаловым [7]:

$$\frac{2\alpha q_1}{g} (V_2 - V_1) = h_1^2 - h_2^2.$$

При небольшой относительной ширине  $\beta$  нижнего бьефа используют основное уравнение гидравлического прыжка или функцию прыжка, которую для условий пространственной задачи и прямоугольного русла можно записать в виде

$$-\frac{2\alpha^1 q_1}{g} (V_1 - V_2) = \beta h_2^2 - h_1^2 \text{ или } 2\alpha^1 Fr_1 \left(1 - \frac{V_2}{V_1}\right) = \beta \eta^2 - 1.$$

Чтобы выяснить, какой из этих способов и при каких условиях можно рекомендовать для напорных трубчатых водосбросов, были проведены экспериментальные исследования и расчеты по определению глубины затопления  $h_{пр}^{II}$  при относительной ширине нижнего бьефа  $\beta = 2, 3, 4, \text{пр } 8$  и начальных числах Фруда  $Fr_0 = 1, 2 - 20$ .

Результаты исследований представлены на рис. 3. Полученные данные показывают, что отклонения от опытного значения глубины  $h_{пр}^{II}$  составили: для плоской задачи 7,2 - - 43,5%, по Ф.И. Пикалову - (+33,5) - (+90)%, по М.З.Абрамову - (-21,1) - (+14,3)%, по Д.И. Кумину - (-27,2) - - (-0,2)%, по прыжковой функции, записанной для пространственных условий, - (-90) - (+75)%. Такие значительные отклонения, на наш взгляд, заключаются в различии ограничительных предположений и исследованных типов пространственной формы затопленного прыжка.

На основании анализа полученных данных для расчета глубины затопления  $h_{пр}^{II}$  бурного потока за напорными прямоугольными трубчатыми водосбросами можно рекомендовать способ М.З.Абрамова при  $\beta > 4$  в широком диапазоне чисел  $Fr_0$  и при  $\beta < 4$ , если  $Fr_0 < 10$ , и метод Д.И.Кумина при  $Fr_0 < 10$ .

Таким образом, можно сделать следующие выводы: 1) классификация форм пространственного сопряжения бьефов по ре-

жиму движения потока дает четыре основные формы сопряжения: свободное растекание, свободное растекание с образованием прямого прыжка, сбойное движение бурного потока, сбойное течение спокойного потока; 2) предложенные зависимости для определения граничных значений глубин нижнего бьефа позволяют установить диапазон существования характерных

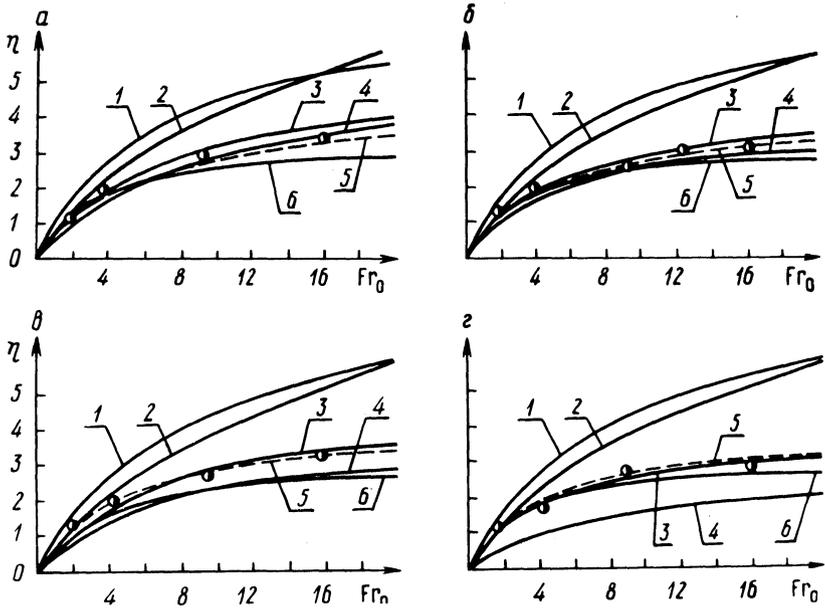


Рис. 3. Определение сопряженных глубин, рассчитанных различными методами: 1 - плоская задача; 2 - по Д.И.Кумину [4]; 3 - по М.З.Абрамову [1]; 4 - по Ф.И.Пичалову [7]; 5 - по прыжковой функции; 6 - опытные данные.

форм пространственного сопряжения бьефов; 3) для расчета глубины затопления  $h_{пр}^{II}$  бурного потока в пространственных условиях за напорными трубчатыми водосбросами рекомендуется использовать способ М.З.Абрамова при  $\beta > 4$  в широком диапазоне числа  $Fr_0$  и при  $\beta < 4$ , если  $Fr_0 < 10$ , а также способ Д.И.Кумина при  $Fr_0 < 10$ . Область, ограниченная числом  $Fr_0 > 10$  и значениями  $\beta < 4$ , не имеет приемлемых способов расчета глубины  $h_{пр}^{II}$ .

Резюме. При расчете режима сопряжения бьефов в пространственных условиях необходимо учитывать глубину нижнего бьефа, а также форму и режим движения потока в начальном (выходном) сечении.

## Л и т е р а т у р а

- 1.Абрамов М.З. Определение сопряженных глубин при гидравлическом прыжке в пространственных условиях. - "Изв. ВНИИГ", 1940, т.26.
2. Гунько Ф.Г. Методика гидравлических расчетов нижних бьефов многопролетных плотин на равнинных реках при маневрировании затворами. М.-Л., 1957.
3. Константинов М.Н. Особенности движения потока в отводящем русле малых водопропускных сооружений при свободном растекании. - В сб.: Работа нижних бьефов гидросооружений. М., 1969.
4. Кумин Д.И. Сопряженные глубины гидравлического прыжка в пространственных условиях. - "Гидротехническое строительство", 1950, № 2.
5. Ларьков В.М. Влияние угла наклона свободной поверхности струи в начальном сечении на растекание бурных потоков. - В сб.: Мелиорация и гидротехника. Т.81. Горки, 1971.
6. Михалев М.А. К вопросу о кинематической структуре потока при сопряжении бьефов по типу отброшенной струи. - "Труды координационных совещаний по гидротехнике", 1963, вып. 7.
7. Пикалов Ф.И. О форме сопряжения быстротока с нижним бьефом. - "Труды ВНИИГиМ", т. 12, 1935.

УДК 532.5:627.83

В.И.Кузменков, канд.техн.наук,  
И.П.Вопнярский, канд.техн.наук

### ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РЕЖИМ В НИЖНЕМ БЬЕФЕ ШЛЮЗА-РЕГУЛЯТОРА ПРИ ОТВОДЕ ПОТОКА

ПОД УГЛОМ  $\frac{\pi}{2}$

В практике мелиоративного строительства сопряжение каналов младшего и старшего порядков в большинстве случаев осуществляется под углом  $\frac{\pi}{2}$ .

Нами проведены лабораторные исследования однопролетного шлюза-регулятора, установленного в устье канала младшего порядка при впадении его в канал старшего порядка. Общий вид исследованного сооружения, включающего шлюз-регулятор