

6  
А-63

Лож

МВ и ССО РСФСР

Ленинградский ордена Ленина политехнический институт  
имени М. И. Калинина

---

*На правах рукописи*

+

Ю. Б. ПОЛЕТАЕВ

**ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ РУСЛА НА РАЗМЫВ  
И ОБЩИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ДВИЖЕНИЯ  
НА ЗАКРУГЛЕНИЯХ УЗКИХ ТРАПЕЦЕИДАЛЬНЫХ КАНАЛОВ**

(05.278 — гидравлика и инженерная гидрология)

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Министерство высшего и среднего специального образования  
Р С Ф С Р

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
имени М.И. КАЛИНИНА

На правах рукописи

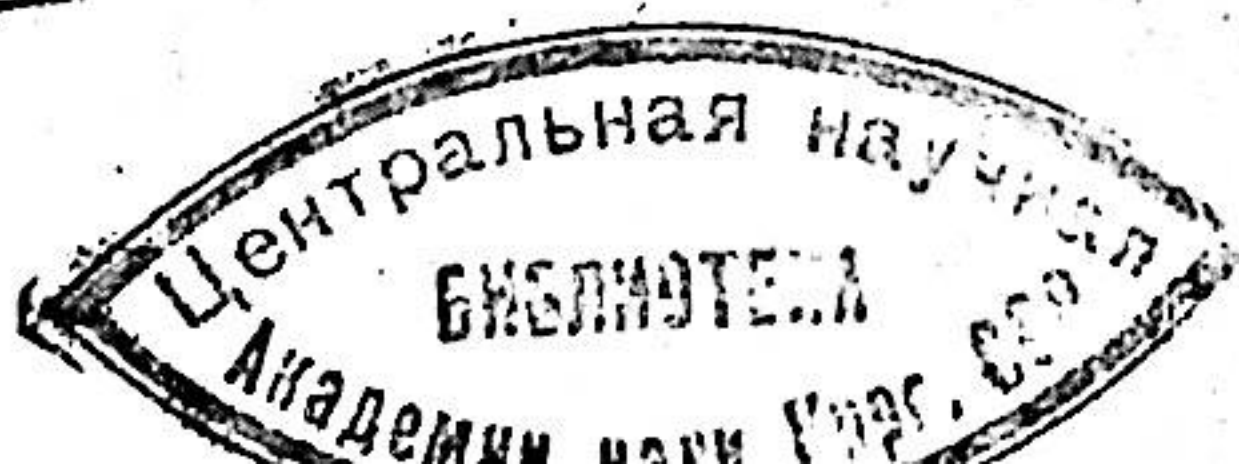
О.Б. ПОЛЕТАЕВ

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ РУСЛА НА РАЗМЫВ,  
И ОБЩИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ДВИЖЕНИЯ НА  
ЗАКРУГЛЕНИЯХ УЗКИХ ТРАПЕЦЕИДАЛЬНЫХ КАНАЛОВ

( 05.278 - гидравлика и инженерная гидрология )

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

1971



26.8  
3  
Работа выполнена на кафедре инженерных мелиораций  
енинградского политехнического института им. М.И.Кали-  
нина в 1963 - 1970 гг.

Научный руководитель - заслуженный деятель науки и  
техники РСФСР, доктор технических наук, профессор  
П.Д. Глебов.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, про-  
фессор М.А. Михалев, кандидат технических наук А.А. Кру-  
чинина.

Ведущее предприятие - Северный научно-исследователь-  
ский институт гидротехники и мелиорации.

Автореферат разослан " " 1971 г.

Защита диссертации состоится " " 1971 г.  
на заседании Совета гидротехнического факультета Ленин-  
градского ордена Ленина политехнического института име-  
ни М.И.Калинина (Ленинград, К-251, Политехническая ул.,  
29, гидротехнический корпус, ауд. 208).

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной  
библиотеке института.

Ученый секретарь Совета  
гидротехнического факультета:

М.А. Михалев.

## ГЛАВА 1.

### СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА О ДВИЖЕНИИ ЖИДКОСТИ НА ПОВОРОТЕ ВОДОВОДА.

Еще Сен-Венан, один из первых исследователей рассмат-  
риваемого явления, сказал, что задача о движении жидкости  
на закруглении способна привести в отчаяние. С тех пор  
опубликовано несколько сотен работ, посвященных данному  
вопросу, однако проблема до сих пор далека от полной яс-  
ности, что объясняется сложностью явления и трудностью  
проведения соответствующих точных экспериментов.

Между тем знание закономерностей движения потока, име-  
ющего искривление в плане, совершенно необходимо при ре-  
шении целого ряда вопросов, таких как: выяснение закон-  
мерностей меандрирования русел рек и защита их берегов  
от размыва; разработка способов инженерного воздействия  
на поток с целью улучшения условий судоходства; проекти-  
рование и расчет водозаборных сооружений; регулирование  
водоприемников осушительных систем; расчет криволинейных  
песколовков и отстойников; обеспечение неразмываемости и  
незаиляемости русел каналов и т.д.

В реферируемой работе дается краткий обзор и анализ  
результатов исследований движения жидкости на повороте  
водовода, которые провели М. Буссинеск, Н.Е. Луковский,  
А.Я. Милович, М.А. Дементьев, В.М. Маккавеев, И.В. Потапов,  
Н.Ф. ДANELIA, М.П. Кожевников, С. Мокмор, А. Шукри, И.Л. Ро-  
зовский, А.К. Ананян, Г.И. Замбахидзе, Х. Хевер, В.М. Ляхтер  
и А.И. Прудовский, А. Иппен и П. Дринкер, Т.А. Амброладзе,  
Е. Месер, Я. Мурамото и др.

Суммируя результаты теоретических и экспериментальных  
работ названных авторов, можно отметить ряд противоречий

и недостаточно изученных вопросов.

1. Большинство зависимостей, существующих для определения радиальных составляющих скорости ( $U_r$ ) на закруглении, получены для относительно широких русел на основе решения уравнения, предложенного впервые В.М.Маккавеевым, и имеют вид:

$$U_r = U_{\text{ср.}} \cdot \frac{h}{r} \cdot f(\eta) \quad (1)$$

где  $U_{\text{ср.}}$  - средняя по вертикали тангенциальная (продольная) скорость;  $h$  - глубина;  $r$  - радиус закругления;  $\eta = \frac{z}{h}$  - относительное расстояние от дна.

Вид функции  $f(\eta)$  полностью определяется принятым законом распределения продольной скорости ( $U_z$ ) по вертикали. Различные законы дают совершенно различный характер зависимости  $U_r$  от шероховатости русла (от коэффициента Шези -  $C$ ).

При выводе зависимостей типа (1) принимается большое количество допущений, наиболее уязвимыми из которых являются гипотезы относительно напряжений трения (принимаются на основе полуэмпирических теорий турбулентности), допущение об осесимметричности потока и допущение о неизменности эпюры распределения  $U_z$  по вертикали на закруглении. Возможность применения обычных законов распределения коэффициента турбулентной вязкости по вертикали к движению на закруглении, где характеристики турбулентности изменяются и слабо изучены, находится под сомнением. Второе и третье допущения плохо согласуются между собой, т.к. в сечениях, где движение уже можно считать осесимметричным, распределение  $U_z$  по вертикали совершенно отлично от того, которое наблюдается в прямолинейном русле.

Четкие рекомендации о пределах применимости зависимостей (1) по величине  $\frac{B}{h}$  отсутствуют ( $B$  - ширина потока), хотя, как показывает эксперимент, интенсивность поперечной циркуляции и характер распределения  $U_r$  по вертикали в значительной мере зависят от указанного параметра.

Обратно пропорциональная зависимость между  $U_r$  и  $r$  не проверена опытом в больших диапазонах изменения радиуса закругления и при постоянстве параметра  $\frac{B}{h}$ .

2. Как показывают многочисленные опыты (М.И.Тер-Асвацианян, И.Л.Розовского, Т.И.Яковлевой и др.), на закруглении происходит непрерывное перераспределение скоростей  $U_{\text{ср.}}$  по ширине потока. Метод расчета  $U_{\text{ср.}}$  на повороте, предложенный И.Л.Розовским, качественно правильно отражает явление, однако для получения количественного соответствия результатов расчета опыту требуется введение в расчетную зависимость опытного корректива.

3. Как отмечает И.Л.Розовский, вероятность возникновения водоворотных зон на закруглении зависит не только от величины относительного осевого радиуса закругления ( $\frac{r_0}{B}$ ), но в значительной степени от формы и относительных размеров поперечного сечения русла; влияние последних факторов изучено слабо.

4. Изменение характеристик турбулентности на закруглении почти не изучено; по данным единственного опыта Е.Месера интенсивность турбулентности у вогнутого берега в конце короткого крутого поворота уменьшается по сравнению с прямолинейным потоком.

5. И.Л.Розовский впервые предложил методику расчета коэффициента уменьшения размаивающей скорости на закруглении ( $k$ ), согласно которой:

$$k = \frac{\bar{V}_{r.кр.}}{\bar{V}_{r.прям.}} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \quad (2)$$

где  $\bar{V}_{r.кр.}$  - величина размаивающей скорости на закруглении;  $\bar{V}_{r.прям.}$  - то же, в прямолинейном канале;  $k_1, k_2, k_3, k_4$  - коэффициенты, учитывающие соответственно: 1) увеличение на закруглении максимальной  $U_{\text{ср.}}$ ; 2) то, что эта скорость наблюдается на вертикали над откосом, где глубина потока меньше; 3) то обстоятельство, что придонные скорости у вог-

нутого берега направлены вниз по откосу; 4) относительное увеличение скоростей у дна на закруглении (И.Л.Розовский принимает  $k_4 = 1$ ).

Описания методика, являясь первой попыткой подобного рода, не лишена недостатков. Так, например, для прямоугольного сечения  $k_2 = k_3 = 1$ , т.е., казалось бы, прямоугольное русло при жестких боковых стенках должно быть заметно менее подвержено разрыву на повороте, чем, скажем, параболическое. Это предположение не подтверждается двумя соответствующими опытами И.Л.Розовского. Кроме того коэффициент  $k_3$ , вычисляемый по формуле Б.А.Пинкина, быстро уменьшается с увеличением крутизны откоса и в значительной мере определяет величину  $k$ . Между тем названная формула не учитывает пульсаций направления скорости, которые у вогнутого берега в конце закругления могут быть гораздо меньше, чем в прямолинейном русле.

А.Иппен и П.Дринкер сделали попытку оценить сравнительную устойчивость русла на разрыв в прямолинейном широком трапецидальном канале и на его закруглении различных радиусов путем определения касательных напряжений на стенках канала с помощью поверхностной трубки Пито. По ряду причин точность полученных результатов была невысока, опытами на размываемых моделях эти результаты не проверены - все это снижает их ценность.

Как видно, круг недостаточно изученных особенностей явления довольно широк. Попытка ответить на некоторые из отмеченных вопросов сделана в описываемой ниже работе.

## ГЛАВА 2.

### ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ОПЫТЫ ПО ИЗУЧЕНИЮ ОБЩЕЙ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ И ДЕФОРМАЦИЙ РУСЛА НА ЗАКРУГЛЕНИЯХ ГИДРАВЛИЧЕСКИ НАИВЫГОДНЕЙШИХ ТРАПЕЦИДАЛЬНЫХ КАНАЛОВ.

Наряду с попыткой внести посильный вклад в изучение общего вопроса о движении жидкости на повороте открытого

русла, настоящая работа имела своей целью разработку практических рекомендаций по обеспечению неразрывности закруглений трапецидальных каналов, близких к гидравлически наиболее выгодным. Такие каналы с коэффициентом заложения откосов ( $m$ ) порядка  $1,5 \pm 2,0$  широко представлены в практике гидротехнического строительства и некоторые из них, например, транспортирующие осушительные каналы, часто имеют много поворотов. Поскольку движение на закруглениях таких каналов никем не изучалось, было решено провести предварительные опыты.

Задачами предварительных опытов были: 1) изучение возможных особенностей явления в узких трапецидальных каналах, 2) определение критических значений относительного осевого радиуса, при которых возможно образование водоворотных зон, 3) изучение поля продольных и радиальных скоростей на закруглении, 4) наблюдения за процессом деформаций русла канала на прямолинейном подводящем участке и на закруглении.

В основных опытах решался вопрос, являющийся центральным в реферируемой работе, - сравнивалась устойчивость русла на разрыв в прямолинейном канале и на закруглении. При этом: 1) изучались поля донных скоростей на закруглениях по окружностям и кривым пересеченных радиусов - клотоидам, 2) определялись коэффициенты  $k$  на размываемых моделях, 3) решался вопрос о возможности оценивать устойчивость русла попорачивающего канала на разрыв по результатам измерения донных скоростей на жестких моделях.

Часть предварительных опытов проводилась на бетонных моделях с закруглениями по окружностям  $r_0 = (1,65 \pm 3)B$ , по клотоидам, при длине ос. равной длине окружности радиуса  $r_0 = 3B$ , и на модели с расширением русла канала в первой половине поворота и сужением - во второй. Прочие параметры модели были следующие:  $m = 1,75$ ;  $h = 6,0 \pm 9,3$  см;  $\beta_0 = \frac{b}{h} = 0,13$ , угол поворота -  $\theta = 70^\circ$ .

Наблюдался турбулентный спокойный поток. Радиальные

скорости вычислялись по величине  $U_\theta$  и углу  $\alpha$  между направлением скорости и касательной к оси канала, измеренному с помощью шелковой нити.

В опытах при  $r_0 \leq 2,5B$  наблюдалось образование водоворотных зон на закруглении. Грубо приближенный анализ явления показывает, что для всех вертикалей, где  $U_{cp}$  меньше величины:

$$U_{cp,0} \cong \bar{V} \sqrt{\frac{B}{r_0}} \quad (3)$$

течение у вогнутого берега в начале поворота может быть направлено навстречу основному потоку ( $\bar{V}$  - средняя по сечению скорость). Зависимость (3) не дает количественно точного решения вопроса, но позволяет сделать вывод о том, что вероятность отрыва пограничного слоя от стенки находится в прямой зависимости от неравномерности распределения скоростей по ширине потока.

С некоторым запасом на основании предварительных опытов и опытов А.Иппена и П.Дринкера для предотвращения образования водоворотных зон на закруглениях трапециевидальных каналов при  $m = 1,5 \div 2,0$  рекомендуется принимать:

$$r_0 \geq 3B \quad (4)$$

Распределение радиальных скоростей по сечению на закруглениях рассматриваемых каналов совершенно отлично от того, что наблюдается в широком русле и следует из зависимостей типа (1). Так, в опытах И.Л.Розовского нулевые радиальные скорости отвечали точкам с  $\eta = 0,4 \div 0,5$ , а в изучаемых каналах  $U_r = 0$  при  $\eta = 0,3 \div 0,4$ . Донные  $U_r$  в узком канале в отличие от широкого намного превосходят поверхностные. Наконец, характер зависимости  $U_r$  от радиуса закругления также не соответствует формуле (1): при увеличении радиуса закругления от  $1,65B$  до  $3B$ , т.е. примерно в 1,8 раза,  $U_r$  уменьшается лишь в  $1,3 \div 1,4$  раза.

Заметное уменьшение радиальных скоростей в данном сечении над откосами начинается с вертикалей, где глубина составляет около 50% от глубины  $h_{max}$  на оси потока.

Процесс перераспределения продольных скоростей по ширине и глубине потока вдоль закругления выглядит качественно таким же, как и в хорошо изученных с этой точки зрения широких прямоугольных руслах. Придонные  $U_\theta$  в прямолинейном канале на большей части длины откоса и на оси канала примерно равны по величине.

Опыты на размываемых моделях показали, что в прямолинейном узком трапециевидальном канале наиболее подвержены размыву откосы, а не горизонтальное дно канала, как это предполагает описанная выше методика И.Л.Розовского.

При постепенном увеличении средней скорости течения во всех предварительных опытах первые размывы зафиксированы на продолжении откоса вогнутого берега, сразу за концом поворота. После образования первой гряды и при дальнейшем увеличении  $\bar{V}$  размывы быстро распространяются вниз по течению, захватывая оба берега, - образуется своеобразный пережат. Распространение размывов вверх по кривой даже на крутом повороте ( $r_0 = 1,65B$ ) ограничивается серединой закругления, а размывы на входе в поворот крайне незначительны.

Для окружности  $r_0 = 5B$  и соответствующей по длине клоуиды коэффициенты  $k$  оказались примерно одинаковыми и равными  $k = 0,84 - 0,85$ .

На основании результатов предварительных опытов, а также с учетом исследований И.Л.Розовского и опытов Е.Месера может быть предложена следующая методика определения коэффициента уменьшения размывающей скорости на закруглении:

$$k = k_{U_{cp}} \cdot k_{U_{дон}} \cdot k_{U'} \quad (5)$$

где  $k_{U_{cp}}$  - коэф., учитывающий увеличение  $U_{cp}$  у вогнутого берега на закруглении и определяющийся путем прямого сравнения средних скоростей на сходственных вертикалях в прямолинейном канале и на закруглении;  $k_{U_{дон}}$  - коэф., учитывающий относительное увеличение донных  $U_\theta$ ;  $k_{U'}$  - коэф., отражающий изменение интен-

сивности турбулентности на закруглении ( судя по данным Э.Месера,  $k_v' > 1$  ).

И созданием при современной степени изученности явления путей определения коэффициентов  $k_{v_{дон}}$  и  $k_v'$  расчетным способом не видно, поэтому зависимость ( 5 ) практической ценности пока не имеет.

### ГЛАВА 3.

#### ИЗМЕНЕНИЕ ПОЛЯ ПРОДОЛЬНЫХ СКОРОСТЕЙ ПО ДЛИНЕ ЗАКРУГЛЕНИЯ.

Уравнение И.Л.Розовского, с помощью которого можно решать задачу о распределении скоростей  $U_{cp}$  на закруглении, имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( r \int_0^h v_r \cdot v_\theta \cdot dz \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \int_0^h v_\theta^2 \cdot dz \right) = 0 \quad ( 6 )$$

Зависимость ( 6 ) может быть получена путем использования теоремы об изменении количества движений в тангенциальном направлении применительно к элементарному отсеку жидкости, ограниченному дном, свободной поверхностью и боковыми гранями  $\theta = Const$  и  $r = Const$ , а также в предположении, что силы трения в отдельной плановой струйке уравниваются силами тяжести.

Как видно, для практического использования формулы ( 6 ) необходимо знать законы распределения по сечению скоростей  $v_\theta$  и  $v_r$ .

Изучение распределения продольных скоростей по сечению прямолинейного канала производилось на подводных участках восьми моделей и в специальном опыте на модели длинного прямого канала. Было найдено, что распределение  $v_\theta$  по вертикали лучше всего описывается логарифмической формулой при среднем значении постоянной Кармана  $\alpha = 0,45$ .

Для определения скоростей  $U_{cp}$  на различных вертикалях

прямого канала предложена эмпирическая формула:

$$\frac{U_{cp}}{V} = 1,1 - \frac{0,063 \cdot h_{max}}{h} \quad ( 7 )$$

примерные пределы применимости которой  $0,2 \leq \frac{h}{h_{max}} \leq 0,9$  ( $h$  - глубина на данной вертикали). Кроме того принято: для  $\frac{h}{h_{max}} = 0 - U_{cp} = 0$  и для  $\frac{h}{h_{max}} = 1 - U_{cp} = 1,1 V$ .

Зависимость ( 7 ) получена в предположении, что относительные удельные расходы  $q = \frac{U_{cp} \cdot h}{V \cdot h_{max}}$  в указанных выше пределах изменяются по закону прямой линии. Такой закон изменения  $q$  наблюдался во всех опытах на моделях различных размеров ( $h_{max} = 9 \div 15$  см). Возможность использования предложенного метода расчета  $U_{cp}$  в натуральных каналах требует дополнительной проверки.

На основании результатов предварительных опытов сделан вывод о том, что радиальная скорость обратно пропорциональна корню квадратному из радиуса закругления. Такой вывод противоречит зависимости ( 1 ), но подкрепляется следующими соображениями.

1. В опытах А.Шукри, где определялась "сила винтового движения", представляющая собой отношение кинетических энергий циркуляционного и продольного движений, было обнаружено, что при изменении радиуса закругления от  $B$  до  $3B$  названная "сила" уменьшается примерно в 2 раза. Принятый характер зависимости  $v_r$  от  $r$  дает соответствующее уменьшение этой "силы" в 3 раза, а зависимость ( 1 ) - в 9 раз.

2. Результаты опытов И.Л.Розовского в прямоугольных лотках с радиусами закруглений  $B$  и  $2,5B$  не противоречат предлагаемой зависимости при условии, если сравнение радиальных скоростей на указанных моделях производится при постоянстве параметра  $\lambda \frac{B}{h}$  ( или  $\frac{B}{h}$  ).

3. Характер зависимости  $v_r$  от  $r$  близкий к рекомендуемому можно получить: а) при совместном использовании оригинальной формулы И.Дурамото для расчета  $v_r$  и рекомендации 3.1. Давения относительно положения сечения, в кото-

ром поперечная циркуляция на закруглении достигает полного развития; б) методом М.П.Кожевникова, если принять допущение о постоянстве  $v_{cp}$  по ширине русла - такое допущение для не очень крутого поворота широкого прямоугольного русла допустимо, т.к. в сечении, где  $v_r$  достигают максимальных значений, скорости  $v_{cp}$  распределены по ширине потока уже довольно равномерно.

Изменение радиальных скоростей с уменьшением глубины потока над откосами узкого трапецеидального канала при использованном способе определения  $v_r$  не удалось изучить в полной мере. Поэтому рекомендуемая зависимость (8) является довольно грубым приближением.

$$\frac{v_{ri}}{v_{r0}} = \frac{h}{h_{max}} \left( 2 - \frac{h}{h_{max}} \right) \quad (8)$$

По результатам предварительных опытов ( $r_0 = 1,65B$  и  $r_0 = 3B$ ) с учетом зависимости (8) и предложенного характера зависимости  $v_r$  от  $r$  были вычислены приведенные радиальные скорости, причем за основу сравнения приняли циркуляцию на осевой вертикали канала при  $r_0 = 3B$ . Оказалось, что распределение приведенных  $v_r$  по вертикали вполне удовлетворительно описывается простой формулой:

$$v_r = 0,12 v_{cp} (1 + \ln \eta) \quad (9)$$

Таким образом, окончательная эмпирическая формула для расчета радиальных скоростей на закруглениях гидравлически наиболее выгодных трапецеидальных каналов при  $m = 1,75$  без учета влияния шероховатости русла (по данным И.Л.Розовского зависимость  $v_r$  от  $C$  малз) может быть представлена в виде:

$$v_r = 0,12 v_{cp} (1 + \ln \eta) \frac{h}{h_{max}} \left( 2 - \frac{h}{h_{max}} \right) \sqrt{\frac{3B}{r}} \quad (10)$$

Зависимость (10) предполагает, что по мере приближения ко дну ( $\eta \rightarrow 0$ )  $v_r$  беспрестанно возрастает. С некоторой погрешностью принято, что формула (10) справедлива в пределах  $0,05 \leq \eta \leq 1,0$ , а при  $\eta < 0,05$  радиальная скорость постоянна и равна  $v_r = v_r \eta = 0,05 = Const$ .

Рекомендуемая зависимость (10) показала удовлетворительное совпадение не только с результатами предварительных опытов ( $B = 4h$ ), но и с данными опытов в прямоугольных лотках Н.Ф.Данелия ( $B = 3,3h$ ) и И.Л.Розовского ( $B = 4,4h$ ), хотя названные опыты объединяет лишь примерное равенство параметра  $\frac{B}{h}$ .

Теперь после вычисления интегралов, входящих в уравнение (6), и интегрирования этого уравнения методом конечных разностей можно получить:

$$\Delta(v_{cp}^2) = - \frac{0,21 \sqrt{B} \left( 0,05 + \frac{0,8 \sqrt{g}}{x C} \right)}{1 + \frac{g}{x^2 C^2}} \cdot \frac{\Delta(D v_{cp}^2)}{h \cdot \Delta r} \cdot \Delta \theta \quad (11)$$

$$D = \frac{h^2}{h_{max}} \left( 2 - \frac{h}{h_{max}} \right) \sqrt{r}$$

В начале закругления, где происходит переформирование свободной поверхности потока, скорости течения у выпуклого берега возрастают, а у вогнутого - уменьшаются. Пренебрегая потерями на трение на коротком начальном участке длинного поворота и составляя уравнение Бернулли для отдельной плановой струйки, получаем:

$$v_{cp,i} = \sqrt{v_{cp,прям.}^2 - 2g \cdot \Delta h} \quad (12)$$

Изменение отметки свободной поверхности  $\Delta h$  для любой вертикали  $n$  с радиусом  $r_n$  может быть приближенно определено по известной зависимости для поперечного уклона  $I_r$ :

$$\Delta h = \int_{r_0}^{r_n} I_r \cdot dr \approx \int_{r_0}^{r_n} \frac{v_{cp,прям.}^2}{g r} dr \approx \sum_{i=0}^{i=n} \frac{[v_{cp,i}^2 + v_{cp,(i+1)}^2] \Delta r_{i-(i+1)}}{[r_i + r_{(i+1)}] g} \quad (13)$$

Вычислив таким путем скорости в начальном сечении поворота ( $v_{cp,i}$ ), определяя приращения  $\frac{\Delta(D v_{cp}^2)}{h \cdot \Delta r}$  при переходе от одной вертикали к другой, можно из выражений (11) находить приращения квадрата продольной скорости  $\Delta(v_{cp}^2)$  между двумя соседними расчетными сечениями с ин-



тервалом  $\Delta\theta$  между ними. Последовательно перемещаясь от сечения к сечению, можно определить поле продольных скоростей на всем закруглении.

Однако, как показали последующие опыты, перераспределение продольных скоростей по ширине и глубине потока на длинном повороте происходит лишь до определенного сечения с центральным углом  $\theta_{пред}$ . Ниже по течению эпюры продольных скоростей практически не изменяются и даже в конце поворота, где исчезает поперечный уклон, почти не деформируются. На основании опытных данных и некоторых общих соображений получена зависимость для определения величины  $\theta_{пред}$  в изучавшихся каналах:

$$\theta_{пред} \approx 127 \sqrt{\frac{B}{r_0}} \quad (14)$$

Расчет поля скоростей на закруглении с использованием зависимостей (7), (11) + (14) дает неплохое совпадение с данными опытов на моделях закруглений различных радиусов. Расхождение расчетных и опытных значений

$U_{ср}$  для вертикалей, где продольные скорости достигают максимума, не превышает нескольких процентов и лишь для одной из вертикалей над откосом выпуклого берега найдено равно  $10 \pm 13\%$ . Последняя цифра не представляется столь уж большой величиной, особенно если учесть, что зависимость (7) дает отклонения от опытных данных до 7%.

Таким образом, опыты подтверждают возможность использования метода расчета  $U_{ср}$  на закруглении, предложенного И.Л.Розовским, без введения каких-либо дополнительных опытных коррективов даже в условиях сложной формы узкого трапецеидального сечения. Этот факт еще раз свидетельствует о том, что выражения (6) + (14) правильно описывают явление движения воды на закруглениях изучаемых каналов. Кроме того совпадение расчетных и опытных данных указывает на справедливость рекомендованного характера зависимости  $U_r$  от  $r$ .

Как отмечалось выше, при современной степени изученности явления коэффициент уменьшения размывающей скорости на закруглении  $k$  не может быть определен расчетным путем. Метод определения  $k$  путем постановки опытов только на размываемых моделях обычно не позволяет установить причины увеличения размывающей способности потока на закруглении, затрудняет сравнительную оценку устойчивости русла на размыв в отдельных сечениях поворота, кроме того этот метод часто не очень точен.

В настоящей работе использовался комбинированный путь исследований. При этом за основной показатель при оценке устойчивости русла на размыв принималась величина коэффициента  $k'_{дон}$ , представляющего собой отношение максимальных донных скоростей  $(U_{дон})_{max}$  в прямолинейном канале и в рассматриваемом створе закругления. На размываемых же моделях производилась лишь проверка некоторых из полученных результатов.

Существенным недостатком многих модельных исследований является противоречие между высокой точностью измерений и низкой точностью изготовления моделей. В основных опытах модели сооружались с возможно большей тщательностью: например, отклонение отметок дна от проектных, как правило, не превышало 0,5% от глубины наполнения и в редких случаях достигало 1%.

Донные скорости измерялись поверхностной трубкой Пито, разработанной Престоном и использовавшейся в опытах А.Иппена и П.Дринкера. Однако точность измерений была существенно увеличена, чего удалось добиться следующим образом. Давления, регистрируемые статическими и динамическим отверстиями трубки, передавались к двум измерительным бачкам с большой площадью поперечного сечения (5 x 5 см).

Положения свободных поверхностей в бачках измерялись при помощи микрометров с иглами с точностью до 0,02 мм. Таким образом, достигалось демпфирование колебаний  $U_{дон}$  во времени и высокая точность измерения скоростного напора.

Систематическая ошибка за счет некоторого несовпадения направлений скорости и трубки, устанавливаемой параллельно касательной к оси канала в данном сечении, не превышала  $2 \pm 4\%$ .

Опыты на размываемых моделях проводились с чистой водой. Скорость повышалась ступенями не более 0,5 см/сек. через каждые 25 + 35 мин., за начало размыва принимался момент образования контуров первой гряды. Для определения величины размывающей скорости бетон на длине около 1,5 В вокруг исследуемого створа удалялся и русло формовалось из песка крупностью 0,5 + 1 мм.

Измерения донных скоростей трубками различного диаметра (3,5 + 5,0 мм) показали, что размер трубки не влияет на конечный результат — величины относительных донных скоростей  $\frac{U_{дон}}{U_{дон.прям.}}$  в определенных точках измерений остаются с точностью до нескольких процентов постоянными, причем ошибки носят случайный характер ( $\bar{U}_{дон.прям.}$  — средняя в сечении донная скорость на прямолинейном подводящем участке).

При увеличении чисел  $Re = \frac{\bar{V} \cdot R}{\nu}$  ( $R$  — гидравлический радиус) от 6800 до 15300 распределение  $U_{дон}$  по ширине русла несколько изменяется, но величина  $k_{дон}$  (минимальное значение  $k'_{дон}$  в наиболее опасном по размыву сечении) увеличивается всего на  $1 \pm 2\%$ . Т.к. последняя цифра находится в пределах точности опытов, можно принять, что  $k_{дон}$  не зависит от числа  $Re$  в небольших пределах его изменения.

Во всех основных опытах характер изменения поля донных скоростей по длине закругления был найден качественно одинаковым. В начале поворота ( $U_{дон})_{max}$  наблюдается на выпуклом берегу и на  $5 \pm 8\%$  превосходит соответствующую

величину в прямолинейном канале. Ниже по течению  $U_{дон}$  распределены по ширине русла почти равномерно, а ( $U_{дон})_{min}$  иногда даже несколько меньше, чем на прямой. По мере увеличения  $U_{ср}$  у вогнутого берега донные скорости там тоже увеличиваются. На длинном закруглении ( $\theta > \theta_{пред.}$ ) донные скорости, равно как и скорости  $U_{ср}$ , достигают максимальных значений уже в пределах поворота. Однако, например, при  $r_0 = 5B$   $U_{ср}$  увеличивается для наиболее опасной по размыву вертикали всего на 12% по сравнению с прямолинейным каналом, а увеличение ( $U_{дон})_{max}$  достигает 24%. Если же  $\theta < \theta_{пред.}$ , то ( $U_{дон})_{max}$  наблюдается за поворотом, на отводящей прямой.

Чтобы оценить порядок величин, входящих в зависимость ( $\theta$ ), можно привести их значения, полученные в одном из опытов ( $r_0 = 5B$ ;  $\theta = 70^\circ$ ):  $k = 0,84$ ;  $k_{U_{ср}} = 0,89$ ;  $(k_{U_{дон}})_{ист.} = 0,86$ ;  $k_{U'} = 1,10$ . Последний коэффициент вычислен косвенным путем — как отношение величин  $k$  и  $k_{дон}$ , с учетом систематических ошибок определения  $k_{дон}$ .

Для закруглений, очерченных по окружностям различных радиусов, опытным путем найдены следующие значения коэффициентов  $k$  и  $k_{дон}$ :  $r_0 = 3B$  — соответственно 0,81 и 0,76;  $r_0 = 5B$  — 0,84 + 0,85 и 0,79 + 0,80;  $r_0 = 10B$  — 0,84 и 0,80. Отсюда можно сделать два вывода: во-первых, целесообразно пытаться увеличивать устойчивость поворачивающего русла на размыв путем увеличения радиуса закругления сверх  $r_0 = 5B$ ; во-вторых, между коэффициентами  $k$  и  $k_{дон}$  при использованной методике измерений  $U_{дон}$  существует устойчивое соотношение:  $k = (1,05 + 1,06) k_{дон}$ . Поэтому при проведении дальнейших исследований модели с закруглениями  $r_0 > 5B$  и размываемые модели не строились, а сравнение относительной устойчивости различных закруглений на размыв производилось по результатам измерений донных скоростей и вычисленным значениям  $k_{дон}$ .

Два опыта были посвящены изучению распределения  $U_{дон}$  на закруглениях, очерченных по одной ветви эллипса, причем в одном из них кривизна закругления возрастала вниз

по течению, а в другом — уменьшалась. Интересные результаты получены для клотоиды с возрастающей кривизной. Поскольку на таком закруглении  $I_r$  возрастает по длине кривой, деформации поля продольных скоростей за счет увеличения поперечного уклона компенсировались деформациями обратного знака за счет поперечной циркуляции. В результате еще перед самым концом поворота эпюры распределения  $U_{доп.}$  и  $U_{ср.}$  по ширине были почти симметричны относительно оси потока, а  $(U_{доп.})_{max}$  лишь на 5 ÷ 6% превосходила соответствующую величину в прямом канале. Тем не менее сразу за поворотом эпюры скоростей резко деформировались.

Для указанных клотоид и окружности равной им длины коэффициенты  $k_{доп.}$  оказались совершенно одинаковыми и равными 0,80. Клотоида, состоящая из двух симметричных ветвей и исследованная в предварительных опытах, также не обнаружила преимуществ перед окружностью: коэффициент  $k$  в этих случаях был найден равным 0,84. Возможно, преимущества клотоиды проявят себя при чередовании излучин, когда резкий переход от одного поворота к другому может привести к увеличению интенсивности турбулентности потока.

Для оценки влияния форм поперечного сечения на относительную устойчивость поворачивающего русла на размыв было проведено два опыта в гладком лотке (оргстекло и винипласт) прямоугольного сечения ( $r_0 = 5B$ ;  $\theta = 50^\circ$ ). Значения коэффициентов  $k_{доп.}$  при меньшей точности изготовления этой модели были получены следующие: для  $B = 2,5h$  — 0,81 и для  $B = 4,7h$  — 0,79. Кроме того сопоставлены результаты одного из опытов в узком трапецеидальном канале и опытов в прямоугольных руслах других исследователей. Это сопоставление (таблица 1) показывает, что в каналах совершенно различной формы поперечного сечения разница в значениях  $k$  не превышает нескольких процентов. Поэтому с некоторым приближением можно принять, что на закруглениях любых каналов при  $r_0 > 3B$  и уклонах меньше критических:

$$\bar{V}_{р.кр.} \approx 0,8 \bar{V}_{р.прям.} \quad (15)$$

Таблица 1.

Р/Р п/п	Форма и размер (см) поперечно- го сечения.	$\frac{r_0}{B}$	$\frac{B}{h}$	$k$	Автор опыта.
1	Полигональная	3,1	11,5	0,78	И.Л.Розовский
2	Прямоугольная	~2,5	~22	~0,80	"
3	Прямоугольная	1,5	-	0,76 ÷ ÷0,82	Т.А.Амброладзе
4	Трапецеидальная	3,0	4	0,81	Ю.Б.Полетаев

где  $\bar{V}_{р.прям.}$  и  $\bar{V}_{р.кр.}$  — выравнивающие скорости в прямолинейном канале и на закруглении.

Вопросы о влиянии величины угла поворота на устойчивость русла на размыв и об изменении этой устойчивости по длине отводящей прямой исследованы мало.

Можно было предполагать, что коэффициенты  $k$  и  $k_{доп.}$  на закруглениях с углом поворота  $\theta < \theta_{пред.}$  будут относительно больше. Однако в опытах при  $\theta = 46^\circ + 50^\circ$ , несмотря на то, что угол поворота был меньше  $\theta_{пред.} = 57^\circ$ , никакого увеличения устойчивости русла на размыв по сравнению с опытом  $\theta = 70^\circ$  не наблюдалось.

Максимальная длина отводящего участка, на котором были измерены донные скорости, равнялась  $30h$ , а в большинстве опытов эта длина составляла  $20h$ . Характер изменения коэффициента  $k_{доп.}$  во всех опытах, включая опыт в прямоугольном лотке, был одинаков:  $k_{доп.}$  возрастал примерно пропорционально расстоянию от сечения "КК + 4h" (КК — конец кривой). Все опытные точки хорошо легли на одну прямую; путем линейной экстраполяции получили, что  $k_{доп.} = 1,00$  на расстоянии около  $54h$  от конца закругления.

Примерно такую же длину участка выравнивания скоростей за поворотом дают многочисленные опыты, в которых определялись дополнительные потери напора на поворотах трубопроводов, и опыты Я.Мурамото.

Полученные в основных опытах результаты позволяют при-

ближенно принять, что коэффициент  $k$  меняется вдоль закругления узкого трапецеидального канала при  $r_0 \geq 3B$  следующим образом:

- 1). уменьшается от 1,0 в сечении  $0,5\theta_{пред}$  до 0,8 в створе  $\theta_{пред}$ ;
- 2). сохраняется постоянным  $k = 0,8$  между сечениями  $\theta_{пред}$  и "КК + 4h";
- 3). возрастает линейно от 0,8 до 1,0 на последующем отрезке отводящей прямой длиной  $50h$ ;
- 4). в случае, если  $\theta < \theta_{пред}$ , коэффициент  $k$  начинает уменьшаться в сечении  $0,5\theta$  и становится равным 0,8 в створе, удаленном от конца поворота на расстояние  $4h$  (створ "КК + 4h").

Специально выполненный анализ влияния на точность результатов измерения  $U_{дон}$  таких факторов, как некоторая некачественность изготовления моделей ( $\pm 1$  мм), колебания температур воды в опыте ( $\pm 3^\circ$ ), изменение шероховатости в небольших пределах, показал, что влияние названных факторов почти не ощущается.

Предельные расхождения опытных значений  $U_\theta$  и  $U_{дон}$  в сходственных точках длинного прямолинейного канала оказались не больше 3%. Такое же значение предельного расхождения величин разнравящих скоростей получено путем сравнения результатов определения  $V_{р.прям.}$  на подводных участках трех разнравяемых моделей.

#### ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ.

1. При  $r_0 < 3B$  на поворотах узких трапецеидальных каналов, имеющих коэффициент заложения откосов близкий к 1,75, возможно образование водоворотных зон.
2. Интенсивность поперечной циркуляции (величина  $U_r$ ) обратно пропорциональна корню квадратному из радиуса закругления.
3. На закруглениях узких трапецеидальных каналов при

$m = 1,75$  распределение радиальных скоростей по сечению в пределах  $0,05 \leq \eta = \frac{z}{h} \leq 1,0$  определяется выражением:

$$U_r = 0,12 U_{ср.} (1 + \ln \eta) \frac{h}{h_{max}} \left( 2 - \frac{h}{h_{max}} \right) \sqrt{\frac{3B}{r}}$$

4. Расчет перераспределения скоростей  $U_{ср.}$  по ширине потока на закруглении, выполненный по методике И.Д.Розовского с использованием приведенной в предыдущем пункте зависимости, дает удовлетворительное совпадение с опытными данными.

5. Перераспределение скоростей  $U_{ср.}$  и увеличение донных скоростей на длинном закруглении происходит до определенного сечения -  $\theta_{пред}$ . В изучавшихся каналах величина  $\theta_{пред}$  при  $r_0 \geq 3B$  может приближенно определяться по зависимости:

$$\theta_{пред} = 127 \sqrt{\frac{B}{r_0}}$$

6. Коэффициент уменьшения разнравяющей скорости  $k$  при изменении осевого радиуса поворота узкого трапецеидального канала от  $3B$  до  $10B$  изменяется только от 0,81 до 0,84, причем практически не зависит от формы плавной кривой закругления.

7. Коэффициент  $k$  мало зависит от формы поперечного сечения канала; при  $r_0 \geq 3B$  в первом приближении для любого канала при уклонах меньше критических можно принять:

$$V_{р.кр.} \approx 0,8 V_{р.прям.}$$

8. Длина отводящего прямолинейного участка, на котором коэффициент  $k$  возрастает до 1,0, составляет  $(50 + 55)h$ .

9. Полученные результаты позволяют предложить следующие практические рекомендации по обеспечению неразмываемости русел узких трапецеидальных каналов на закруглениях ( $m \approx 1,75$ ):

- а) повороты каналов рекомендуется осуществлять по окружности с осевым радиусом  $3B \leq r_0 \leq 5B$ ;
- б) устойчивость русла на размыв в районе закругления будет обеспечена, если средняя скорость течения в

канале ( $\bar{V}$ ) составляет не более 80% от скорости, допустимой по условию неразмываемости ( $\bar{V}_{\text{доп.}}$ ), т.е.:

$$\bar{V} \leq 0,8 \bar{V}_{\text{доп.}}$$

в) в случае, если условие, указанное в п. "б", не выполняется, следует:

- при большом количестве поворотов на канале - уменьшить уклон канала путем создания перепадов или быстотоков;
- при ограниченном числе поворотов, расположенных на значительном удалении друг от друга - применить крепление русла канала в районах поворотов;

г) крепление должно начинаться в створе  $0,5 \theta_{\text{пред.}}$ , либо  $0,5 \theta$ , если  $\theta < \theta_{\text{пред.}}$ ; для указанных в п. "а" радиусов  $\theta_{\text{пред.}} \approx 55^\circ$ ;

д) протяженность крепления за поворотом определяется по зависимости:

$$l_{\text{кр.}} = \left( 4 + \frac{K - 0,8}{0,004} \right) \approx 250 (K - 0,8) h ;$$

$$K = \frac{\bar{V}}{\bar{V}_{\text{доп.}}} ; \quad 0,8 \leq K \leq 1,0$$

е) на концевом участке длиной  $25h$  можно крепить только дно и откос, являющийся продолжением вогнутого берега; на остальной длине крепление осуществляется по всему смоченному периметру.

По теме диссертации опубликована работа:

Полетаев Ю.Б. Распределение продольных скоростей и размыв на закруглениях узких трапециевидальных каналов. "Известия ВУЗ'ов МВССО СССР", разд. "Энергетика", №1, 1971.

Подписано к печати 26/1У-1971. М 28825.

Заказ № Тираж 120. Бесплатно.

Отпечатано на ротационной фундаментальной

библиотеки ЛПИ им. М. И. Калинина.

Ленинград, К-251, Политехническая, 29.