

## КОНСТРУКЦИИ И РАСЧЕТЫ

УДК 627.423

### **РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО И ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НОВОГО СПОСОБА УГЛУБЛЕНИЯ РЕК**

**В.Н. Карнаухов**, кандидат технических наук, зав. лабораторией  
(Институт мелиорации и луговодства НАН Беларуси)

Анализ состояния спрямленных рек-водоприемников по условиям формирования руслового процесса показывает, что для стабилизации руслового режима на участках, подверженных интенсивному переформированию русла, необходимы новые энергосберегающие технологии.

Ниже излагаются результаты математического и физического моделирования по разработке методики расчета энергосберегающей технологии углубления рек на основе использования размывающей способности управляемого руслового потока. Внедрение разработанной технологии позволит кардинально изменить сложившуюся ситуацию и обеспечить заданный гидравлический и русловой режимы, а также улучшить экологическое состояние канализированных рек без значительных затрат энергетических ресурсов. Для широкого практического применения предлагаемой технологии потребуется разработка новых механизмов типа передвижных струенаправляющих щитов заводского изготовления.

Предлагается гидравлическая схема перераспределения наносов по поперечному сечению (рис. 1) путем изменения направления движения донных и поверхностных струй.

В верхнем по течению створе углубляемого участка водотока устанавливают стеснительное устройство (механизм) 1, представляющее собой, например, рамную конструкцию, снабженную опускающимся блоком донных струенаправляющих щитов 2. На начальном этапе работы блок донных щитов 2 постепенно, по мере продвижения устройства, опускают на требуемую глубину раз-

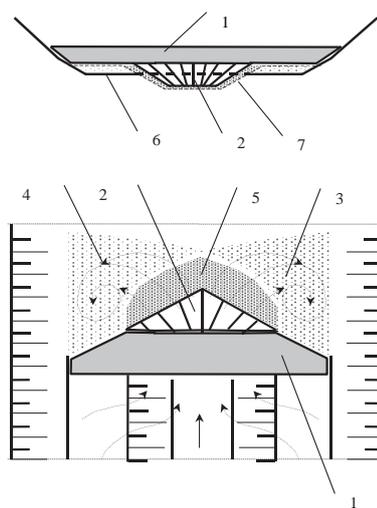


Рис. 1. Расчетная схема

упором, стеснительное устройство 1 смещается вниз по течению, переформировывая существующее сечение 6 в сечение сложной формы 7.

Рассмотрим продольный профиль участка углубляемого русла с уклоном дна  $i$ , по которому протекает поток с постоянным расходом  $Q_p$  (рис. 2). При проведении углубительных работ вниз по течению продвигается со скоростью  $V$  стеснительное устройство (механизм на схеме показан вертикальной линией). При стеснении потока устройством в створе его расположения образуется перепад глубин  $Z$  между верхним и нижним бьефами, способствующий увеличению скорости потока в сжатом сечении при прохождении транзитного расхода  $Q_t$ . За счет усиления поперечных и вертикальных составляющих скоростей блоком донных щитов происходит размыв и углубление средней части русла на величину  $h_p$  (формируется межженная часть русла сложного сечения). При этом частицы размываемого грунта вместе с донными струями направляются поперек потока и откладываются вдоль берегов в виде пойменной части русла сложного сечения. Часть наносов откладывается в центральной части потока слоем  $h_3$ .

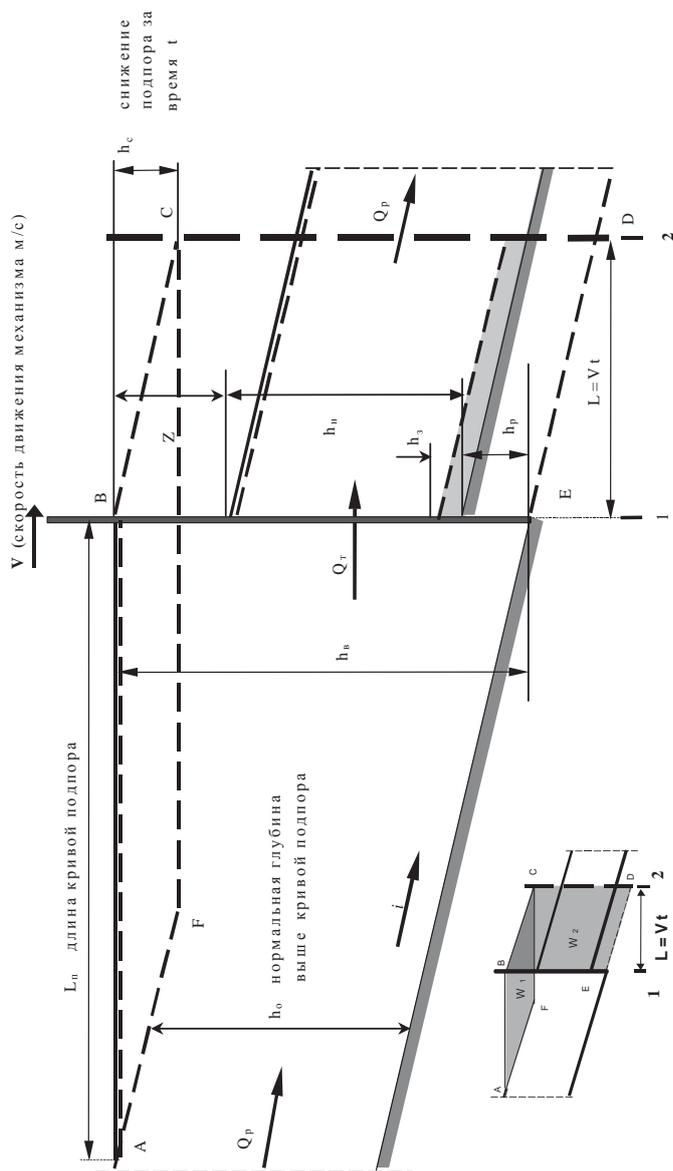


Рис. 2. Схема технологического процесса в продольном разрезе

В верхнем бьефе устанавливается неравномерный режим на участке распространения кривой подпора длиной  $L_n$ . Выше кривой подпора устанавливается равномерный режим с нормальной глубиной потока  $h_0$ . В нижнем бьефе за пределами зоны растекания также устанавливается равномерный режим с нормальной глубиной потока  $h_n$ .

Найдем соотношения принятых показателей при неизменном поперечном сечении первоначального русла в условиях установившегося режима, т.е. при соблюдении следующих условий:

$$V = \text{const}; \quad (1)$$

$$Q_p = \text{const}, \quad (2)$$

$$h_n = \text{const}. \quad (3)$$

Рассмотрим баланс объемов воды в верхнем бьефе на участке распространения кривой подпора за промежуток времени  $t$ . Уравнение баланса для установившегося режима примет следующий вид

$$Q_p - W_1 + W_2 - Q_T = 0, \quad (4)$$

где  $W_1$  – объем воды (на профиле рис. 2 объем показан поперечным сечением ABCF), ушедший за время  $t$  из верхнего бьефа за счет снижения отметки уреза воды на величину  $h_c$ ;  $W_2$  – объем воды (на рис. 2 показан поперечным сечением BCDE), потребовавшийся на заполнение пространства, образовавшегося за счет смещения створа расположения механизма за время  $t$  на длину  $L = Vt$ ;  $Q_T$  – транзитный расход через створ расположения струенаправляющего механизма.

$$W_1 = \omega_n h_c = \omega_n L = \omega_n Vt, \quad (5)$$

$$W_2 = \omega_B L = \omega_B Vt, \quad (6)$$

где  $\omega_n$  – площадь зеркала поверхности потока в пределах кривой подпора (на рис. 2 показано прямыми AB и FC соответственно на начало и конец рассматриваемого промежутка времени);  $\omega_B$  – площадь живого сечения потока в верхнем бьефе в створе расположения ЭСМ (на продольном профиле рис. 2 показано прямыми BE или CD соответственно на начало и конец рассматриваемого промежутка времени).

Подставляя (5) и (6) в (4) получим

$$tQ_p - t\omega_n V + t\omega_B V - tQ_T = 0, \quad (7)$$

или

$$V = \frac{Q_p - Q_m}{w_e - iw_n} = Const. \quad (8)$$

При движении стеснительное устройство за промежуток времени  $t$  выполняет некоторую работу по перераспределению наносов с производительностью  $Q_n$ :

$$Q_n = \frac{W_3}{t}, \quad (9)$$

где  $W_3$  – объем грунта, перемещаемого с углубляемой части русла сложного сечения в зоны отложения.

$$W_3 = \omega_p L = \omega_p t V, \quad (10)$$

где  $\omega_p$  – поперечная площадь зоны размыва.

Подставляя значение  $W_3$  из уравнения (10) в (9) и решая относительно  $V$ , получим

$$V = \frac{Q_n}{w_p} = Const. \quad (11)$$

При водобалансовом расчете нижнего бьефа получаем следующее уравнение, аналогичное уравнению (8):

$$V = \frac{Q_p - Q_m}{w_n} = Const., \quad (12)$$

где  $w_n$  – площадь живого сечения потока в нижнем бьефе за пределами зоны растекания потока с глубиной  $h_n$ .

Приравняв правые части уравнений (8), (11) и (12), получим следующее основное уравнение соотношения расходов и площадей рассматриваемого технологического процесса

$$V = \frac{Q_p - Q_m}{w_e - iw_n} = \frac{Q_n}{w_p} = \frac{Q_p - Q_m}{w_n} = Const. \quad (13)$$

Одна из закономерностей процесса перераспределения наносов в рассматриваемом случае – наличие обратных связей. Однонаправленные деформации размыва русла в створе расположения

механизма обуславливают изменения гидравлических характеристик потока, что ведет к уменьшению его размывающей способности, а это, в свою очередь, воздействует на интенсивность деформаций, вызывая их постепенное затухание. Указанный процесс может трактоваться как саморегулирование деформируемого русла [1]. В данном случае поддержание интенсивности деформаций в определенном оптимальном диапазоне может регулироваться скоростью передвижения механизма или площадью размыва.

Методика расчета гидравлического режима в створе сооружения со струенаправляющими щитами отсутствует, поэтому в качестве аналога, близкого к рассматриваемому гидравлическому режиму, принята расчетная схема водослива с широким порогом (рис. 3) со сжатым поперечным сечением. Данный способ расчета теоретически обоснован и прост в применении.

Пренебрегая перепадом восстановления, полагаем, что глубина воды на пороге водослива  $h_1$  равна сумме глубины потока в нижнем бьефе  $h_n$  и заданной глубины размыва  $h_p$ .

$$h_1 = h_n + h_p. \quad (14)$$

Для приведенной выше схемы применяем методику определения транзитного расхода согласно ТУиН [2] по следующей формуле:

$$Q_m = f w_c \sqrt{2g Z_0} = w_c u_c, \quad (15)$$

где  $\varphi$  – коэффициент скорости, определяемый с учетом особенностей конструкции;  $Z_0$  – перепад глубин между нижним и верхним бьефами с учетом скорости подхода;  $\omega_c$  и  $u_c$  – соответственно площадь живого сечения и средняя скорость в сжатом сечении с глубиной  $h_1$  и шириной углубляемой части русла  $B$ .

Решая совместно (14) и (15) и пренебрегая скоростью подхода, получим следующее уравнение:

$$Q_m = f B (h_n + h_p) \sqrt{2g Z}. \quad (16)$$

Коэффициент  $\varphi$  определяется по следующей формуле:

$$\varphi = K_m \varphi_0, \quad (17)$$

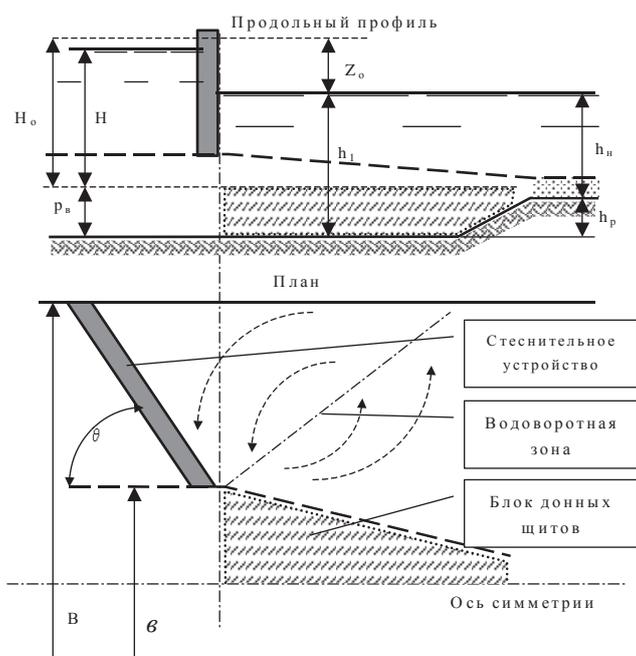


Рис. 3. Расчетная схема водослива

где  $\varphi_v$  – коэффициент скорости водослива принимается в зависимости от коэффициента расхода водослива  $m$  (по данным Д.И. Кумина [2]);  $K_m$  – коэффициент условий работы, учитывающий особенности конструкции, который определяется на основании гидравлического моделирования.

Для оценки переформирования речного русла принят метод расчета и прогноза деформаций, основанный на представлении о бесструктурном транспорте наносов, т.е. на анализе движения в потоке отдельно взятых частиц грунта. В настоящее время известно около 200 формул для расчета удельного расхода наносов  $q$ . Условно их можно разделить на четыре группы.

К первой группе относятся формулы, в которых основным

определяющим параметром является скорость потока. В первом приближении все формулы этой группы можно представить в следующем виде

$$q = b u_n \left( \frac{u}{u_n} \right)^m, \quad (18)$$

где  $u$  – средняя скорость потока;  $u_n$  – неразмывающая скорость;  $\beta$  – обобщенный параметр, зависящий от коэффициента разнозернистости наносов и глубины потока;  $m$  – показатель степени, по данным различных авторов принимающий значения от 2 до 12, т.е. изменяющийся в очень широких пределах.

В формулах второй группы в качестве основного расчетного параметра принята «влекущая сила потока». В качестве примера можно привести формулу И.В. Егизарова

$$q = a r_s g \sqrt{I} \left( \frac{t - t_0}{t_0} \right), \quad (19)$$

где  $a$  – постоянная;  $t_0$  – влекущая сила потока, при которой начинается влечение наносов,  $I$  – гидравлический уклон потока в рассматриваемом створе.

Третья группа формул основана на связи расходов наносов непосредственно с расходом воды и уклонами водной поверхности. В качестве примера приведем формулу А. Schoklitsh

$$q = \frac{a}{\sqrt{k}} I^{3/2} (s - s_0), \quad (20)$$

где  $\sigma$  и  $\sigma_0$  – удельные расходы воды по ширине потока соответственно без и при наличии движения наносов;  $a$  и  $k$  – числовые параметры.

В четвертой группе формул определение расхода наносов осуществляется на основе статистического анализа движения отдельных твердых частиц. Эти формулы включают широкий диапазон трудно определяемых статистических характеристик размыва и взвешивания грунтов.

Анализ приведенных выше групп формул для расчета расходов наносов, полученных различными способами, показывают, что большинство из них может быть приведено к следующему расчетному виду

$$q=f(v/v_n), \quad (21)$$

что свидетельствует о достоверности предпосылок, положенных в основу их выводов.

Поскольку кинематическая структура потока в зоне размыва в точности неизвестна, для ее уточнения проведены исследования на жестких и размываемых гидравлических моделях.

Часть исследований, связанных с определением пропускной способности и оптимального расположения струенаправляющих щитов, была проведена на жесткой модели русла с фиксированным положением модели механизма.

Для постановки экспериментов на неразрываемой гидравлической модели применялся принцип расчета в соответствии с теорией подобия и соблюдения условий однозначности изучаемых явлений. Учитывая, что исследуемые подобные системы находятся под действием сил тяжести, определяющим критерием подобия при моделировании принимался критерий Фруда ( $Fr$ ).

$$Fr=idem \quad (22)$$

Из условия (22) и определялись связи между масштабными коэффициентами. Для исследования влияния пространственного положения стеснительного устройства на гидравлический режим на модели русла был создан неразрываемый участок. Участок обеспечивал требуемый гидравлический режим в створе расположения механизма во время его работы, т.е. нижний бьеф обеспечивал режим естественного русла, а верхний – переформированного. Для крепления русла использовали полиэтиленовый холст.

Модель механизма была изготовлена из следующих материалов:

стеснительное устройство	- деревянная рама, обтянутая полиэтиленовой пленкой;
донные щиты	- листовой пластик;
базовая рама и понтоны	- обработанная древесина.

Выбор масштабов моделирования производился из возможностей русловой площадки и удобства проведения исследований. Принят вертикальный масштаб  $M_H=10$ .

В табл. 1 приведены значения натуральных характеристик потока на репрезентативном участке естественного русла на период межени, формулы для определения масштабных коэффициентов, их числовые значения и соответствующие характеристики неразмываемой модели.

Таблица 1. Параметры моделируемого русла

Характеристика	Натурное значение	Формула для определения	Масштабные коэффициенты	Модельное значение характеристики
$H_c$	1 м	Задаем	10	0,1 м
$B$	25 м	$M_B=M_H$	10	2,5 м
$V$	0,8 м/с	$M_V=M_H^{0.5}$	3.16	0,25 м/с
$Q$	20 м <sup>3</sup> /с	$M_Q=M_V M_H M_B$	316	0,063 м <sup>3</sup> /с

Методика проведения экспериментов:

- модель механизма устанавливали на закрепленном участке русла и фиксировали ее расчалками к базовым реперам для придания конструкции постоянного положения;
- величину пропускаемого расхода устанавливали с помощью головного устройства с треугольным мерным водосливом;
- требуемый гидравлический режим в нижнем бьефе задавали с помощью концевого затвора, позволяющего устанавливать требуемое положение уровня;
- в промежутке между опытами проводили переустановку десяти щитов, симметрично расположенных относительно оси потока (рис. 4) в вертикальной  $\varphi$  и горизонтальной  $\beta$  плоскостях с помощью специальных фиксирующих устройств;
- измерение скоростной структуры потока проводили с помощью микровертушек, оборудованных микропроцессором, а положение уровней с помощью шпигмасштабов, установленных в измерительных колодцах.

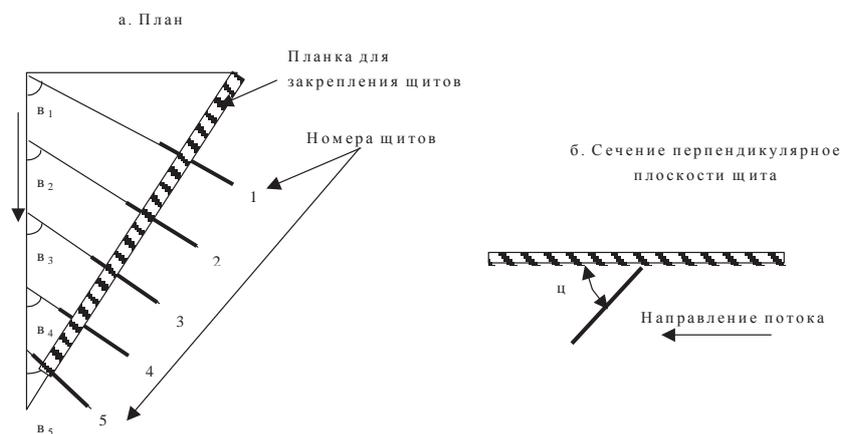


Рис. 4. Схема пространственного расположения донных щитов

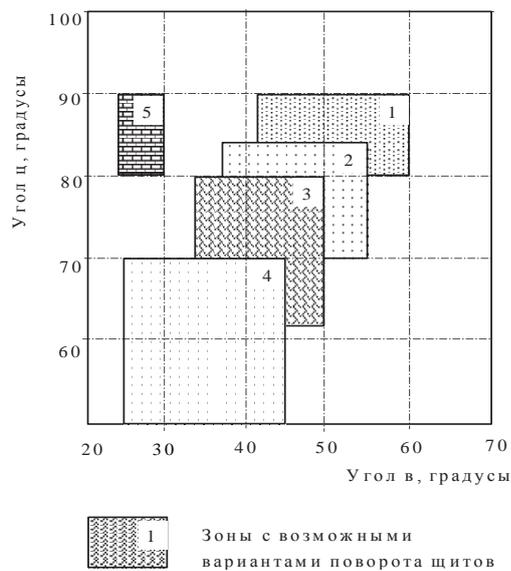


Рис. 5. Номограмма положения щитов

На основании анализа результатов модельных исследований и принятых конструктивных ограничений построена номограмма диапазонов пространственного положения донных направляющих щитов (рис. 5) и сформулированы следующие критерии определения их положения:

- максимум горизонтального угла поворота щитов для обеспечения условий переноса и осаждения наносов из размываемой зоны в зону отложения

наносов в процессе формирования русла сложной формы;

-максимум донной скорости в зоне размыва на выходе из блока донных щитов;

-максимум наклона линейного тренда аппроксимации донных скоростей в зоне размыва от пятого к первому щиту для увеличения интенсивности размыва в зоне влияния первого щита;

-максимум равномерности средних скоростей между щитами.

При обработке экспериментальных данных по пропускной способности механизма с применением расчетной схемы водослива с широким порогом (рис. 3) получена следующая экспоненциальная зависимость по определению коэффициента условий работы  $K_m$  в формуле (17)

$$K_m = A_z e^{0,1\eta}, \quad (23)$$

где  $A_z$  – опытный коэффициент, учитывающий особенности конструкции (определяется по данным моделирования);  $\eta$  – относительная глубина затопления щитов, определяется по следующей зависимости:

$$\eta = h_l / p_c - 1; \quad (24)$$

$p_c$  – осредненная высота блока донных щитов (м) с учетом их наклона, равная

$$p_c = h_{щ} \sin \varphi_c; \quad (25)$$

$h_{щ}$  – высота донного щита, м;  $\varphi_c$  – среднearифметическое значение угла наклона донных щитов.

Формула (23) имеет следующий предел применения

$$0,5 < \eta < 3. \quad (26)$$

При применении данной функции по определению коэффициента скорости  $\varphi$  в пределах опытных данных получена погрешность в 5 % с вероятностью 92 %.

Другую серию исследований, направленную на отработку процессов переформирования русла, проводили на размываемом участке модели.

На основании анализа существующих методов моделирования на размываемых моделях сделан вывод, что наиболее приемлемым является моделирование с искажением геометрических

масштабов по закономерностям, полученным по морфометрическим зависимостям. При этом в качестве дополнительного критерия, учитывающего плановые деформации русла, использовалось следующее соотношение

$$\frac{B}{H_c} \lambda = idem, \quad (27)$$

где  $B$  и  $H_c$  – ширина и средняя глубина русла,  $\lambda$  – коэффициент гидравлического сопротивления.

Для аллювиальных русел с однородным геологическим строением и при незначительном влиянии на их формирование растительности применено следующее соотношение [3]:

$$M_B/M_H=1/M_\lambda, \quad (28)$$

где  $M_B$  – плановый масштаб;  $M_H$  – масштаб глубин;  $M_\lambda$  – масштаб гидравлических сопротивлений.

Соотношение (28) справедливо при соблюдении условия (22) и применения на модели натурального песчаного грунта, т.е.

$$M_{ps}=M_d \approx 1, \quad (29)$$

где  $M_{ps}$  – плотность частиц грунта,  $M_d$  – масштаб крупности наносов.

Необходимо, однако, иметь в виду, что возможность применения на размываемых моделях натурального песчаного грунта обуславливается еще и скоростью течения потока, которая должна обеспечить перемещение донных наносов (т.е. должна быть выше размывающей скорости для частиц данной крупности). Это достигается за счет увеличения уклона модели по сравнению с натурным участком.

На основе анализа ряда морфометрических зависимостей, удовлетворяющих условию (27), принято следующее соотношение планового и вертикального масштабов

$$m=M_B/M_H=M_H^{0,33}. \quad (30)$$

Следует учитывать также, что коэффициент искажения масштабов  $m$  должен удовлетворять следующему условию

$$m \leq 0,35(B/H)_H. \quad (31)$$

Из возможностей русловой площадки и удобства проведения исследований был принят вертикальный масштаб  $M_H=8$  для условий пропуска расходов в пределах устойчивой межи (расход с обеспеченностью 50%) на репрезентативном участке.

В табл. 2 приведены значения натуральных характеристик потока, формулы для определения масштабных характеристик, их числовые значения и соответствующие характеристики модели.

**Таблица 2. Параметры моделируемого русла**

Характеристика	Натурное значение характеристики	Масштабные коэффициенты		Модельное значение характеристики
		Формула для определения	Числовое значение	
$H_c$	1,0 м	Задаем $M_H$	8	0,125 м
$d_{50}$	$d_{50н}=0,225 \times 10^{-3}$ м	$M_d=d_{50н}/d_{50м}$	0,68	$d_{50м}=0,33 \times 10^{-3}$ м
$B$	30,5 м	$M_B=M_H^{1,33}$	15,9	1,91 м
$m$	1	$m=M_B/M_H$	1,98	$m < 0,35 (B/H_H=10,7)$
$\omega$	$30,5 \text{ м}^2$	$M_\omega=M_H M_B=M_H^{2,33}$	127	$0,24 \text{ м}^2$
$v$	0,585 м/с	$M_v=M_H^{0,5}$	2,82	0,21 м/с
$Q$	$13,16 \text{ м}^3/\text{с}$	$M_Q=M_H M_B M_B=M_H^{2,83}$	359,3	36,6 л/с
$i$	0,00025	$M_i=M_H^{-0,33}$	0,503	0,0005

Принятый масштаб скорости, определенный по зависимости

$$M_v=M_H^{0,5}, \quad (32)$$

не обеспечивает на модели размывающих скоростей, т.е

$$v_m=0,21 \text{ м/с} < v_{н,доп}=0,28 \text{ м/с}, \quad (33)$$

где  $v_{н,доп}$  – неразмывающая скорость на начало подвижки частиц, рассчитанная по формуле Э.И. Михневича [4].

Поскольку скорость на модели  $v_m$  отвечает условию (33), то ее величину определяем как независимую переменную, исходя из следующего условия:

$$v_m > v_{н,доп} \quad (34)$$

Для этого дополнительно увеличиваем уклон дна модели до значения, рассчитываемого по формуле Шези

$$i = \frac{v_{н,доп}^2}{C^2 R} = 0,001, \quad (35)$$

где  $C$  – коэффициент Шези для модели;  $R$  – гидравлический радиус для модели.

Уклон модели при скорости  $v_{н,доп}=0,28$  м/с должен быть не менее  $i=0,001$ .

После корректировки получаем следующие параметры модели и масштабные коэффициенты (табл. 3).

Методика проведения экспериментов заключалась в следующем:

- подготавливали русло с заданным уклоном и по исходному руслу пропускали расчетный расход (45 или 60 л/с), устанавливали уклон потока  $i=0,001$  и измеряли скорости в центральном створе расчетного участка длиной 10 м;
- после пропуска расхода проводили нивелирование исходного состояния расчетного участка русла (11 створов через 1 м). Все данные заносили в ПЭВМ и с использованием программ *Microsoft Excel 97* и *Surfer 6* строили поперечники по створам и карты изолиний расчетного участка;
- модель конструкции механизма устанавливали в русле примерно в 2 м перед началом расчетного участка, пропускали расчетный расход и перемещали конструкцию по руслу, стараясь при этом сохранять постоянную скорость ее передвижения. В процессе опыта на участке длиной 20 м через 2 м фиксировали время прохождения конструкции, а также изменение уровней воды в колодцах по мере перемещения конструкции вдоль русла;
- после каждого прохода конструкции измеряли скорости на расчетном участке во вновь сформированном русле сложного сечения, а после его осушения нивелировали в тех же створах, что и исходное русло. По программе *Surfer 6* определяли баланс перемещения масс грунта (размыв – межженная часть русла, отложение – пойма нового русла).

Всего проведено 7 опытов: 3 при расходе 45 л/с и 4 при расходе 60 л/с.

Анализ данных по размывающей способности потока выявил наибольшее сходство значений удельной транспортирующей способности, полученных на модели и расчетом по формуле (36), аналогичной по структуре формуле В.Н. Гончарова [5].

Таблица 3. Значения параметров модели

Характеристика	Натурное значение характеристики	Масштабный коэффициент	Модельное значение характеристики
$d_{50}$	$0,225 \times 10^{-3}$ м	0,68	$0,33 \times 10^{-3}$ м
$H_c$	1 м	8	0,125 м
$B$	30,5 м	15,9	1,91 м
$m = M_B / M_H$	1	1,98	$m < 0,35 (B/H)_n = 10,7$
$H/d_{50}$	3077	8,12	379
$\omega$	$30,5 \text{ м}^2$	127	$0,24 \text{ м}^2$
$v$	0,585 м/с	2,09	0,28 м/с
$Q$	13,16	196,4	$0,067 \text{ м}^3/\text{с}$
$i$	0,00025	0,25	0,001

$$q_n = Q_n / c = A_q (1 + f_m) d_{50} u_{н.дон} \left( \frac{K_u u_c}{u_{н.дон}} \right)^5, \quad (36)$$

где  $\chi$  – длина контура углубляемой зоны, приравнивается длине двух симметричных планок крепления щитов (рис. 4);  $q_n$  – удельная производительность размыва по контуру углубляемой зоны,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $A_q$  – опытный коэффициент, учитывающий плановое положение блока донных щитов, определяется по опытными данным;  $d_{50}$  – средняя крупность наносов, м;  $\varphi_t$  – параметр турбулентности из формулы В.Н. Гончарова;  $K_u$  – коэффициент перехода от средней скорости в сжатом сечении к средней скорости между щитами (определяется по данным моделирования).

Погрешность по определению размывающей способности потока по формуле (36) в пределах опытных данных составила 38 % с вероятностью 81 %. Большой процент погрешности объясняется низкой точностью получения исходных данных по объемам переработки русла, которая находилась в пределах от 20 до 49 % в зависимости от объемов переработки русла.

Таким образом, технологический процесс описывается следующей системой уравнений, полученных на основании математического и физического моделирования:

$$V = \frac{Q_p - Q_m}{w_a - i w_n} = \frac{Q_n}{w_p} = \frac{Q_p - Q_m}{w_n}, \quad (37)$$

$$Q_m = fB(h_n + h_p)\sqrt{2gZ} = u_c w_c = u_c (Bh_n + w_p), \quad (38)$$

$$q_n = A_q (1 + f_m) d_{50} u_{н.дон} \left( \frac{K u_c}{u_{н.дон}} \right)^5. \quad (39)$$

Система уравнений решается с применением ЭВМ. В качестве примера приведем результаты расчета для опытного участка русла, расположенного в среднем течении реки Орессы.

Исходные данные:

уклон	$i=0,000156;$
расчетный расход	$Q_p=6,3 \text{ м}^3/\text{с};$
глубина русла в зоне углубления	$h_n=1,2 \text{ м};$
ширина русла по урезу	$B=23,5 \text{ м};$
средняя глубина	$H_c=0,8 \text{ м};$
средний диаметр фракций наносов	$d_{50}=0,00015 \text{ м};$
параметр турбулентности для $d_{50}=0,00015$	$\varphi_r=5,25$

Расчет.

1. Применяем механизм с длиной контура углубляемой зоны  $\chi=20$  м и осредненной высотой блока донных щитов  $r_c=0,8$  м.

2. Задаемся параметрами углубления  $B=6$  м и  $h_p=0,3$  м, или  $\omega_p=Bh_p=1,8 \text{ м}^2$ .

3. Находим неразмывающую скорость  $u_{н.дон}=0,34$  и коэффициент скорости  $\varphi=0,554$ .

4. Решая систему уравнений (37)...(39) с применением специальной программы для ЭВМ, определяем следующие параметры:

-скорость перемещения механизма	$V=26,3 \text{ м/ч} (0,0073 \text{ м/с});$
-производительность	$Q_{п}=47,3 \text{ м}^3/\text{ч} (0,013 \text{ м}^3/\text{с});$
-транзитный расход	$Q_r=6,14 \text{ м}^3/\text{с};$
-скорость в сжатой зоне	$u_c=0,68 \text{ м/с};$
-перепад глубин	$Z=0,077 \text{ м}.$

Таким образом, система уравнений (37)...(39) позволяет рассчитать оптимальный технологический режим углубления русла для конкретных геоморфологических и гидравлических условий при заданных параметрах механизма.

#### Литература

1. Караушев А.В. Теория и методы расчета речных наносов. – Л.: Гидрометеоздат, 1977. – 272 с.
2. Справочник по гидравлическим расчетам. Под ред. П.Г. Киселева. – М.: Энергия, 1972. – 312 с.
3. Гришанин К.В. Основы динамики русловых потоков. – М.: Транспорт, 1990. – 320 с.
4. Михневич Э.И. Устойчивость русл открытых водотоков. – Мн.: Ураджай, 1988. – 240 с.
5. Гончаров В.Н. Основы динамики русловых потоков. – Л.: Гидрометеоздат, 1954. – 452 с.

#### Резюме

В статье приводятся результаты математического и физического моделирования по разработке теоретических основ энергосберегающей технологии углубления рек на основе использования размывающей способности управляемого руслового потока. По результатам исследований разработана методика расчета способа углубления рек и каналов, включающего установку стеснительного устройства в русле с последующим его перемещением. Методика позволяет рассчитать оптимальный технологический режим углубления русла для конкретных геоморфологических и гидравлических условий.

**Ключевые слова:** мелиорация, углубление рек, русловой поток, расчет.

#### Summary

**Karnaikhov V. Results of mathematical and physical simulation of a new method of rivers deepening.**

The article presents the results of mathematical and physical simulation on development of theoretical principles of a power-saving technology of river deepening on the basis of usage of eroding ability of controlled stem stream. By results of investigations, the procedure of account of the process of river (canal) deepening is developed. The method includes installation of the constraining device in a channel with its subsequent moving. The procedure allows to account an optimum technological regime of channel deepening under specific geomorphological and hydraulic conditions.

**Key words:** land reclamation, river deepening, stem stream, account.