

В.П. БАЛДЖЯН

РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ УСТАНОВИВШЕЙСЯ СТАДИИ
РУСЛОВОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Исследованы русловые преобразования, происходящие на различных участках водостоков из-за размыва русла или отложения наносов. Со временем этот процесс затухает, и русло приобретает новую стабильную форму. Разработана общая математическая модель для стабилизированной стадии русловых преобразований. С этой целью предложена такая постановка задачи, которая позволяет рассматривать новую форму русла не как конечный результат сложного нестационарного процесса, а как отдельно решаемую задачу стационарного движения. С использованием основных балансовых уравнений гидродинамики двухфазного потока получено простое дифференциальное уравнение. Его решение дает возможность прогнозировать координаты дна нового русла, образованного в результате стабилизации русловых изменений.

Ключевые слова: водосток, русловое преобразование, стабилизированное русло, живое сечение, ширина русла.

Введение. Любое природное нестационарное явление берет начало с устойчивого состояния и со временем возвращается к прежней стационарности или приобретает новую устойчивую форму. Аналогичный процесс наблюдается и в ходе русловых преобразований. Если по какой-то причине на определенном участке водостока начинаются русловые изменения (размыв или отложение наносов), то со временем этот процесс затухнет, и русло обязательно приобретет новую стабильную форму. При этом восстанавливается условие постоянства расхода наносов по длине русла, имеющего место до начала преобразований. Существенные значения русловых преобразований наблюдаются при прохождении паводков и селевых потоков. На горных и предгорных участках рек, где руслообразующие породы нескальные и достаточно легко деформируются, этот процесс сравнительно скоротечен. Для таких водостоков более характерно вертикальное направление руслового преобразования, т.е. изменяется положение дна русла: в верхних течениях происходит размыв и транспортировка грунта, а в нижних - их отложение. На равнинных участках сравнительно увеличивается удельный вес изменения планового очертания реки. Аналогичные процессы происходят и в случае установления на реках гидротехнических сооружений. В частности, перед поперечными русловыми сооружениями (плотина, селеуловитель и т.п.) из-за отложения

наносов дно поднимается. У мостовых переходов, берегозащитных и прочих сооружений может наблюдаться как размыв дна, так и отложение наносов. Необходимо отметить, что в научной литературе задачи русловых преобразований не рассматривались как частные решения общей модели. Достаточно надежно решены задачи по расчету деформации мостовых переходов через равнинные большие реки [1]. Хорошо изучена проблема прогнозирования плановых и вертикальных изменений русел тех же рек [2,3]. Известно, что значительные русловые изменения происходят в верхних течениях многочисленных водостоков. При освоении горно-предгорных территорий устанавливается большое количество русловых сооружений сравнительно малых размеров. Это приводит к изменению естественного режима реки и развитию русловых изменений. Несмотря на актуальность данной проблемы, она изучена достаточно слабо. Предложены нестрогие частные решения, однако обобщенная достоверная постановка проблемы отсутствует.

Надежность расчетных размеров сооружения (высота плотины и селеуловителя, определение глубины заложения фундаментов мостовых и берегозащитных конструкций и т.д.) обусловлена точностью прогнозирования координат поверхности, установившейся в ходе стабилизации процесса, т.е. после завершения русловых изменений. Следовательно, достоверность прогноза положения дна русла имеет важное практическое значение.

Целью работы является разработка математической модели русловых преобразований на стадии приобретения устойчивой формы.

Постановка задачи. Предположим, что на каком-то участке реки с координатами первоначального дна Z_c (рис. 1) происходят русловые изменения, в частности, из-за отложения наносов дно поднимается. Через определенное время этот процесс на данном участке будет завершен, и по длине реки снова восстановится транзитная транспортировка поступающих наносов, т.е. расход наносов станет постоянным. После завершения руслового преобразования на этом участке новое устойчивое дно S-S характеризуется координатами Z и толщиной слоя отложений наносов H . В указанных условиях движение потока в русле станет стационарным, характеризующимся гидравлическими параметрами b, A, V, i (рис.1), где уклон поверхности S-S определяется как $i = \frac{dz}{dx}$ (положительное направление x принято против течения). В соответствии с продольным сечением стабилизированного участка русла, указанным на рис. 1, плановое очертание будет иметь расширяющийся по движению вид (непризматическое русло, рис. 2).

Предложенная постановка позволяет рассматривать задачу по установлению формы стабилизированной поверхности не как конечный результат сложного нестационарного процесса, а как отдельно решаемую задачу стационарного движения. При этом искомыми величинами являются координаты поверхности S-S и параметры стационарного наносонесущего потока, движущегося по ней.

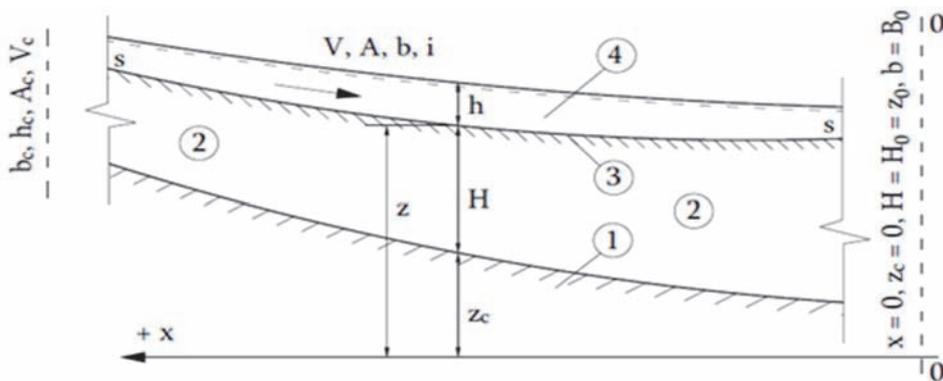


Рис. 1. Расчетная схема продольного сечения участка водостока на завершающей стадии руслообразующих процессов и граничные условия: 1 – дно водотока до русловых изменений, 2 – наносные отложения, 3 – дно водотока после русловых изменений (стабилизированная поверхность s-s), 4 – зона движения стационарного одномерного потока

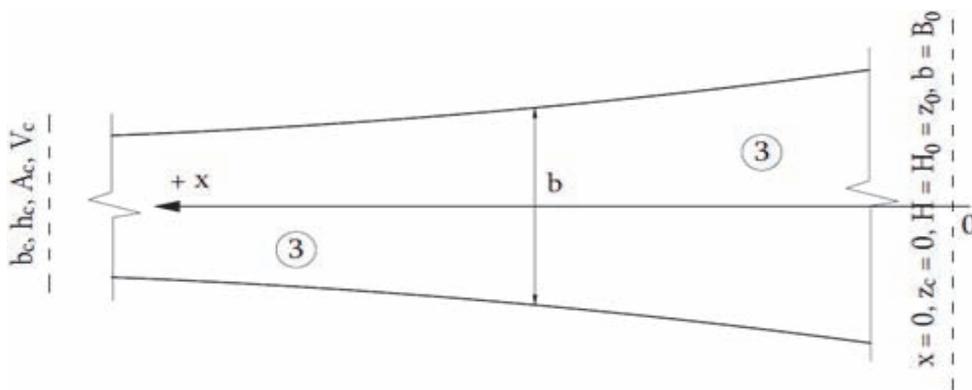


Рис. 2. Плановое очертание участка водостока на завершающей стадии руслообразующих процессов и граничные условия: 3 – дно русла после русловых изменений (стабилизированная поверхность s-s)

Результаты исследования. Постановкой задачи доказано, что движение наносонесущего потока в новом русле имеет стационарный характер. Для такого случая применимы законы гидродинамики одномерного установив-

шегося движения, в которых имеют место три балансовых уравнения: уравнение движения или энергии, постоянство расходов потока и наносов [4,5]:

$$-\left[\frac{dz}{dx} + \frac{dh}{dx} + \frac{d}{dx}\left(\frac{V^2}{2g}\right)\right] = \frac{dh_f}{dx}, \quad (1)$$

$$Q = VA = const, \quad (2)$$

$$Q_s = const \text{ или } S = const, \quad (3)$$

где Q_s - расход наносов; S – объем наносов в единице объема потока (концентрация потока). Допустимость применения уравнения (1) для наносонесущих потоков до концентрации 0,5 (объемы наносов и воды равны) доказана в работе [6].

С учетом приведенной системы уравнений в работах [7,8] решены частные задачи русловых преобразований по установлению уклона конечной поверхности селевых отложений. При этом в условии постоянства расхода наносов (3) использованы конкретные формулы. Но, как показывают многие авторы [9,10], при одинаковых исходных данных для величины Q_s (или S) разные формулы дают отличающиеся друг от друга в несколько раз результаты. Учитывая указанные и ряд других недостатков существующих методов, в данной работе сделана попытка разработать основы обобщенной теории для описания исследуемого процесса, а для прямоугольной формы русла предложить решение задачи.

По движению потока продольный уклон русла обычно уменьшается. В верхних течениях наносонесущая способность потока выше, и из-за его низкой загруженности наносами наблюдается транзитное движение. С уменьшением уклона русла уменьшается и наносонесущая способность. На определенном участке реки загруженность потока приобретает предельное значение. После этого участка поток не в состоянии нести все количество наносов, и начинается их отложение. Обозначая индексом “0” все параметры на участке предельной загруженности потока и используя уравнение неразрывности потока (2), введем безразмерные величины (линейным масштабом безразмерности принята ширина указанного участка b_0)

$$\bar{h} = \frac{h}{b_0}, \quad \bar{b} = \frac{b}{b_0}, \quad \bar{A} = \frac{A}{A_0}, \quad \bar{\chi} = \frac{\chi}{\chi_0}, \quad \bar{Q} = \frac{Q}{Q_0} = 1, \quad \bar{V} = \frac{V}{V_0}. \quad (4)$$

Согласно уравнению (2) $\bar{Q} = 1$, будем иметь

$$\bar{V} = \frac{1}{A}. \quad (5)$$

На основе анализа и обработки более сорока формул по определению расхода наносов в условиях соблюдения баланса наносов в работе [11] получена закономерность между смоченным периметром и площадью живого сечения

$$\bar{\chi} = \bar{A}^a, \quad (6)$$

где показатель степени a с учетом многообразия анализированных формул, соответствующих разным русловым режимам, меняется в интервале от 3,0 до 4,5.

Представляя уравнение (1) в безразмерном виде, используя ряд известных в гидродинамике закономерностей и совместно решая его с зависимостями (5) и (6), ранее нами было получено следующее дифференциальное уравнение [12]:

$$\frac{d\bar{z}}{d\bar{x}} + \frac{d\bar{h}}{d\bar{x}} - \frac{Fr_0}{\beta_0 \bar{A}^3} \frac{d\bar{A}}{d\bar{x}} = i_0 \bar{d}_{OT}^{1/3} \bar{A}^{(4a-10)/3}, \quad (7)$$

где Fr_0 - число Фруда; i_0 - уклон русла и $\beta_0 = \frac{b_0}{h_0}$ соответствуют участку русла с шириной b_0 .

Это уравнение применимо для разных режимов движения наносонесущего потока небольшой глубины, когда русловые преобразования на данном участке реки практически завершены, и русло приобретает новое устойчивое состояние. В уравнении (7) имеется три неизвестных: координата стабилизированной поверхности Z , глубина потока h и площадь его поперечного сечения A . Поскольку в непрямоугольных руслах величина A меняется и по глубине, и по длине русла, т.е. $A = f(h, x)$, то производное площади представляется как

$$\frac{dA}{dx} = \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial h} \frac{dh}{dx}. \quad (8)$$

С учетом безразмерных параметров будем иметь

$$\frac{d\bar{A}}{d\bar{x}} = \frac{\partial\bar{A}}{\partial\bar{x}} + \frac{\partial\bar{A}}{\partial\bar{h}} \frac{d\bar{h}}{d\bar{x}}. \quad (9)$$

Подставляя безразмерное значение производной площади в уравнение (7), получим

$$\frac{d\bar{z}}{d\bar{x}} + \frac{d\bar{h}}{d\bar{x}} - \frac{Fr_0}{\beta_0 \bar{A}^3} \left(\frac{\partial\bar{A}}{\partial\bar{x}} + \frac{\partial\bar{A}}{\partial\bar{h}} \frac{d\bar{h}}{d\bar{x}} \right) = i_0 \bar{d}_{от}^{1/3} \bar{A}^{(4a-10)/3}. \quad (10)$$

Полученное уравнение показывает, что задачу невозможно решить без конкретизации поперечной формы русла. Все многообразие поперечных сечений водостоков обычно представляется в виде прямоугольной, параболоидной или трапецидальной форм. Частное производное $\partial\bar{A}/\partial\bar{h}$ представляет собой некую ширину живого сечения и зависит от поперечной формы русла. В общем случае оно меняется по глубине. Если же русло прямоугольное, эта ширина для данного сечения будет постоянной. Что касается производной $\partial\bar{A}/\partial\bar{x}$, то она может определяться лишь при известной плановой конфигурации участка русла, подвергнутого русловым преобразованиям. Кроме поперечной формы, для решения задачи по уравнению (10) должна быть известна и закономерность изменения боковых стенок сформированного непризматического русла. С учетом сказанного последующие решения задачи могут быть упрощены, если в дифференциальном уравнении (7) параметры живого сечения A и h заменить на ширину русла b . При этом поперечное сечение русла, как более практичное, принимается трапецидальным (рис. 3 а).

После завершения процесса отложения наносов в этом русле образовалось новое устойчивое дно $S-S$ (положение 3 на рис. 3 а). В дальнейшем стационарное движение наносонесущего потока происходит по этой поверхности. Зона движения естественно трапецидальная (положение 4 на рис. 3 а). Для упрощения дальнейших разработок делается практически незначительное допущение – зона движения принимается прямоугольной (положение 5 на рис. 3 б). Это означает, что в поперечном сечении пренебрегаются затемненные треугольники (рис. 3 б). На водостоках соотношение b/h обычно меняется в промежутке 3-15. С учетом этого, по сравнению с общей площадью живого сечения A , без существенных ошибок суммой площадей этих треугольников можно пренебречь.

Для прямоугольной поперечной формы русла площадь и смоченный периметр живого сечения определяются следующими безразмерными зависимостями:

$$\bar{A} = \beta_0 \cdot \bar{b} \cdot \bar{h}, \quad (11)$$

$$\bar{\chi} = \frac{\beta_0}{\beta_0 + 2} (\bar{b} + 2\bar{h}), \quad (12)$$

где β_0 - известное в гидравлике соотношение b_0 / h_0 .

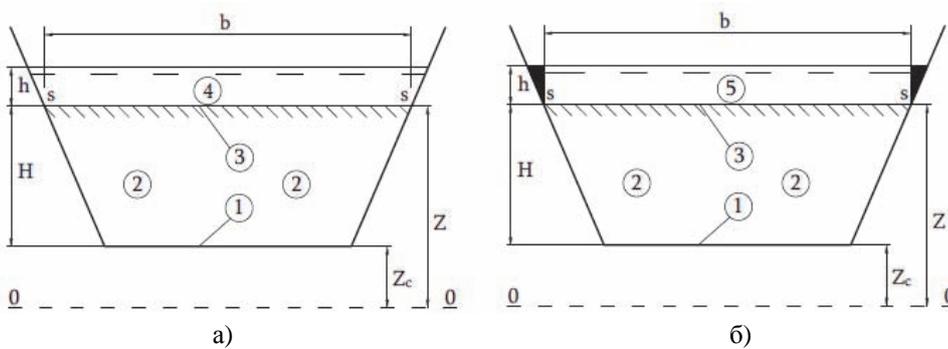


Рис. 3. Схема поперечного сечения участка русла, подвергнутого преобразованиям: а- фактическая; б- расчетная; 1- дно водотока до русловых изменений, 2- отложения наносов, 3- дно водотока после русловых изменений (стабилизированная поверхность s-s), 4 – фактическая зона движения (трапецидальная), 5 – расчетная зона движения (прямоугольная)

Совместно решая выражения (6), (11) и (12) и проведя ряд упрощений, получим

$$\bar{h} = \frac{1}{\beta_0} \frac{1}{\bar{b}^{a-1/a}}. \quad (13)$$

С учетом зависимости (13) закономерность (11) примет следующий вид:

$$\bar{A} = \bar{b}^{1/a}, \quad (14)$$

а вместо выражения (5) получим

$$\bar{V} = \frac{1}{\bar{b}^{1/a}}. \quad (15)$$

Согласно выражениям (13) и (14), имеем

$$\frac{d\bar{h}}{d\bar{x}} = -\frac{a-1}{a\beta_0} \frac{1}{\bar{b}^{(2a-1)/a}} \frac{d\bar{b}}{d\bar{x}}, \quad (16)$$

$$\frac{d\bar{A}}{d\bar{x}} = \frac{1}{a\bar{b}^{(a-1)/a}} \frac{d\bar{b}}{d\bar{x}}. \quad (17)$$

Учитывая выражения (14), (16) и (17), дифференциальное уравнение (7) примет вид

$$\frac{d\bar{z}}{d\bar{x}} - \frac{a-1}{a\beta_0} \frac{1}{\bar{b}^{(2a-1)/a}} \frac{d\bar{b}}{d\bar{x}} - \frac{Fr_0}{\beta_0 a} \frac{1}{\bar{b}^{(a+2)/a}} \frac{d\bar{b}}{d\bar{x}} = i_0 \bar{d}_{OT}^{1/3} \bar{b}^{-(4a-10)/3a}, \quad (18)$$

или в окончательном виде будем иметь

$$\frac{d\bar{z}}{d\bar{x}} - \frac{1}{a\beta_0} \left(\frac{a-1}{\bar{b}^{(2a-1)/a}} + \frac{Fr_0}{\bar{b}^{(a+2)/a}} \right) \frac{d\bar{b}}{d\bar{x}} = i_0 \bar{d}_{OT}^{1/3} \bar{b}^{-(4a-10)/3a}. \quad (19)$$

С помощью уравнения (19) установлена связь между координатой дна русла и его шириной на том участке водостока, где в результате русловых изменений образовано новое стабилизированное русло и восстановлена стационарность движения. Это уравнение получено совместным решением трех балансовых уравнений гидродинамики применительно к условиям движения потока небольшой глубины. Для интегрирования уравнения (19) необходимы краевые и начальные условия данной задачи, т.е. нужно иметь закономерность изменения ширины русла (например, конфигурация мостового перехода обычно задается) или зависимость между Z и b (например, на рис. 3 такая связь наблюдается).

Заключение. Решение уравнения (19) дает возможность прогнозировать конечный результат естественных и искусственных русловых преобразований как в случае отложения наносов, так и при смыве дна водостока. В частности, можно рассчитать деформации мостового перехода, установить координаты верхней поверхности селевых отложений, образованных на конусах выносов или в верхнем бьефе поперечных задерживающих сооружений, и т.д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Федотов Г.А.** Проектирование автомобильных дорог. - М.: Транспорт, 1989. – 437с.
2. **Гришанин К.В.** Динамика русловых потоков. - Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 311с.
3. **Клавен А.Б., Копалиани З.Д.** Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и русловых процессов. - СПб.: Нестор-История, 2011.- 504с.
4. **Чоу В.Т.** Гидравлика открытых каналов /Пер. с англ.; Под ред. А.И. Богомолова. -М.: Госстройиздат, 1969. – 464 с.
5. **Саноян В.Г.** Теория транспортирующей способности потока и ее приложения к разработке новых конструкций гидротехнических сооружений и проблемам руслоформирования: Автореферат дис. ... д.т.н. /ВНИИИВОДГЕО. - М., 1990. – 48с.
6. **Балджян П.О., Балджян В.П.** Руслоформирующие явления у селезащитных сооружений. Методы расчета их параметров. - Germany-Latvia, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2018.- 57 p.
7. **Тевзадзе В.И.** Методика расчета параметров селевых потоков и конструкций противоселевых сооружений, применяемых в Японии /ЦБНТИ Минводхоза СССР.- Обзорная информация, N12.-М., 1977. – 48 с.
8. **Балджян П.О.** О методике расчета руслоформирующего процесса в верхнем бьефе селевых и паводковых задерживающих сооружений //Материалы V Всероссийской н/т конференции “Политранспортные системы”. Часть 1.- Красноярск, 2007.- С. 334-340.
9. **Юфин А.П.** Движение наносов и гидравлический транспорт.-М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 199 с.
10. **Флейшман С.М., Перов В.Ф.** Сели. – М.: Изд. МГУ, 1986. – 286 с.
11. **Балджян П.О.** Определение зависимости между гидравлическими параметрами потоков при постоянстве их наносонесущей способности //Известия НАН РА и ГИУА. Серия ТН.- 2005.-Т. 58, N 2. - С. 380 - 385.
12. **Балджян В.П., Токмаджян В.О., Балджян П.О., Баюц А.В.** Прогноз положения поверхности отложений на верхнем бьефе селезащитных сооружений. //Материалы V Межд. конференции “Селевые потоки: катастрофы, прогноз, защита”, 1-5 октября 2018 г. - Тбилиси-Телави, 2018.- С. 283-288.

Шушинский технологический университет. Материал поступил в редакцию 12.02.2019.

Վ.Պ. ԲԱԼՋՅԱՆ

ՀՈՒՆԱՅԻՆ ՎԵՐԱԿԱԳՄԱՎՈՐՄԱՆ ԿԱՅՈՒՆԱՑԱԾ ՓՈՒԼԻ ՏԵՍԱԿԱՆ
ՀԻՍՔԵՐԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ

Ուսումնասիրվել են հունային վերակազմավորումները, որոնք հունների ողողման կամ ջրաբերուկների կուտակման պատճառով ընթանում են ջրահոսքերի տարբեր տեղամասերում: Ժամանակի ընթացքում այդ գործընթացը մարում է, և հունը ձեռք է բերում կայունացած նոր տեսք: Հունային վերակազմավորումների կայունացած փուլի համար մշակվել է ընդհանուր մաթեմատիկական մոդել: Այդ նպատակով առաջարկվել է խնդրի այնպիսի դրվածք, որը թույլ է տալիս հունի նոր տեսքը ոչ կայունացած բարդ երևույթի վերջնարդյունքի փոխարեն դիտարկել որպես կայունացած շարժման անկախ խնդրի լուծում: Երկֆազ հեղուկի հիդրոդինամիկայի հիմնական հաշվեկշռային հավասարումների օգտագործմամբ ստացվել է պարզ դիֆերենցիալ հավասարում: Դրա լուծումը հնարավորություն է տալիս կանխատեսել հունային փոփոխությունների կայունացման արդյունքում ձևավորված նոր հունի կոորդինատները:

Առանցքային բառեր. ջրահոսք, հունային վերակազմավորում, կայունացած հուն, կենդանի կտրվածք, հունի լայնություն:

V.P. BALJYAN

DEVELOPING THE THEORETICAL BASES OF THE ESTABLISHED STAGE
OF THE RIVER BED CONVERSION

The river bed conversions that occur in different parts of the drainage due to the erosion of the river bed or sediment deposition are investigated. Over time, this process fades, and the river bed acquires a new stable form. A general mathematical model has been developed for the stabilized stage of the river bed conversion. At that, such a formulation of the problem is proposed which allows to consider a new form of the river bed not as the end result of a complex non-stationary process, but as a separately solvable problem of the stationary motion. Using the basic balance equations of hydrodynamics of a two-phase flow, a simple differential equation is obtained. Its solution makes it possible to predict the coordinates of the bottom of the new river bed formed as a result of the stabilization of the river bed changes.

Keywords: drain, river bed conversion, stabilized river bed, living cut, width of the river bed.