

5. БАЛАНС НАНОСОВ И РУСЛОВЫЕ ДЕФОРМАЦИИ

5.1. Уравнение баланса наносов и распределение мутности по длине потока

Многие задачи о русловых деформациях и о распределении мутности на участках речного потока могут решаться на основании уравнения баланса наносов. Предложение по использованию метода баланса при исследовании формирования русла, по-видимому, впервые было выдвинуто Ф. Экснером в 1922 г., составившим на основе баланса наносов уравнение деформации русла в простейшей форме и применившим его к изучению продольного профиля речного потока. Впоследствии уравнение баланса наносов использовалось и усовершенствовалось в работах М. А. Великанова [19], И. И. Леви [85], А. В. Караушева [56] и др.

В самом общем виде уравнение баланса наносов для участка реки длиной Δx , ограниченного двумя створами (начальным и конечным), можно представить в виде

$$P_{S_{\text{нач}}} + P_{S_{\text{бп}}} + \Delta P_{S_{\text{дно}}} - P_{S_{\text{кон}}} = 0. \quad (5.1)$$

Здесь $P_{S_{\text{нач}}}$ и $P_{S_{\text{кон}}}$ — соответственно общие секундные расходы наносов всех фракций в начальном и конечном створах участка, кг/с; $P_{S_{\text{бп}}}$ — суммарный общий расход наносов боковых притоков (рек и ручьев) на участке изучаемой реки, определяемый с учетом оттока (например, при водозаборе). Если отток наносов превышает приток, значение $P_{S_{\text{бп}}}$ будет отрицательным; $\Delta P_{S_{\text{дно}}}$ — секундный результирующий расход наносов через поверхность русла на всем участке, т. е. секундная потеря наносов за счет осаждения или секундный взмыв наносов. При осаждении $\Delta P_{S_{\text{дно}}}$ отрицательная величина, при взмыве — положительная.

Уравнение баланса может быть написано также и для частной фракции транспортируемых наносов. В этом случае вместо общих расходов наносов оно будет содержать соответственно расходы частной (i -той) фракции, т. е. величины $P_{S_{i\text{нач}}}$, $P_{S_{i\text{кон}}}$, $P_{S_{i\text{бп}}}$ и $\Delta P_{S_{i\text{дно}}}$. При трактовке общего расхода наносов как суммы расходов наносов частных фракций уравнение баланса записывается в виде

$$\sum_{i=1}^m P_{S_{i\text{нач}}} + \sum_{i=1}^m P_{S_{i\text{бп}}} + \sum_{i=1}^m \Delta P_{S_{i\text{дно}}} - \sum_{i=1}^m P_{S_{i\text{кон}}} = 0. \quad (5.2)$$

В принципе уравнения баланса наносов могут использоваться для оценки результирующих русловых деформаций на достаточно больших участках рек. Однако ввиду малой точности измерений стока наносов (обычно $\pm 10-15\%$) метод баланса применим лишь в случаях очень интенсивного изменения транспорта наносов по длине участка реки. Примером могут служить нижние бьефы гидроузлов, где начальный расход наносов практически равен нулю. Если при этом и боковой приток наносов $P_{\text{бп}} = 0$, то средняя на участке деформация получается весьма элементарно. Выражая общую деформацию русла, обусловленную вертикальным перемещением всех частных фракций, через D (в тех же единицах, что и расход наносов) и принимая, что на участке реки длиной Δx деформация равна ΔD , будем иметь соотношение

$$\Delta D = -\Delta P_{\text{дно}}. \quad (5.3)$$

Для случая нижнего бьефа при отсутствии поступления наносов через плотину и через боковые притоки деформация будет

$$\Delta D = -P_{\text{кон}}. \quad (5.4)$$

Таким же образом могут быть записаны и деформации, обусловленные вымывом или осаждением отдельных фракций. В этом случае, вместо фигурирующих в равенствах (5.3) и (5.4) величин, будем иметь ΔD_i — частную деформацию и $P_{\text{дно}}, P_{\text{кон}}$.

Рассмотрим теоретический вывод уравнения баланса отдельной (i -той) фракции наносов для простейшего случая бесприточного участка реки, выполненный А. В. Караушевым [56, 58]. Пусть в пределах участка длиной Δx размеры русла и гидравлические элементы потока меняются мало. Их изменение может быть учтено при последовательном переходе от участка к участку уже в процессе расчета деформации.

Расход наносов i -той фракции через начальный створ участка выразим произведением $Q \cdot s_i$, где Q — расход воды в $\text{м}^3/\text{с}$, s_i — средняя частная мутность потока в $\text{кг}/\text{м}^3$. Расход наносов i -той фракции через конечный створ равен $Q(s_i + \Delta s_i)$, где Δs_i — отрицательное или положительное приращение содержания наносов по длине Δx . Обозначим через B — ширину реки, а через q_{si} — направленный в сторону русла секундный результирующий вертикальный расход наносов i -той фракции через единицу поверхности дна в $\text{кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$. При осаждении наносов величину q_{si} будем считать положительной, а при взмыве — отрицательной, т. е. примем, что алгебраический знак q_{si} совпадает со знаком деформации ΔD_i . Площадь поверхности дна на рассматриваемом участке реки с достаточным приближением можно считать равной $B \Delta x$.

Полный расход наносов i -той фракции через эту поверхность дна будет

$$q_{si} B \Delta x = \Delta D_i. \quad (5.5)$$

Уравнение баланса наносов i -той фракции запишется в виде

$$Q_{si} = Q(s_i + \Delta s_i) + q_{si} B \Delta x. \quad (5.6)$$

После упрощения и замены конечных приращений бесконечно малыми получим

$$Q ds_i + q_{si} B dx = 0. \quad (5.7)$$

Вертикальный результирующий расход наносов i -той фракции через единицу поверхности дна q_{si} складывается из расхода, определяемого свободным осаждением наносов под влиянием силы тяжести, и расхода, определяемого турбулентным обменом, причем последний направлен снизу вверх. Расход осаждения наносов из выделенного элементарного объема через единицу горизонтальной поверхности, расположенной на границе дна (уклоном дна пренебрегаем), равен произведению $u_i s_i$, где u_i — гидравлическая крупность частиц i -той фракции. Вертикальный расход наносов через поверхность дна, осуществляющийся под влиянием турбулентного обмена, приближенно примем пропорциональным разности между частной мутностью взмыва и средней частной мутностью выделенного объема ($s_{взмi} - s_i$). Получаем следующие приближенные выражения для результирующего вертикального расхода наносов:

$$q_{si} = u_i s_i - k_i (s_{взмi} - s_i), \quad (5.8)$$

или

$$q_{si} = (u_i + k_i) s_i - k_i s_{взмi}. \quad (5.9)$$

Здесь k_i — коэффициент пропорциональности, приобретающий особое численное значение для каждой фракции. При введении полученного выражения q_{si} в уравнение баланса находим

$$[(u_i + k_i) s_i - k_i s_{взмi}] B dx = -Q ds_i. \quad (5.10)$$

Интегрирование дает

$$\frac{Q}{B(u_i + k_i)} \ln [(u_i + k_i) s_i - k_i s_{взмi}] = -x + c_1, \quad (5.11)$$

где c_1 — произвольная постоянная.

Определим c_1 из условий для начального створа рассматриваемого участка реки: при $x = 0$ средняя мутность $s_i = s_{начi}$. Подставляя значение c_1 в найденное уравнение и преобразуя его, получаем окончательно

$$s_i = \frac{k_i}{u_i + k_i} s_{взмi} + \left(s_{начi} - \frac{k_i}{u_i + k_i} s_{взмi} \right) e^{-\frac{B(u_i + k_i)}{Q} x} \quad (5.12)$$

Определим теперь коэффициент k_i . Исходим из того предположения, что при равенстве средней частной мутности потока частной мутности, отвечающей его транспортирующей способности $s_{три}$, результирующий вертикальный расход наносов через

поверхность дна равен нулю ($q_{si} = 0$), что отвечает отсутствию заиления или размыва. Таким образом, при $q_{si} = 0$ соотношение (5.8) принимает вид

$$u_i s_{\text{тp}i} = k_i (s_{\text{взм}i} - s_{\text{тp}i}). \quad (5.13)$$

В отличие от предыдущих в настоящем разделе мутность (частная и общая), отвечающая транспортирующей способности потока, обозначается через $s_{\text{тp}i}$ и $S_{\text{тp}}$ вместо $s_{\text{ср}i}$ и $S_{\text{ср}}$. Здесь это необходимо для подчеркивания различия между действительной нагрузкой потока наносами и его транспортирующей способностью.

Запишем выражение частной мутности насыщенного потока следующим образом:

$$s_{\text{тp}i} = \Gamma_i s_{\text{взм}i}, \quad (5.14)$$

где Γ_i — частный гидромеханический параметр наносов i -той фракции.

На основании соотношения (5.13) имеем

$$u_i s_{\text{тp}i} = k_i s_{\text{тp}i} \left(\frac{1}{\Gamma_i} - 1 \right), \quad (5.15)$$

отсюда получаем

$$k_i = \frac{u_i \Gamma_i}{1 - \Gamma_i}. \quad (5.16)$$

или

$$\frac{k_i}{u_i + k_i} = \Gamma_i. \quad (5.17)$$

Коэффициент k_i имеет ту же размерность, что и u_i , т. е. м/с.

Теперь можем преобразовать основное уравнение изменения частной мутности по длине потока и придать ему следующий вид:

$$s_i = s_{\text{тp}i} + (s_{\text{нач}i} - s_{\text{тp}i}) e^{-\frac{B(u_i + k_i)}{Q} x}. \quad (5.18)$$

Естественно, что при $s_{\text{нач}i} > s_{\text{тp}i}$ формула дает уменьшение мутности вдоль x , что отвечает заилению, а при $s_{\text{нач}i} < s_{\text{тp}i}$ — увеличение мутности, что отвечает размыву. Значения общей мутности для различных расстояний x получаются суммированием соответствующих значений частной мутности по всем m транспортируемым фракциям.

Граничные условия у дна необходимо выражать различным образом в зависимости от соотношения между $s_{\text{нач}i}$ и вычисляемым $s_{\text{взм}i}$. Должны различаться два следующих случая.

Первый случай (наиболее часто встречающийся). Средняя частная мутность реки на начальном створе рассматриваемого участка меньше, чем вычисляемая частная мутность взмыва.

В этом случае используются формулы, приведенные выше [формула (5.18) и др.].

Второй случай. На начальном створе рассматриваемого участка реки мутность $s_{начi}$ больше, чем вычисляемая по формуле мутность взмыва; это отвечает интенсивному процессу заиления. В действительности мутность взмыва не может быть меньше мутности объемов воды, находящихся в придонных слоях потока, и в данном случае не определяется формулой предельного насыщения, рассматривавшейся в предыдущих главах. Используя приближенный подход, основанный на замене местных значений мутности ее средним значением, необходимо поставить следующее условие для предела частной мутности взмыва: $s_{взм} \geq s_i$, где s_i — средняя частная мутность потока. В этом случае оказывается, что вертикальный перенос наносов i -той фракции через поверхность дна будет определяться следующим образом:

$$q_{si} = u_i s_i. \quad (5.19)$$

Имеем такие условия для выяснения принадлежности рассматриваемого потока к тому или иному расчетному случаю:

первый случай $s_{начi} < (s_{взмi})_{выч}$;

второй случай $s_{начi} \geq (s_{взмi})_{выч}$.

Первый включает размыв, транзит и заиление, второй отвечает только интенсивному заилению.

Расчет для первого случая выполняется при использовании уравнения (5.18), расчет для второго случая — по приводимому ниже выражению.

Составляя уравнение баланса наносов для объема $HV\Delta x$, используя, вместо отношения (5.13), формулу (5.19) и производя преобразования, получаем следующее уравнение:

$$s_i = s_{начi} e^{-\frac{Bu_i}{Q} \Delta x}, \quad (5.20)$$

которое и используется для расчета во втором случае.

Может иметь место случай, когда в процессе расчета распределения мутности вдоль участка обнаруживается, что значение мутности уменьшается таким образом, что поток из состояния, отвечающего второму случаю, переходит к состоянию, отвечающему первому случаю. Соответственно требуется переход к другим расчетным формулам, поэтому желательно заранее выяснить, на каком расстоянии ($x = x^*$) от начального створа ($x = 0$) осуществится указанный переход для рассматриваемой фракции наносов.

Исходим из условия: при $x = x^*$ частная мутность $s_i = s_{взмi}$.

Подстановка этих значений в уравнение (5.20) после простого преобразования дает

$$x^* = -\frac{Q}{Bu_i} \ln \frac{s_{взмi}}{s_{начi}}. \quad (5.21)$$

Переходя к десятичным логарифмам, имеем

$$x^* = -0,43 \frac{Q}{Bu_i} \lg \frac{s_{взм i}}{s_{нач i}}. \quad (5.22)$$

Полученные в настоящем разделе формулы в случае приближенной неизменности условий по ширине потока могут быть отнесены к единице ширины; тогда вместо полного расхода потока или транзитной струи Q они будут содержать элементарный расход q , т. е. расход на единицу ширины потока в зоне данной вертикали. Указанные формулы соответственно будут иметь следующий вид:

$$s_i = s_{тp i} + (s_{нач i} - s_{тp i}) e^{-\frac{u_i + k_i}{q} x}, \quad (5.23)$$

$$s_i = s_{нач i} e^{-\frac{u_i}{q} x}, \quad (5.24)$$

$$x^* = -0,43 \frac{q}{u_i} \lg \frac{s_{взм i}}{s_{нач i}}. \quad (5.25)$$

Необходимо отметить, что при использовании этих формул должно быть обращено внимание на соответствующий учет условия неразрывности при переходе от створа к створу.

Уравнения показывают, что как осветление потока, так и насыщение его наносами, а равно и процесс размыва и заиления происходят по экспоненциальному закону. Интенсивный процесс имеет место на начальном участке пути, далее же наблюдается постепенное его затухание. Расход наносов, отличавшийся в начале пути x от транспортирующей способности потока, асимптотически приближается к ней.

Та же самая задача о насыщении или осветлении водных масс потока может быть рассмотрена и на основе перемещающейся со средней скоростью течения $v_{ср}$ системы координат Лагранжа. В этом случае мы будем наблюдать изменение во времени насыщенности выделенного объема водных масс, перемещающегося со скоростью $v_{ср}$. В конечном итоге приходим к уравнению

$$s_i = s_{тp i} + (s_{0i} - s_{тp i}) e^{-\frac{u_i + k_i}{H} t}, \quad (5.26)$$

где H — средняя глубина потока; t — время; s_{0i} — частная мутность водных масс в начальный момент времени, т. е. при $t = 0$; остальные обозначения прежние.

Теперь выясним, какое время t и какой путь x необходимы для практически достаточного приближения насыщенности потока наносами i -той фракции к величине $s_{тp i}$. Назовем эти отрезки времени и пути соответственно временем и путем стабилизации нагрузки потока наносами i -той фракции (обозначения $t_{с i}$ и $x_{с i}$). Эти величины характеризуют как процесс насыщения

потока наносами, так и его осветления, т. е. соответственно размыв и заиление.

Теоретические формулы дают асимптотическое приближение s_i к $s_{\text{тp}i}$; полное равенство между этими величинами на конечных отрезках пути и времени не достигается. Поэтому можно говорить об определенной степени приближения s_i к $s_{\text{тp}i}$, после достижения которого дальнейшее изменение s_i и русловые деформации становятся практически незаметными. Введем обозначения:

$$\left. \begin{aligned} \frac{s_i - s_{\text{тp}i}}{s_{\text{нач}i} - s_{\text{тp}i}} &= r_{Si}, \\ \frac{s_i - s_{\text{тp}i}}{s_{0i} - s_{\text{тp}i}} &= r_{Si}; \end{aligned} \right\} \quad (5.27)$$

тогда формулы изменения частной мутности во времени и по длине потока примут вид:

$$r_{Si} = e^{-\frac{u_i + k_i}{H} t}, \quad (5.28)$$

$$r_{Si} = e^{-\frac{B(u_i + k_i)}{Q} x}. \quad (5.29)$$

Величина r_{Si} выражает относительное изменение частной мутности на участке потока x или изменение в период времени t в долях начальной недогрузки или перегрузки потока наносами. Пусть, например, начальная частная мутность потока на одном участке $s_{\text{нач}i} = 0,5s_{\text{тp}i}$ (участок размыва), а на другом участке $s_{\text{нач}i} = 1,5s_{\text{тp}i}$ (участок заиления); достижение значения $s_i = 0,9s_{\text{тp}i}$ (в первом случае) и $s_i = 1,1s_{\text{тp}i}$ (во втором случае) практически характеризует нижнюю границу зоны существенных деформаций за счет наносов i -той фракции. На этой границе, как в первом, так и во втором случае будем иметь $r_{Si} = 0,2$. Если нас интересуют и менее значительные деформации, то можно выделить зону, ограниченную значениями $s_i = 0,99s_{\text{тp}i}$ и соответственно $s_i = 1,01s_{\text{тp}i}$, при этом $r_{Si} = 0,02$. Подставляя соответствующие значения r_{Si} в формулы (5.28)–(5.29), находим t_{ci} и x_{ci} , при этом указанные формулы целесообразно записать в виде:

$$t_{ci} = -2,3 \frac{H}{u_i + k_i} \lg r_{Si}, \quad (5.30)$$

$$x_{ci} = -2,3 \frac{Q}{B(u_i + k_i)} \lg r_{Si}. \quad (5.31)$$

И. Ф. Карасев [51, 52] распространил решение Караушева на связные грунты. Для этого он ввел в рассмотрение вероятности срыва и взвешивания наносов, которые изменяются по длине

потока x . Уравнение продольного распределения мутности Карасев получил в виде

$$S_{\text{кон}} = S_{\text{тр. к}} + (S_{\text{нач}} - S_{\text{тр. к}}) e^{-\frac{\alpha_z B \Pi_*}{Q} \frac{\epsilon_0 \eta_0}{\epsilon_k \eta_k} \Delta x}, \quad (5.31a)$$

где $S_{\text{тр. к}}$ — транспортирующая способность потока на конечном створе; ϵ_0 и ϵ_k — вероятности взвешивания в начале и конце участка Δx , а величины η_0 и η_k выражают соответственно вероятности срыва. Принятие различных значений вероятности в начале и конце участка насыщения позволяет учесть измерение крупности глинистого грунта при размыве от начальных размеров агрегатов до конечных размеров мельчайших частиц. Входящий в уравнение Карасева параметр Π_* определяется выражением

$$\Pi_* = \frac{0,75 v_{\text{ср}} \sqrt{g} + UC}{BC}, \quad (5.31б)$$

где B — функция, зависящая от коэффициента Шези C и безразмерного параметра G (см. гл. 3); U — среднее значение гидравлической крупности наносов.

При использовании уравнения Карасева для расчета осаждения частиц в потоке принимают $\epsilon_0 \eta_0 = \epsilon_k \eta_k$. Параметр α_z для условий насыщения потока в песчаных руслах принимается равным 0,02, а в глинистых руслах $\alpha_z = 0,01$; в условиях осаждения наносов $\alpha_z = 0,012$.

Для выполнения расчета продольного распределения мутности в потоке по приведенным выше уравнениям необходимо достаточно надежно вычислять транспортирующую способность потока. В уравнении Карасева следует применять разработанную им формулу транспортирующей способности. Используя уравнение Караушева, следует применять предложенный последним метод расчета транспортирующей способности потока. Наиболее целесообразно использование того варианта метода Караушева, который основан на учете состава донных отложений.

Заметим, что в ряде случаев полезно введение корректирующего множителя a в формулу транспортирующей способности. Этот множитель находится из соотношения

$$a = \frac{S_{\text{изм}}}{S_{\text{выч}}} = \frac{P_{\text{изм}}}{P_{\text{выч}}}, \quad (5.32)$$

в котором фигурируют величины, измеренные (изм) и вычисленные (выч) по формуле транспортирующей способности. Множитель a находится при использовании надежных данных натуральных измерений, относящихся к вполне определенной фазе режима реки (межень летняя или зимняя, подъем паводка, пик паводка, спад паводка и т. д.), при этом для каждой фазы режима может быть найден свой множитель a . При наличии доста-

точно детальных данных о гранулометрии наносов, корректирующий множитель a вычисляется для каждой частной фракции. В этом случае в формуле (5.32) должны фигурировать соответствующие значения частных расходов наносов или частной мутности. Если такие данные отсутствуют, то a вычисляется по общему расходу наносов и вводится как множитель в формулу транспортирующей способности для каждой фракции. Введение a в формулу транспортирующей способности производится только в тех случаях, когда в бытовых условиях русловые деформации незначительны и ставится задача оценки деформации в условиях искусственного изменения гидравлики потока за счет подпора от плотины или перемычек, в результате разработок прорези или спрямления русла и т. д.

5.2. Расчет распределения мутности по длине потока и русловые деформации

Рассмотренные в настоящем разделе соотношения могут использоваться как для расчета распределения мутности по длине потока, так и для определения русловых деформаций (размывов и намывов). Обе эти задачи решаются одновременно.

Речной поток разбивают поперечными профилями на расчетные участки длиной Δx . Для каждого из таких участков уравнение продольного распределения частной мутности может быть записано в виде

$$s_{\text{кон}i} = s_{\text{тр}i} + (s_{\text{нач}i} - s_{\text{тр}i}) e^{-\frac{B(u_i + k_i)}{Q} \Delta x}, \quad (5.33)$$

где $s_{\text{кон}i}$ — частная мутность в конце расчетного участка Δx . Для общей мутности будем иметь

$$S_{\text{кон}} = S_{\text{тр}} + \sum_{i=1}^m (s_{\text{нач}i} - s_{\text{тр}i}) e^{-\frac{B(u_i + k_i)}{Q} \Delta x}. \quad (5.34)$$

Полагаем, что в пределах каждого участка Δx гидравлические элементы потока и состав наносов не меняются; изменение этих величин происходит от участка к участку скачкообразно. Соответственно изменяется $S_{\text{тр}}$ и $s_{\text{тр}i}$. Мутность в конце каждого предыдущего участка равна мутности в начале последующего участка.

Умножая уравнение (5.33) на расход воды Q , который предполагается неизменным на протяжении всей рассматриваемой части реки, приходим к следующему результату:

$$P_{S_{\text{кон}i}} = P_{S_{\text{тр}i}} + (P_{S_{\text{нач}i}} - P_{S_{\text{тр}i}}) e^{-\frac{B(u_i + k_i)}{Q} \Delta x}, \quad (5.35)$$

где через P_{S_i} обозначены соответствующие расходы наносов i -той фракции, кг/с.

Для общего расхода наносов всех фракций будем иметь

$$P_{\text{Скон}} = P_{\text{Стр}} + \sum_{i=1}^m (P_{\text{Снач}i} - P_{\text{Стр}i}) e^{-\frac{B(u_i+k_i)}{Q} \Delta x}. \quad (5.36)$$

Основным расчетным уравнением распределения мутности и деформации русла при наличии достаточных данных по гранулометрии наносов является уравнение (5.35), записанное для частной фракции. При отсутствии данных о гранулометрическом составе наносов и известной средней крупности частиц для общего расхода уравнение записывается в виде

$$P_{\text{Скон}} = P_{\text{Стр}} + (P_{\text{Снач}} - P_{\text{Стр}}) e^{-\frac{B(u+k)}{Q} \Delta x}, \quad (5.37)$$

где u и k отвечают средней крупности наносов. При использовании этого уравнения расчет значительно упрощается по сравнению с вычислениями по отдельным фракциям, но зато результат получается менее надежным.

Секундная частная деформация русла на участке Δx может быть определена по разности $P_{\text{Снач}i} - P_{\text{Скон}i}$ или непосредственно по величине q_{si} , вычисляемой по формуле (5.8). При расчете деформации по разности частных расходов наносов в начале и конце расчетного участка частная секундная деформация в пределах всего участка Δx будет

$$\Delta D_i = P_{\text{Снач}i} - P_{\text{Скон}i}. \quad (5.38)$$

Деформация оказывается выраженной в единицах массы твердой составляющей (скелета) грунта в секунду. Секундная частная деформация на единице поверхности русла при этом будет (в $\text{кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$).

$$q_{si} = \frac{\Delta D_i}{\Delta \Omega} = \frac{P_{\text{Снач}i} - P_{\text{Скон}i}}{B \Delta x}, \quad (5.39)$$

где $\Delta \Omega \approx B \Delta x$ — площадь поверхности русла на расчетном участке; B — ширина русла.

В ряде случаев может оказаться удобным вычислять q_{si} по формуле (5.8). Расчет распределения мутности по длине потока ведется при этом по уравнению (5.33). В формулу (5.8) вводится среднее для участка Δx значение частной мутности s_i^* , найденное из соотношения

$$s_i^* = \frac{s_{\text{нач}i} + s_{\text{кон}i}}{2}. \quad (5.40)$$

Формула (5.8) записывается в виде

$$q_{si} = (u_i + k_i) \frac{s_{\text{нач}i} + s_{\text{кон}i}}{2} - k_i s_{\text{взм}i}. \quad (5.41)$$

Частная мутность взмыва вычисляется способом, изложенным выше, в разделе о взаимообмене потока и русла наносами.

Общую деформацию q_s , происходящую за счет взыва или осаждения отдельных фракций, получают суммированием частных деформаций

$$q_s = \sum_{i=1}^m q_{si}. \quad (5.42)$$

Пересчет деформации в объемные единицы производится путем деления общей секундной деформации ΔD на плотность отложений (грунта) $\rho_{отл}$. Деление q_s на $\rho_{отл}$ дает секундное линейное выражение деформации (секундную высоту намыва или глубину размыва), которую назовем скоростью деформации и обозначим через c_d м/с. Таким образом будем иметь

$$c_d = \frac{q_s}{\rho_{отл}}; \quad (5.43)$$

$\rho_{отл}$ кг/м³ находят на основании материалов натуральных измерений или по специальной таблице плотности грунта (таблица Г. А. Петуховой в гл. 1). В этой таблице величины $\rho_{отл}$ даны в зависимости от гранулометрического состава грунта. При выполнении расчета гранулометрический состав отложений на размываемых участках должен быть задан, а на заиляемых — выясняется в процессе расчета деформации (определяется как состав отложившихся наносов).

Для получения линейной деформации за часы, сутки или иные отрезки времени, за расчетные интервалы времени Δt , производят умножение секундных деформаций на время.

Линейную деформацию за время Δt обозначим через Δh (метры), т. е. примем

$$\Delta h = c_d \Delta t = \frac{q_s \Delta t}{\rho_{отл}}. \quad (5.44)$$

Если деформации Δh превышают $1/10$ — $1/5$ средней глубины потока, то подбирают такую продолжительность расчетного интервала времени Δt , при которой наиболее интенсивные деформации на участке удовлетворяют указанному выше условию. Далее при выполнении расчетов деформаций для каждого последующего интервала времени учитывают изменения всех гидравлических элементов потока (H , B , продольного уклона I , средней скорости $v_{ср}$ и др.) и состава донных наносов, происшедшие в процессе деформации русла, за расчетный интервал времени Δt . При стационарности Q и $P_{снач}$ расчет дает постепенное затухание деформации, что выражается в уменьшении получаемых величин Δh для каждого последующего Δt .

Расчет деформации русла может выполняться для всего речного потока в целом или для отдельных транзитных струй,

построенных, например, по данным измерений или по методу Н. М. Бернадского. В первом случае находят средние деформации на участках реки Δx сравнительно большого протяжения. Во втором случае расчет позволяет получить более детальную картину деформации, в частности ее различия по ширине реки.

Расчет для всего потока в целом выполняется при введении в расчетные формулы средних для соответствующих расчетных участков величин.

Расчет деформаций по транзитным струям потока более трудоемок; он начинается с построения плана транзитных струй для всей интересующей нас части реки. Элементы струй, заключенные между ортогональными поперечниками плана течений, принимаются за расчетные элементы. Длины расчетных элементов Δx могут меняться как вдоль струй, так и вдоль ортогоналей. Если на начальном поперечнике для всех транзитных струй потока задать значения мутности, то, пользуясь приведенными выше уравнениями, можно вычислить значения мутности для каждого последующего поперечника. Вычислив значения $S_{\text{кон}}$ для каждого элемента Δx , переходим к расчету русловых деформаций на этих элементах. Расчет выполняется по формуле (5.44).

Если для рассматриваемого момента времени t суммарная деформация $\sum \Delta h$ за несколько интервалов Δt достигает $1/10$ — $1/5$ полной глубины на вертикали, то подсчет для следующего интервала требует нового построения плана течений, производимого с учетом полученных изменений глубин на элементарных участках русла и смещения урезов воды.

Смещение уреза воды за счет деформации русла оценивается следующим образом. Введем понятие «площадь деформации поперечного сечения потока». Для транзитной струи эту величину будем обозначать через σf , принимая

$$\sigma f = \Delta B \Delta h, \quad (5.45)$$

где ΔB — ширина транзитной струи.

Поскольку деформация Δh всегда отсчитывается по нормали к свободной поверхности, а не ко дну, выражение (5.45) следует считать достаточно точным.

Поперечные сечения транзитных струй в средней части русла изображаются прямоугольниками с высотой H и шириной ΔB . Дно в пределах такой струи принимается горизонтальным. Сечения крайних струй изображаются прямоугольными треугольниками, гипотенузы которых схематически показывают дно. Вся линия дна приобретает ступенчатый вид. Чтобы изобразить деформацию русла, получаемую по расчету для интервала времени Δt для средних струй, линии дна опускаются или поднимаются на величину Δh , а для крайних струй линии дна (гипотенузы)

опускаются или поднимаются параллельно самим себе так, чтобы получаемые площади деформации совпали с вычисленными. Если гипотенуза поднимается, то она будет пересекать линию водной поверхности в точке, находящейся на некотором расстоянии от прежнего уреза в сторону середины реки. Эта точка ориентировочно показывает новое положение уреза. Если гипотенуза опускается, то ее конец, совпадавший ранее с точкой уреза, должен быть продолжен до пересечения с горизонтальной линией водной поверхности уже на суше, т. е. срезается объем грунта, который должен входить в общий объем деформации. Таким образом приближенно находится смещение уреза в сторону суши. Объем грунта, оцениваемый по площади деформации, заключенной между двумя вертикалями, восстановленными из двух последовательных положений уреза, определяет поперечный расход наносов через крайнюю линию тока, совпадающую с урезом. Учитывая эти объемы при расчете деформации, тем самым приближенно учитываем граничные условия на линиях урезом.

Рассмотренный здесь метод расчета деформации русла может быть непосредственно применен к расчету заносимости дноуглубительной прорези.

Допустим, что имеем случай, когда дноуглубительная прорезь расположена вдоль линий тока на сравнительно прямолинейном участке реки. Разработка дноуглубительной прорези ведет к существенному изменению гидравлики реки на участке расположения прорези, а также выше и ниже нее. Построение плана течений и кривой свободной поверхности для измененных условий позволяет достаточно полно характеризовать гидравлику потока после разработки прорези.

С изменением гидравлики связано и изменение транспортирующей способности потока. В частности, при разработке прорези имеет место увеличение глубины, уменьшение скорости течения и транспортирующей способности. Очевидно, что если после разработки прорези транспортирующая способность на вышерасположенном участке не изменилась или несколько увеличилась за счет увеличения уклона, а на участке прорези она уменьшилась, то на последнем должно начаться осаждение наносов. Наиболее интенсивное осаждение, как правило, будет иметь место в самой прорези, но оно может наблюдаться также и на примыкающих участках русла — справа и слева от прорези. Поэтому наиболее полный расчет заиления прорези следует производить путем разделения потока на три струи (струя вдоль прорези, струи слева и справа от нее) и расчета деформации вдоль каждой из этих струй изложенным выше методом. Расчет упрощается, если на участках боковых струй не происходят существенные деформации, которые привели бы к изменению гидравлики струи над прорезью. Расчет ее заносимости в этом случае ведется изолированно от соседних струй.

5.3. Движение наносов и деформации русла в нижних бьефах и при изменении базиса эрозии

Возведение на реках плотин с регулирующей емкостью выше плотины, т. е. с водохранилищем, приводит к формированию весьма своеобразного режима расходов и уровней реки в зоне подпора и ниже плотины. Водоохранилища с более или менее значительной емкостью аккумулируют часть паводочной волны, а иногда и полностью весь паводок. При этом характерно, что через нижний бьеф пропускается часть паводочной волны со значительно сглаженным пиком или же паводок вовсе не пропускается.

В течение всего маловодного периода года аккумулированные воды вместе с меженным стоком поступают в нижний бьеф. Своеобразие гидрологического режима в нижних бьефах в период межени связано с особенностями режима работы гидростанции и шлюзов. Характерной особенностью режима нижних бьефов гидроузлов с суточным регулированием является наличие хорошо выраженных суточных паводков.

Водоохранилища не только регулируют сток воды, изменяя гидрограф, но и коренным образом меняют режим стока наносов. Крупные водохранилища практически полностью удерживают твердый сток, и поступающая из них в нижний бьеф вода оказывается практически лишенной наносов. Продвигаясь в нижнем бьефе вдоль русла, поток постепенно насыщается наносами за счет размыва дна и берегов. В первое время исключительно быстрый размыв происходит непосредственно ниже сооружения, однако он довольно скоро начинает затухать, и размыв распространяется дальше на нижерасположенные участки.

Насыщение наносами водных масс происходит в первую очередь за счет вымывания из донных отложений мелких фракций, количество которых в составе донных отложений постепенно уменьшается, начиная с момента пуска сооружений в эксплуатацию.

Донные отложения в нижних бьефах гидроузлов, которые уже несколько лет эксплуатировались, как правило, хорошо промыты и состоят из сравнительно крупных фракций, поддающихся интенсивному взвешиванию только при значительных сбросах воды из верхних бьефов. При небольших сбросах преобладающим видом транспортирования наносов в нижних бьефах оказывается их перемещение в придонном слое потока.

При перемещении наносов как в придонном слое, так и в толще потока все частицы участвуют в формировании мутности водных масс. Однако участие мелких фракций оказывается при этом более существенным. В случае песчано-гравелистых грунтов здесь, как и в незарегулированных реках, образуются донные аккумулятивные формы — гряды и рифели, дно приобретает структурный характер. Частицы наносов срываются тече-

нием с тыльного склона гряды и перебрасываются на его фронтальный склон или в подвалье гряды. Более мелкие частицы могут совершать скачки через несколько гряд, а самые мелкие переносятся на значительные расстояния и транспортируются в основном как взвешенные наносы. В донных отложениях нижних бьефов таких фракций мало, поэтому расход наносов, определяемый перемещением гряд и рифелей, для указанных условий весьма близок к расходу влекомых наносов. Во взаимодействии с потоком вовлекается весь активный слой русла [58], толщина которого определяется вертикальными размерами формирующихся на дне русловых образований. Взмытые с поверхности гряды частицы крупных наносов почти полностью возвращаются в состав донных отложений, а более мелкие частицы могут быть унесены течением на большое расстояние, только некоторые из них осаждаются в подвалье гряды. Из-за отсутствия пополнения запасов мелких фракций происходит уменьшение их содержания в составе донного аллювия, что и обуславливает постепенное укрупнение его состава.

Наиболее интенсивные процессы размыва дна и вымывания мелких частиц из донного аллювия происходят на участках, непосредственно примыкающих к сбросным сооружениям, и затухают по мере продвижения вдоль нижнего бьефа. Характерным является то, что область размыва, как и область нарастания расхода наносов по длине нижнего бьефа, постепенно смещается вниз по течению. На участках большого протяжения ниже плотины в ряде случаев сток наносов может в значительной мере восстановиться, т. е. оказаться близким к стоку наносов, имевшему здесь место до зарегулирования реки. Восстановление происходит за счет рассмотренного выше процесса размыва дна нижнего бьефа с преимущественным выносом более мелких фракций, а также за счет подмыва берегов и в некоторых случаях — размыва поймы и поступления наносов из потоков.

Следует иметь в виду, что могут создаться условия, при которых сток наносов притоков, впадающих в реку ниже плотины, существенно возрастет в результате зарегулирования главной реки. Это будет наблюдаться в периоды паводков на притоках в тех случаях, когда паводок главной реки срезается водохранилищем настолько значительно, что продольные уклоны притоков, впадающих в нижний бьеф, существенно возрастают. Последнее приводит к резкому увеличению транспортирующей способности таких притоков и как следствие к их врезанию, сопровождающемуся дополнительным (по сравнению с бытовым) выносом наносов в главную реку. Иногда усиленный приток наносов компенсирует размывы нижнего бьефа или даже приводит к поднятию дна в нижнем бьефе, однако такие случаи сравнительно редки.

Основным видом деформации русла в нижних бьефах крупных гидроузлов является врезание русла, сопровождаемое

снижением отметок водной поверхности. Это приводит к ряду отрицательных последствий, в частности к обсыханию водозаборов, снижению габаритов судоходных трасс и пр. Нет необходимости доказывать практическую значимость проблемы наносов нижних бьефов и неразрывно с ней связанной проблемы формирования русла.

Рассмотрим простейший способ расчета деформации русла (врезания) на больших участках нижнего бьефа — протяженностью от нескольких до десятка и более километров. Предполагается, что существенное поступление наносов из притоков в нижнем бьефе не происходит, а водные массы, приходящие из верхнего бьефа, практически лишены наносов.

При выполнении расчета деформации русла необходимо оценивать расходы наносов через замыкающий створ того или иного расчетного участка. Вычисление расходов наносов ведется непосредственно по формулам транспортирующей способности или по уравнению продольного распределения расхода наносов (см. раздел 5.1), в которое транспортирующая способность входит как параметр.

Транспортирующую способность, как и расчетный расход наносов в нижних бьефах, будем оценивать как сумму расходов взвешенных и влекомых наносов. Это необходимо потому, что в нижних бьефах в связи с процессом укрупнения донных наносов расход влекомых наносов возрастает и может составлять существенный процент суммарного расхода. Так, измерения Н. М. Капитонова на р. Дону в нижнем бьефе Цимлянского гидроузла показали, что для меженного периода на расстоянии 1 км от плотины расход влекомых наносов составляет около 50% суммарного расхода, на расстоянии 40 км — около 16%, а на расстоянии 60 км от плотины — уже только 12%.

Рассмотрим простейший случай расчета деформации русла в нижнем бьефе. Разобьем реку на расчетные участки длиной Δx , нумеруя их сверху вниз по течению, считая за первый участок, примыкающий к гидроузлу. Створ гидроузла, совпадающий с началом первого расчетного участка, назовем начальным. Пусть задан гидрограф для начального створа. Разбиваем гидрограф по времени на ряд интервалов Δt и определяем для каждого интервала средний расход Q .

Расчет выполняется последовательно, от интервала к интервалу. При этом внутри каждого интервала вычисления производятся от участка к участку.

Предположим, что расчет ведется для j -того интервала, когда средний расход равен Q_j . Строим кривую свободной поверхности реки при данном расходе, продвигаясь от нижнего расчетного участка к плотине. Получив кривую свободной поверхности, тем самым определяем гидравлику каждого участка при заданном расходе.

Исходя из предположения, что расчетные участки достаточно длинны, а гидравлические элементы меняются скачкообразно от участка к участку, сохраняясь неизменными на протяжении каждого участка, будем считать неизменной и транспортирующую способность потока вдоль каждого участка. Одновременно примем, что суммарный расход наносов в конце участка приходит в соответствие с транспортирующей способностью потока на рассматриваемом участке.

Для упрощения решения принимается условие о неизменности формы поперечного профиля русла при заилении и размыве. Основными граничными условиями в данной задаче являются нулевой расход наносов через начальный створ и заданный гидрограф на нем. Таким образом, если вычисленный расход наносов в конце расчетного участка I для интервала j равен P_{SIj} , то при учете первого граничного условия общий объем деформации в m^3 на участке I за время Δt_j будет

$$\Delta W_{дIj} = - \frac{P_{SIj} \Delta t_j}{\rho_{отл}}; \quad (5.46)$$

знак минус показывает, что на участке происходит размыв. Под величиной P_{SIj} подразумевается суммарный расход взвешенных и влекомых наносов, вычисляемый по формулам транспортирующей способности взвешенных и влекомых наносов, рассмотренным соответственно в главах 3 и 4. В случае если на участке реки вычисленный расход влекомых наносов составляет менее 10—15% суммарного расхода наносов, то он не принимается во внимание и весь расчет ведется только по формуле транспорта взвешенных наносов. Может иметь место и такой случай, когда расход взвешенных наносов мал по сравнению с суммарным расходом. В подобном случае расчет ведется только по формуле транспорта влекомых наносов.

Теперь, возвращаясь к изложению методики расчета деформации, напомним выражение для участка II

$$\Delta W_{дIIj} = \frac{(P_{SIj} - P_{SIIj}) \Delta t_j}{\rho_{отл}}. \quad (5.47)$$

При размыве $P_{SIIj} > P_{SIj}$, поэтому деформация получается отрицательной. Для участка III записывается аналогичное соотношение и т. д.

Изменение средних отметок дна за время Δt_j вычисляется по формулам:

$$\Delta h_{Ij} = \frac{\Delta W_{дIj}}{\Delta \Omega_{Ij}} = - \frac{P_{SIj} \Delta t_j}{\rho_{отл} \Delta \Omega_{Ij}}, \quad (5.48)$$

$$\Delta h_{IIj} = \frac{(P_{SIj} - P_{SIIj}) \Delta t_j}{\rho_{отл} \Delta \Omega_{IIj}} \quad (5.49)$$

и т. д.

Здесь $\Delta\Omega = B \Delta x$ — площадь зеркала расчетного участка, B — ширина потока на участке; Δh получается в метрах.

Вычислив изменения отметок дна всех участков, приступают к расчету деформации для следующего интервала Δt_{j+1} , при этом построение кривой свободной поверхности для второго интервала времени выполняется с учетом снижения уровня дна на величину Δh_j , а для последующих интервалов — с учетом снижения дна на соответствующие суммы вертикальных деформаций, выражаемые через δh .

Этот метод, в частности, был применен для расчета деформации русла на большом участке р. Дона ниже Цимлянкой плотины. Сопоставление полученного по расчету снижения русла реки с фактически наблюдаемым обнаружило хорошую сходимость.

Расчеты деформаций русла и изменения расходов наносов по длине нижнего бьефа на сравнительно коротких участках от плотины могут выполняться при использовании уравнения продольного распределения мутности или расхода наносов (см. выше), которое записывается для расчетных участков длиной Δx . Рассматриваемая методика дает общее фоновое врезание русла и ни в коем случае не может применяться для определения размывов непосредственно за водобойными сооружениями плотины (в зоне ямы размыва).

Верхний створ первого расчетного участка условно принимается совпадающим со створом плотины, где полный расход наносов $P_{\text{полн}}$ в кг/с равен нулю.

Полный расход наносов определяется суммой расходов взвешенных P_S и влекомых $P_{\text{вл}}$ наносов, т. е.

$$P_{\text{полн}} = P_S + P_{\text{вл}}. \quad (5.50)$$

Выше, рассматривая условия транспортирования влекомых наносов, мы отмечали отсутствие четкой границы между категориями взвешенных и влекомых наносов и указывали на наличие промежуточной фракции, которая представлена в составе как взвешенных, так и влекомых наносов. Выполняя приблизительный расчет размыва русла нижнего бьефа, можно воспользоваться весьма ориентировочным способом, позволяющим избежать двойного учета промежуточной фракции. Способ заключается в отсечении на графике гранулометрического состава донных наносов мелких фракций по критерию взвешивания $u_{\text{пред}} = 3\omega$ и в вычислении среднего размера влекомых наносов по составу частиц, заключенных в сравнительно узком диапазоне крупности между указанной границей и предельным размером сдвигаемой частицы, находимым по $u_{\text{нач}}$. Расчет транспорта взвешенных наносов осуществляется теоретическим методом Караушева при использовании средней крупности всех взвешиваемых фракций донных отложений, отвечающих условию $u \leq u_{\text{пред}}$. Для взвешенных наносов принимается во внимание про-

цесс постепенного насыщения потока и используется экспоненциальное выражение продольного изменения расхода наносов (5.37). Указанное выражение позволяет вычислить расход взвешенных наносов в конце расчетного участка $P_{\text{скон}}$ по транспортирующей способности потока на участке (по взвешенным наносам) $P_{\text{стр}}$ и расходу взвешенных наносов в начале участка $P_{\text{нач}}$.

С другой стороны, учитывается, что восстановление и любое изменение расхода влекомых наносов происходит очень быстро на протяжении весьма коротких участков. Поэтому естественно считать расход влекомых наносов в конце расчетного участка равным транспортирующей способности потока в отношении влекомых наносов на данном участке, т. е.

$$P_{\text{вл. кон}} = P_{\text{вл. тр}} \quad (5.51)$$

Таким образом, для полного расхода наносов в конце некоторого n -ного участка для j -того интервала времени будем иметь

$$P_{\text{полн. jкон}} = P_{\text{Sn jкон}} + P_{\text{вл. тр j}} \quad (5.52)$$

Непосредственно вычисление деформаций выполняется по формулам (5.48), (5.49) и т. д. при подстановке в них значений расходов наносов, получаемых для концов расчетных участков по формуле (5.52).

Заметим, что рассмотренные способы расчета русловых деформаций в нижних бьефах могут быть распространены и на более сложный случай, отвечающий наличию заметного стока наносов через плотину и их поступлению с боковыми притоками. В указанном случае изменяются лишь граничные условия в начале первого участка, где, вместо нулевого расхода наносов, будет задаваться конечная величина, и на границах тех участков, где впадают притоки, выносящие наносы.

Деформации в нижнем бьефе, заключающиеся во врезании русла, уменьшении уклона, скорости течения и т. д. приводят в действие обратные связи: происходит уменьшение транспортирующей способности потока и как следствие затухание самих деформаций. Такое затухание можно получить, выполняя расчет для длительного периода. Изложенная выше методика расчета деформаций русла позволяет учитывать еще один фактор, ведущий к затуханию деформаций в нижних бьефах, — это процесс постепенного укрупнения донных наносов.

Расчет трансформации состава донных наносов может быть выполнен в следующем порядке. Гидрограф сброса расходов в нижний бьеф делится на расчетные интервалы, для каждого из них находится среднее значение расхода воды, скорости течения и глубины; определяется площадь зеркала и гранулометрический состав донных отложений. Вычисляется транспортирующая способность потока на участке (пофракционно) и по полученным величинам рассчитывается вынос наносов каждой

фракции за пределы участка. По этим данным определяется общее количество вынесенного материала и изменение процентного содержания фракций в составе активного слоя русла.

В первом приближении объем активного слоя наносов $\Delta V_{a. cn}$ на n -ом участке нижнего бьефа длиной Δx_n может быть определен по формуле

$$\Delta V_{a. cn} \cong \frac{h_{rn}}{2} \Delta \Omega_n, \quad (5.53)$$

где h_{rn} — средняя высота гряды или рифеля на n -ом участке бьефа; $\Delta \Omega_n$ — площадь водного зеркала n -ного участка реки. Для расчета массы наносов в активном слое величину $\Delta V_{a. cn}$ умножают на плотность поверхностного слоя донных наносов $\rho_{отл}$.

Вычисление величины h_r выполняется по одному из существующих способов определения элементов донных гряд. Объем активного слоя может изменяться в зависимости от уровня воды, особенно при затоплении поймы, когда оказывается необходимым учитывать и поверхностные отложения поймы.

При расчете размыва нижнего бьефа и трансформации состава наносов учитывается следующее обстоятельство: взамен унесенной потоком части активного слоя русла к нему присоединяются наносы нижерасположенного слоя, которые включаются во взаимодействие с потоком. В связи с этим необходимо знать гранулометрию нижерасположенных слоев донного аллювия.

Расчеты, выполненные А. Я. Шварцман для пятикилометрового участка нижнего бьефа одного из крупных гидроузлов, позволили получить количественные характеристики укрупнения состава донных отложений и уменьшения средней мутности воды от года к году для отдельных сезонов первых пяти лет его эксплуатации. Одновременно была получена величина размыва русла. Характерно, что расчеты дали снижение мутности к концу пятого года в паводочный период примерно в пять раз, а в межень — в 50 раз по сравнению с первым годом.

Остановимся кратко на вопросе о русловых деформациях, обусловленных изменениями высотных отметок базисов эрозии речных потоков. Следствием этих изменений обычно являются размывы или намывы русла на участках, расположенных выше базиса. В случае снижения базиса эрозии область наиболее интенсивной деформации русла находится непосредственно около рассматриваемого базиса эрозии. При поднятии базиса эрозии область наиболее интенсивных деформаций совпадает с зоной выклинивания подпора, созданного повышением базиса. При этом в первом случае деформация постепенно распространяется вверх по реке, а во втором — преимущественно вниз по реке, хотя менее значительное распространение деформации имеет место и в обратном направлении. В обоих случаях область де-

формации постепенно расширяется и в то же время интенсивность ее затухает. Разумеется, затухание деформации не будет наблюдаться в том случае, когда продолжается дальнейшее изменение высоты базиса эрозии.

Наиболее яркими примерами изменения высоты базиса эрозии следующие: изменение уровня моря или озера, в которое впадает рассматриваемый поток, создание искусственного подпора на реке путем сооружения плотины или дамбы, спрямление излучин реки, приводящее к снижению уровня воды выше спрямления, и т. д. Во всех перечисленных случаях при наличии достаточных исходных данных может быть сделан расчет хронологического хода деформации русла (размывов или заиления) и определено его конечное состояние. Методика этих вычислений является приближенной. Наиболее надежны для рассматриваемого комплекса задач расчеты заиления водохранилищ, происходящего именно за счет искусственного поднятия базиса эрозии реки и обусловленного этим значительного снижения скоростей течения и существенного изменения других гидравлических параметров течения в зоне замедленного стока (в верхнем бьефе).

Методика расчета заиления водохранилищ довольно хорошо разработана и апробирована. Этой методике посвящена следующая глава. Расчет размыва или намыва русла при изменении базиса эрозии может производиться при использовании уравнения баланса наносов с учетом граничных условий, отвечающих рассматриваемой задаче, и параллельном выполнении гидравлических расчетов. В частности, может использоваться и упрощенный способ, основанный на сопоставлении транспортирующей способности больших участков реки для начальных и измененных условий. Принципиально это тот же способ, который рассмотрен выше применительно к случаю врезания русла в нижнем бьефе, но отличается использованием других граничных условий. Детально этот способ изложен в монографиях [58, 64].