

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ ЗАТОПЛЕНИЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ ПАВОДКОВЫМИ ВОДАМИ



Важнейшие отрасли народного хозяйства, непосредственно использующие учение о русловых процессах, — мелиорация и водное хозяйство. Учет и прогнозирование русловых переформирований необходимы при сооружении ирригационных каналов, пидроузлов, водозаборов, противопаводковых дамб. При проектировании водохранилищ возникают проблемы расчетов времени их заилиения, деформаций русел в верхних и нижних бьефах.

Из этого широкого круга вопросов рассмотрим один — построение кривой свободной поверхности речного потока без учета и с учетом вертикальных переформирований продольного профиля русла реки. Такая задача часто возникает при сооружении плотин, при повышении уровней воды из-за аккумуляции наносов в речных руслах. В этих случаях постоянному или временному (во время паводков) затоплению подвергаются прирусловые пойменные земли, часто наиболее ценные в сельскохозяйственном отношении.

Наиболее актуальна эта проблема в устьях рек, расположенных в семиаридных областях. Их долины представляют собой благодатные объекты для сельскохозяйственного освоения. Большая сумма положительных температур и наличие воды позволяют развивать богарное земледелие на поймах вдоль русел пойменных и дельтовых рукавов и орошаемое земледелие в центральных частях пойменных массивов и дельтовых равнин. Эти реки (Терек и Кура на Кавказе, Амударья и Сырдарья в Средней Азии) берут начало в горах и после выхода на равнину на значительном протяжении сохраняют полугорный характер русла. Они переносят огромное количество наносов, которые интенсивно аккумулируются в низовьях и устьевых областях из-за естественного деления единого русла реки на систему слепых пойменных и дельтовых рукавов, уменьшения расходов воды вниз по течению в результате разбора ее на орошение и испарение. Так, до устья рукава Каргалинский прорыв в устьевой области реки Терек доходит только 53 % воды из 500 м³/с в вершине рукава. За период с 1940 по 1977 г. в русле и на

пойме этого рукава отложилось 48,5 млн. т наносов. В результате прирусловая пойма и ложе русла реки поднялись над окружающей дельтовой равниной на 0,5—2,0 м; степень этого повышения увеличивается к низовьям.

Командное положение русел основных рукавов над окружающей местностью чрезвычайно облегчает развитие орошаемого земледелия. Сводится к минимуму количество и мощность насосных станций, возможно возведение сравнительно низконапорных ирригационных гидроузлов. Но одновременно резко увеличивается угроза затопления сельскохозяйственных угодий во время паводков, разрушения земель и населенных пунктов. Это обстоятельство требует проведения значительных работ по регулированию русел в низовьях рек, несущих большое количество наносов.

Наиболее распространенный метод борьбы с затоплениями — сооружение противопаводковых дамб вдоль русел водотоков. Для расчета их высоты необходимо определить положение профиля водной поверхности при паводке заданной обеспеченности (чаще всего 1 %), который пройдет по руслу с устойчивым продольным профилем дна. Эта задача часто решается путем непосредственных измерений на местности высоты меток уровней высоких вод и сооружения дамб соответствующих размеров. Однако в большинстве случаев подобное простое решение задачи одновременно и наиболее дорогое, а для неустойчивых русел и наименее надежное. Стоимость противопаводковых дамб резко увеличивается с увеличением их высоты. Поэтому наряду с сооружением дамб целесообразно провести комплекс работ по регулированию стока воды и наносов, изменению формы русла для снижения отметок высоких вод и предотвращения аккумуляции наносов в русле.

Наиболее кардинальный способ — сооружение регулирующих водохранилищ. Однако это весьма дорогостоящее мероприятие целесообразно лишь при комплексном использовании водохранилища (для орошения, водоснабжения, гидроэнергетики, рыбоводства и т. д.). При этом требуются трудоемкие расчеты.

Эффективен метод спрямления изгибов русла реки, уменьшения его длины, особенно если есть изгибы достаточной крутизны (с отношением длины по руслу к длине по прямой более 1,5). Спрямления быстро и ре-

зультативно создаются с помощью взрывной техники или землечерпательных машин. Трассировать спрямления удобно через пришовные пойменные понижения. Здесь минимален объем удаляемой породы, тяжелые отложения затонской части поймы будут препятствовать горизонтальным деформациям канала, а часто выходящие под ними древние пласты руслового аллювия будут способствовать саморазмыву канала в глубину.

Эффективность спрямлений русла реки для понижения уровней водной поверхности можно показать на примере низовьев Терека. Здесь в августе 1977 г. была введена прорезь через Аграханский полуостров, спрямившая реку и сократившая ее длину на 25 км. Свободная поверхность воды в нижней части русла приняла форму кривой спада с уклонами в нижней части прорези 0,0008. Уже через месяц зона увеличения уклона распространилась на 20 км вверх по реке, через год — на 30 км, к концу 1980 г. — на 40 км. Вверх по реке прокатилась отрицательная волна. Ее фронт по мере движения вверх замедлял скорость перемещения и выполаживался. При этом происходило снижение уровней воды, которое при сопоставимых расходах составило с августа 1977 г. по сентябрь 1980 г. 3 м в 4 км выше устья прорези, 1,7 м в 14 км и постепенно выклинивалось к 40 км выше устья прорези. В результате оказалось возможным уменьшить высоту проектируемых здесь противопаводковых дамб в 1,5—3,0 раза. Вместо необходимых ранее земляных работ по укладке 41,6 млн. м³ грунта (что обошлось бы в 88,1 млн. руб.) здесь достаточно уложить в дамбы почти в 4 раза меньше грунта (12,2 млн. м³). Стоимость работ составит 25,1 млн. руб. При этом в сельскохозяйственный оборот вовлекается около 13 тыс. га плодородных пойменных земель.

С учетом работ по регулированию стока воды и наносов в реке и изменения формы ее русла выбор метода построения кривой свободной поверхности будет зависеть от характера русловых деформаций. Он может быть оценен по соотношению фактической мутности руслообразующих наносов в реке S_{ϕ} , и транспортирующей способности потока S_{τ} и соотношению фактических скоростей потока v и неразмывающих скоростей v_n для грунтов, слагающих русло реки на данном участке. Если $S_{\phi} > S_{\tau}$, то в русле будет происходить аккумуля-

23. Распределение по вертикали мутности воды по частным фракциям (станция 11, июль 1981 г., река Терек, водомерный пост Парабоч, $h=3,00$ м, $v=1,46$ м/с, $I=54$ см/км, $d=0,25$ мм)

$h-z$, м	S , кг/м ³	S_K , кг/м ³					
		фракции, мм					
		0,5—0,25	0,25—0,10	0,1—0,05	0,05—0,01	0,01—0,005	<0,005
0,00	1,97	0,016	0,024	0,303	0,752	0,563	0,311
0,32	2,84	0,028	0,085	0,920	0,273	1,352	0,182
0,64	2,90	0,023	0,133	0,771	1,053	0,394	0,525
0,96	2,71	0,016	0,225	0,531	1,127	0,022	0,593
1,28	3,39	0,024	0,336	0,725	1,075	0,997	0,234
1,60	3,27	0,033	0,336	0,536	1,426	0,389	0,520
1,92	3,80	0,042	0,498	1,144	0,832	0,604	0,680
2,24	4,00	0,044	0,644	1,088	1,032	0,476	0,716
2,56	4,69	0,039	1,100	1,110	1,320	0,464	0,856
2,90	4,94	0,074	1,684	1,413	0,586	0,785	0,040

ция наносов; при $S_{\phi} \leq S_T$ и $v \leq v_n$ русло реки будет устойчивым; при $S_{\phi} < S_T$ и $v > v_n$ в русле реки будет происходить размыв.

Наибольшие сложности заключаются в определении величины транспортирующей способности потока. Существующие расчетные формулы, к сожалению, могут применяться лишь в тех условиях, для которых они были получены. Для надежности выводов необходимо в каждом конкретном случае создавать эмпирическую региональную формулу транспортирующей способности потока путем проведения измерений мутности воды и гидравлических характеристик потока на беспроточном устойчивом участке реки.

Например, на устойчивом в многолетнем плане участке русла Терека у станицы Гребенской в течение двух полевых сезонов были проведены детальные измерения вакуумным батометром распределения по вертикали мутности воды, обусловленной частицами разных размеров. Пример результатов измерений и анализа приведен в таблице 23.

Согласно этим данным, вертикальная эпюра мутности хорошо описывается кривой Рауза—Великанова с учетом коэффициента пропорциональности a между

коэффициентом турбулентной диффузии и коэффициентом диффузии импульса. Для крупнопесчаных фракций наносов ($d > 0,5$ мм) коэффициент $a \approx 1,0$. Его значение уменьшается в зависимости от гидравлической крупности наносов u .

u	0,030	0,025	0,017	0,006
a	0,98	0,78	0,53	0,13

Особое внимание обращалось на измерение придонной мутности в 5—10 см ото дна. На основании обработки более 200 таких измерений была получена эмпирическая связь придонной мутности с гидравлическими характеристиками потока.

После интегрирования по вертикали кривой Рауза—Великанова с учетом выражения для придонной мутности получаем среднюю по вертикали мутность воды*:

$$S_{\text{ср}} = A \left(\frac{v}{v_n} - 1 \right)^2 v h. \quad (1)$$

Формула определяет транспортирующую способность потока по отношению к руслообразующим наносам в условиях реки с большими скоростями течения, мелким аллювием, высокой мутностью, обусловленную транзитными наносами, с подвижными высокими грядами. Коэффициент A зависит от гидравлических характеристик потока и донных грунтов, в среднем для низовьев Терека $A = 0,08$.

В условиях равнинных рек с крупно- и среднезернистым песчаным аллювием, малыми скоростями течения, малыми концентрациями транзитных наносов и пологими малоподвижными грядами можно использовать формулу К. И. Россинского и И. А. Кузьмина (1958) для верхней огибающей поля точек:

$$S_{\text{ср}} = 0,024 \frac{v^3}{uh}. \quad (2)$$

Фактическую мутность руслообразующих наносов $S_{\text{ф}}$ можно вычислить по гидравлическим характеристикам потока выше участка измененного русла по формулам (1), (2) или провести для ее определения специальные натурные наблюдения. В последнем случае в

* Значения букв во всех формулах см. в приложении 3.

первом приближении руслообразующими следует считать наносы крупнее 0,05 мм.

Неразмывающая скорость потока для связных грунтов наиболее часто определяется по формуле Ц. Е. Мирцхулавы (1970):

$$v_H = \lg \frac{8,8h}{d} \sqrt{\frac{2gm_1}{\alpha_1 \gamma_0 m_2} [(\gamma_s - \gamma)d + \alpha_2 P_{p.\gamma} K]}. \quad (3)$$

Для несвязных грунтов наиболее удобна формула Г. И. Шамова (1959):

$$v_H = 3,7 d^{1/3} h^{1/3}. \quad (4)$$

Это выражение для v_H применяется в формуле (1).

Наиболее просто проводится расчет положения свободной поверхности воды, если после проведения мероприятий по регулированию стока и формы русла продольный профиль дна реки оказывается устойчивым. В таком случае необходимо воспользоваться уравнением неравномерного движения воды в русле в виде

$$\frac{dh}{dx} = \frac{I_{\text{дн}} - \frac{v^2 n^2}{h^{1/3}} + \frac{dB}{dx} \frac{v^2}{gB}}{1 - \frac{v^2}{gh}}. \quad (5)$$

Для решения этого уравнения необходимо располагать фактическим продольным профилем дна в осредненных по ширине русла отметках $z_{\text{дн}}$, ширинами реки B_j в расчетных створах, расходом воды Q_i , при котором необходимо получить профиль свободной поверхности, коэффициентом шероховатости n , глубиной реки в начальном расчетном створе. Коэффициент шероховатости n , как правило, определяется по таблице Стрибного, которая имеется в любом руководстве по гидравлике (например, «Гидравлика» Р. Р. Чугаева, 1970). В случае наиболее ответственных расчетов коэффициент n необходимо определять по натурным данным обратным решением уравнения (5) для участка реки, где $dB/dx \approx 0$.

Задача построения продольного профиля водной поверхности значительно затрудняется, когда дно русла реки неустойчиво. При этом наиболее неблагоприятен вариант аккумуляции наносов в русле.

В этом случае необходимо предварительно рассчитать выработанный продольный профиль дна реки — профиль динамического равновесия. Он формируется у реки с нулевым в среднем во времени и по длине балансом руслообразующих наносов, то есть при соответствии гидравлических характеристик потока его транспортирующей способности. Для расчета положения выработанного продольного профиля дна необходимо совместное решение уравнений движения потока и деформации русла с учетом формулы для транспортирующей способности потока. Для решения этой системы требуются быстродействующая ЭВМ и значительная работа по подготовке входных данных.

В практике часто оказывается достаточным простой оценочный метод решения этой системы. Для расчетов необходимы начальный продольный профиль дна реки; таблица значений расходов воды, охватывающих весь диапазон их изменений; повторяемости этих расходов; изменения по длине реки ширины русла и медианных диаметров донных наносов для каждого из этих расходов воды. Оценочным методом определяется конечное положение эквивалентного выработанного продольного профиля реки.

Если транспортирующая способность потока рассчитывается по формуле (1), то, используя определение

расхода $Q = vBh$ и положение о том, что при выработанном продольном профиле мутность руслообразующих наносов на бесприточном участке реки постоянна по длине потока и равна K_{0i} , получаем для каждого расхода воды Q_i в j -м створе среднюю скорость течения:

$$v_{ij} = \sqrt[7]{\frac{2566d^2_{ij}Q_i}{B_{ij}} \left(1 + \sqrt{\frac{K_{0i}B_{ij}}{AQ_i}}\right)^6} \quad (7)$$

и среднюю глубину выработанного русла:

$$h_{ij} = \frac{Q_i}{B_{ij} \sqrt[7]{\frac{2566d^3_{ij}Q_i}{B_{ij}} \left(1 + \sqrt{\frac{K_{0i}B_{ij}}{AQ_i}}\right)^6}} \quad (8)$$

Подставляя (7) и (8) в уравнение неравномерного движения, записанного в виде

$$I = \frac{1}{2g} \frac{dv^2}{dx} + \frac{v^2 n^2}{h^{4/3}}, \quad (9)$$

получаем отметки дна $z_{i(j+1)\text{дн}}$ выработанного продольного профиля.

Для каждого расхода воды Q_i рассчитывается свой выработанный продольный профиль дна и своя величина деформации в каждом j -м створе:

$$\Delta z_{ij} = z_{j\text{нач}} - z_{i\text{дн}} \quad (10)$$

Если считать в первом приближении процесс вертикальных деформаций линейным во времени (что справедливо для начального периода наиболее интенсивных, практически значимых деформаций), то суммарная деформация русла в j -м створе, обусловленная работой всего диапазона расходов воды, проходящих в реке, может быть рассчитана по формуле

$$\Delta z_{j\text{ср}} = \sum_{i=1}^n \Delta z_{ij} Q_i p_i \quad (11)$$

Для расчета повторяемостей расходов p_i необходим ряд ежедневных расходов воды за 20—25 лет, так чтобы в этот период наблюдались как многоводные, так и маловодные фазы многолетнего цикла изменения водности реки. Весь диапазон расходов воды разбивается на 15—20 классов и для среднего в каждом классе расхода воды Q_i вычисляется его повторяемость p_i в долях единицы.

Конечное положение эквивалентного продольного профиля дна реки, при расчете которого учитывается вклад в вертикальные деформации каждого проходящего по реке расхода воды, определится формулой

$$z_{j\text{эк}} = z_{j\text{нач}} + \Delta z_{j\text{эк}} \quad (12)$$

Время T , необходимое для формирования эквивалентного выработанного продольного профиля, определяется по формуле

$$T = \frac{2400 \sum_{j=1}^N \Delta z_{j\text{эк}} B_j dx}{\sum_{i=1}^m Q_i p_i (S_{\Phi i} - S_{Ti})} \quad (13)$$

При ее выводе также предполагалась линейность во времени процессов вертикальных переформирований русла.

Значение константы K_{0i} для каждого расхода воды Q_i соответствует транспортирующей способности русла, находящегося в состоянии динамического равновесия. Оно изменяется с изменением расхода воды Q_i . Если русло реки выше расчетного участка устойчиво, тогда K_{0i} равно среднемуголетнему значению $S_{\Phi i}$ для данного расхода воды Q_i . Тем не менее необходимо провести корректировку значений K_{0i} с помощью формулы (8) по кривым $h=f(Q)$ для устойчивого плесового участка реки. При отсутствии такого плеса на расчетном участке можно воспользоваться выражением для инварианта подобия M , полученного К. В. Гришаниным,

$$M = h(gB)^{1/4} / Q^{1/2} \quad (14)$$

Для устойчивого русла значение M близко к 1,0 (Гришанин, 1979). Из формул (14) и (8) получаем для расчета K_{0i} формулу

$$K_{0i} = \frac{AQ_i}{B_{ij}} \left(\sqrt[6]{\left(\frac{g^{1/4} Q_i^{1/2}}{MB_{ij}^{3/4}} \right)^7 \frac{B_{ij}}{2566 d_{ij}^2 Q_i} - 1} \right)^2 \quad (15)$$

Эквивалентный выработанный продольный профиль дна русла реки занимает некоторое промежуточное положение в семействе из i выработанных профилей дна для каждого конкретного расхода воды Q_i . Продольные профили, выработанные большими расходами воды, располагаются ниже эквивалентного, выработанные малыми расходами — выше эквивалентного. При прохождении наиболее опасных высоких паводков русло реки будет в основном размываться. Поэтому рассчитанная кривая свободной поверхности воды для высокого паводка, проходящего по руслу реки с эквивалентным продольным профилем дна, будет несколько выше фактической.

Изложенные методы расчетов вертикальных деформаций дна русла и отметок кривой свободной поверхности достаточно эффективны для сравнительно коротких участков русел рек, длиной не более 100 ширин. Для более протяженных расчетных участков вероятно накопление ошибок из-за неточностей в выборе коэффициента шероховатости n . При необходимости вести расчеты на более протяженном участке он разбивается на несколько участков, в начале и в конце которых ведутся наблюдения за уровнями и расходами воды. Тогда, по данным наблюдений, расчеты корректируются путем варьирования величиной коэффициента шероховатости.

В размываемом русле, кроме вертикальных, возможны горизонтальные переформирования, прогноз которых важен для выбора расстояния между дамбами и руслом реки. В настоящее время методы расчета горизонтальных деформаций русла мало разработаны, в первом приближении можно воспользоваться методикой, разработанной в ГГИ и изложенной в «Рекомендациях по размещению рассеивающих выпусков сточных вод» (М.: Стройиздат, 1981).

Условные обозначения: x — продольная координата; z — вертикальная координата; $z_{\text{пов}}$ — отметка свободной поверхности; $z_{\text{дн}}$ — отметка дна; Δz — величина деформации; $\Delta z_{\text{эк}}$ — величина деформации, соответствующая всему диапазону расходов воды; $z_{\text{нач}}$ — отметка дна начального продольного профиля; $z_{\text{эк}}$ — отметка дна эквивалентного продольного профиля; Q — расход воды; B — ширина русла; v — средняя по вертикали скорость течения; v_n — неразмывающая скорость; I — уклон водной поверхности; $I_{\text{дн}}$ — уклон дна; h — средняя глубина потока; u — гидравлическая крупность наносов; d — медианный диаметр донных грунтов; $S_{\text{ср}}$ — осредненная по вертикали мутность воды, соответствующая руслообразующим наносам; S_t — транспортирующая способность потока; S_f — фактическая мутность потока; K_0 — транспортирующая способность потока в русле с выработанным профилем; a — коэффициент пропорциональности между коэффициентом турбулентной диффузии и коэффициентом диффузии импульса; A — коэффициент в формуле транспортирующей способности потока; n — коэффициент шероховатости; M — инвариант подобия К. В. Гришанина; i — индекс интервала расхода воды, j — индекс створа по длине реки; k — индекс фракций наносов; N — количество створов; m — количество интервалов расходов воды; T — время формирования эквивалентного выработанного продольного профиля; g — ускорение свободного падения.