

ОБЩАЯ СХЕМА РАСЧЕТА ДЕФОРМАЦИЙ РУСЛА И ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЕВОГО РЕЖИМА РЕКИ НА УЧАСТКЕ ВЛИЯНИЯ КАРЬЕРА ПРИ ИЗЪЯТИИ РУСЛОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

М.В. Петров*, И.В. Космаков**

*Комитет природных ресурсов по Красноярскому краю, **Научно-исследовательское предприятие по экологии природных систем (НИП ЭПРИС)

Детально рассмотрена схема расчетов деформаций русла и изменения уровня реки на участках влияния русловых карьеров.

В нормативной литературе по данной проблеме [5] изложены методические основы выполнения инженерных расчетов по оценке негативного влияния русловых разработок на водный режим рек. Настоящая работа является прикладным дополнением к указанному Руководству. Она основана на опыте полевого обследования, анализа исходных и расчетных данных, а также методического подхода к исследуемой задаче при производстве работ по оценке негативного влияния добычи нерудных строительных материалов в русле р. Енисей, которые выполнялись Сибирским научно-исследовательским гидрометеорологическим институтом (СибНИГМИ) и Научно-исследовательским предприятием по экологии природных систем (НИП ЭПРИС) в период 1989–1993 гг.

В основе названных работ, как показал опыт, лежит полнота и качество исходной информации, которая, по меньшей мере, должна состоять из следующих данных:

1. Русловая съемка реки на участке влияния карьера до незатапливаемых бровок;
2. Отметки или уклоны свободной поверхности хотя бы при одном из режимов водности на этом участке;
3. Кривая расходов воды и внутригодовое распределение стока;
4. Среднемесячные расходы взвешенных наносов, либо значения мутностей за ряд лет;
5. Гранулометрический состав взвешенных наносов и донных отложений;
6. Объемы и график навигационной добычи НСМ;
7. Параметры карьера (расположение в плане, линейные размеры);
8. Среднемесячная температура воды за ряд лет.

Перечисленные исходные данные необходимы и в принципе достаточны для производства последующих расчетов по оценке воздействия русловых разработок на водный режим реки.

Предлагаемый порядок расчетов следующий:

В годовом гидрологическом цикле выбираются несколько характерных режимов водности, один из которых должен примерно соответствовать проектным условиям судоходства, и один – руслоформирующим условиям (всего 4–6 фаз водности). Основным критерием при выделении этих фаз является сочетание твердого и жидкого стока. В рамках навигационного периода, когда производится разработка карьера, для

удобства расчетов желательно иметь целое число фаз водности.

Для каждой выделенной фазы водности в бытовых условиях (до начала разработки карьера) рассчитываются:

1. Основные гидравлические показатели расчетных сечений.

К основным гидравлическим показателям расчетных сечений относятся:

- отметки свободной поверхности, Z_6 ;
- площади живых сечений, ω_6 ;
- средние глубины, $\bar{h}_6$;
- средние скорости потока, V_6 ;
- коэффициенты шероховатости, n_6 ;
- местные продольные уклоны водной поверхности, J_6 .

При этом в пределах участка реки расчетные сечения выбираются таким образом, чтобы максимально отразить все изменения морфометрии (чередование плесов, перекатов, сужений и расширений русла). Изменение морфометрии русла между соседними сечениями (профилями) должно быть плавным. В зоне непосредственного размещения карьера расчетные сечения назначаются чаще. По два расчетных сечения должно располагаться на верховом и низовом откосах карьера, одно из которых – совпадает с положением бровки, второе – с положением подошвы откоса. В зависимости от длины карьера и особенностей морфометрии приуроченного к нему участка русла в зоне карьера желательно иметь, по меньшей мере, еще 3 расчетных сечения.

При известных Z_6 для всех выбранных фаз водности, которые характеризуются средним за фазу расходом воды Q , расчет основных гидравлических показателей сечений выполняется по известным в гидравлике уравнениям кривой свободной поверхности [3] и не вызывает особых затруднений при решении плоской задачи.

Чаще всего в практике решения подобных задач приходится сталкиваться с отсутствием данных об уклонах или отметках уровня воды на протяжении всего участка в разные фазы водности. При ограниченных сроках и материальных возможностях проведения соответствующих натурных изысканий приходится довольствоваться материалами, полученными при каком-то одном режиме водности (чаще проектном).

В этом случае сначала выполняются расчеты для освещенного наблюдениями режима водности.

В результате для этого режима водности и каждого расчетного сечения получают рассчитанные n_6 .

Располагая кривой расходов воды, которая может быть получена путем непосредственных измерений в каком-либо створе, или путем трансформации стока на участке между створами с наличием гидрометрических наблюдений, задаются отметками уровня воды, соответствующими остальным режимам водности, т.е. характерным Q .

При последующих расчетах следует иметь в виду, что n будет зависеть от наполнения русла. Оценить приближенно эту зависимость можно по формуле В.Н. Гончарова [4]:

$$n = \bar{h}^{1/6} / 17,7 \lg(6,15h / \bar{\Delta}), \quad (1)$$

где h – средняя глубина в расчетном сечении, м;

$\bar{\Delta}$ – средняя высота выступов шероховатости, м ($\Delta \approx 0,7 d_{cp}$);

d_{cp} – средний диаметр верхнего слоя донных отложений в расчетном сечении, м.

Откуда высота выступов шероховатости определяется в неявном виде:

$$\lg \bar{\Delta} = \lg(6,15h) - \bar{h}^{1/6} / 17,7n. \quad (2)$$

Если нет необходимости определения собственно $\bar{\Delta}$, то, учитывая, что

$$n = \bar{h}^{1/6} / 17,7 (\lg(6,15h) - \lg \bar{\Delta}) \quad (3)$$

по известным n_6 для каждого расчетного сечения по (2) определяются условные величины $\lg \bar{\Delta}$, которые принимаются постоянными для всех режимов водности. Иначе $\bar{\Delta}$ определяется подбором.

Затем, используя зависимость (3), и, оценив приближенно $\bar{h}$, для оставшихся режимов водности рассчитываются n_6 .

В табл. 1 приведены значения n , рассчитанные по формуле (3). Располагая значениями n для неосвещенных наблюдениями режимов водности и отметками уровня воды в створе, для которого имеется кривая расходов, можно рассчитать все перечисленные гидравлические показатели расчетных сечений.

2. Расход влекомых наносов на участке.

Как правило, если на исследуемом участке реки не проводились специальные наблюдения, то данные измерений влекомых (донных) наносов в ежегодных гидрологических справочниках отсутствуют. Кроме того, даже при наличии материалов измерений, из-за несовершенства существующей измерительной техники желательно выполнить расчет стока влекомых наносов.

Формулы для подобных расчетов рекомендованы в нормативном документе [5], а также в ряде других публикаций [1, 4].

Исходными данными для расчетов являются, кроме полученных гидравлических показателей сечений, характерные диаметры зерен влекомых наносов, а именно: средний, обеспеченностью 50, 90 и 95%, либо полностью кривая гранулометрического состава влекомых наносов или донных отложений, а также их плотность.

Если имеются данные гранулометрии только донных отложений, то для получения кривой гранулометрического состава влекомых наносов можно с некоторой потерей точности поступить следующим образом.

По формуле Г.И. Шамова [6] определяется предельный диаметр зерен неподвижных фракций донных наносов:

$$d_{пред} = 0,012 (\bar{v}^3 / \bar{h}), \quad (4)$$

где $\bar{v}$, $\bar{h}$ – средние в расчетном сечении скорость и глубина потока. На кривой гранулометрического состава донных отложений отсекается та его часть, которая соответствует смеси наносов с диаметрами зерен меньше $d_{пред}$. Обеспеченность, соответствующая $d_{пред}$ принимается за 100% и выполняется пересчет обеспеченностей выбранного участка кривой. Здесь сделано допущение, что распределение фракций влекомых наносов близко к распределению тех же фракций в донных отложениях. При отсутствии данных о плотности смеси наносов рекомендуется принимать ее равной 2650 кг/м³ [5].

Расчет стока влекомых наносов производится для 3–5 расчетных сечений. Далее его значение осредняется по 2–3 формулам, давшим лучшую сходимость результатов. В итоге может быть три случая:

Таблица 1
Значения коэффициентов шероховатости русла в зависимости от средней глубины (h) и среднего диаметра донных отложений (d_{cp}) при условии $\Delta = 0,7 d_{cp}$ по В.Н. Гончарову

	$\lg \Delta$	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	6,0	8,0
1	-3,15	0,014	0,014	0,015	0,0155	0,016	0,016	0,016
2	-2,85	0,015	0,016	0,016	0,0165	0,017	0,017	0,018
5	-2,46	0,017	0,017	0,018	0,018	0,018	0,019	0,019
10	-2,15	0,019	0,019	0,02	0,02	0,02	0,02	0,021
15	-1,98	0,02	0,02	0,021	0,021	0,021	0,021	0,022
20	-1,85	0,021	0,021	0,022	0,022	0,022	0,022	0,023
30	-1,68	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,024
40	-1,55	0,025	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,0245
50	-1,46	0,026	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
70	-1,31	0,028	0,027	0,026	0,026	0,026	0,0265	0,0265
100	-1,15	0,031	0,029	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028
150	-0,97	0,034	0,032	0,031	0,0305	0,03	0,0295	0,0295
200	-0,85	0,0375	0,034	0,033	0,0325	0,032	0,031	0,031

а) во всех или отдельных расчетных сечениях значения расходов влекомых наносов различаются незначительно и незакономерно по фазам водности. Такой случай характерен для участка русла с транзитным характером стока влекомых наносов. Его значение определяется как среднеарифметическое из значений в каждом расчетном сечении.

б) во всех или некоторых расчетных сечениях значения влекомых наносов различаются значительно, но по фазам водности это различие незакономерно. Такой случай характеризует участок русла, на котором при одной водности реки могут формироваться такие русловые образования как побочни, намывные косы, временные перекаты и др., а при другой водности они размываются частично или полностью. В многолетнем разрезе русло существенных изменений не претерпевает.

Для целей описываемых расчетов среднее значение расхода влекомых наносов определяется также как и в предыдущем случае.

в) имеются различия в значениях расходов влекомых наносов во всех или в некоторых расчетных сечениях. Они носят они закономерный характер по фазам водности (т.е. имеются створы, где этот расход всегда больше либо меньше, чем в других). Так, если в самом верхнем створе этот расход больше, чем в нижнем, то на участке между этими створами имеет место постоянная аккумуляция части наносов, а наоборот – размыв дна.

Такие однонаправленные при любой водности процессы должны подтверждаться русловыми съемками разных лет. Если этого нет, то необходимо тщательно проанализировать исходные данные расчетов и исключить возможные ошибки. Если подтверждается постоянство и однонаправленность руслового процесса, то нужно выявить его характер и в этом случае необходимо определить расход наносов при подходе к будущему карьере и на выходе ниже него с тем, чтобы в последствии оценить степень влияния карьера на изменение руслового процесса.

Случай, когда на участке наблюдается естественный размыв русла, наиболее неблагоприятен для создания на нем руслового карьера, т.к. последний может усилить динамику этого процесса.

3. Пространственная структура потока. Поскольку наибольший интерес в плане заносимости карьера и деформаций русла в зоне его влияния представляет не весь сток влекомых наносов, а его часть, перехватываемая будущим карьером, то необходимо знать пространственную структуру потока на участке.

Существующие методики расчета позволяют определить распределение по живому сечению средних скоростей течения на любых заданных вертикалях:

а) упрощенный способ, когда имеются данные только о среднем по живому сечению коэффициенте шероховатости $\bar{n}$:

$$\bar{v}_i = (1/\bar{n}) \cdot h_i^{1/6} (h_i \cdot J)^{1/2}, \quad (5)$$

где i – номер вертикали.

б) детальный способ, когда имеются данные о составе донных отложений по всему живому сечению, или на заданных вертикалях, либо коэффициенты шероховатости на них n_i , аналогично (5):

$$v_i = (1/n_i) \cdot h_i^{1/6} (h_i \cdot J)^{1/2}, \quad (6)$$

или по В.Н. Гончарову [3]:

$$\bar{v}_i = 22,7 (h_i/\Delta)^{1/6} (h_i \cdot J)^{1/2}, \quad (7)$$

где местный уклон J по ширине данного сечения принимается постоянным.

Определив $\bar{v}_i$ по (5), из формулы (4) вычисляются предельные диаметры зерен донных отложений на каждой расчетной вертикали $d_{пред i}$, являющиеся косвенным показателем вариации n_i по сечению. Учитывая, что по В.Н. Гончарову $\Delta^{1/6} = 22,7n$, изменение n по сечению будет выглядеть следующим образом:

$$n_i = \bar{n} (\Delta_i / \bar{\Delta})^{1/6}, \quad (8)$$

имея в виду соотношение $\Delta \approx 0,7d_{cp}$, и допустив, что $(d_{cp i} / d_{cp}) \approx (d_{пред i} / d_{пред})$, получим:

$$n_i \approx n (d_{пред i} / d_{пред})^{1/6}. \quad (9)$$

На участках изгиба русла полученные значения средних скоростей пересчитываются с учетом радиуса кривизны этого изгиба:

$$\bar{v}_n = \bar{v}_i (r_0 / r_i), \quad (10)$$

где $\bar{v}_n$ – средняя скорость на вертикали в расчетном сечении на изгибе русла, м/с

r_0 – радиус изгиба до оси потока, м

r_i – радиус изгиба до заданной вертикали, м.

Далее значения скоростей корректируются с учетом различия между расчетным Q_p и фактическим Q расходами воды:

$$v_i = \bar{v}_n (Q / Q_p), \quad (11)$$

где

$$Q_p = S((q_i + q_{i+1})/2) b_{i+1}$$

q_i – удельный расход воды на расчетной вертикали, м²/с;

b_{i+1} – расстояния между вертикалями, считая урезы, м;

$$q_i = \bar{v}_n h_i. \quad (12)$$

На этом заканчиваются расчеты первого этапа, относящиеся к бытовым условиям исследуемого участка реки.

По мере разработки карьера в системе «русло-карьер» начинают действовать одновременно четыре процесса:

- перестройка пространственной структуры потока;
- изменение отметок кривой свободной поверхности и, как прямое следствие этого, – изменение гидравлических характеристик потока;
- деформации русла на участке влияния карьера;
- заносимость и заиливание карьера.

Все четыре процесса протекают одновременно, находясь в тесном взаимодействии. Поэтому расчеты

целесообразно выполнять на заданные сроки, т.е. за некоторые интервалы времени, начиная с момента начала разработки карьера. При этом все расчетные элементы относятся либо к середине данного интервала, либо определяются как средние величины между элементами на начало и конец интервала.

4. Изменения в пространственной структуре потока под влиянием карьера. Под влиянием карьера может происходить изменение в пространственной структуре потока. Оно выражается в том, что вследствие образования в ряде сечений (в зоне достаточно большого по протяженности карьера) области больших глубин, в эту область происходит дополнительное отвлечение части общего стока реки.

Условно по ширине поток можно разделить на две части:

$$Q = Q_x + (Q - Q_x),$$

где Q_x – наибольшая часть стока реки, проходящая над карьером в некотором сечении шириной B_x .

Возможно, этот расход воды (Q_x) будет больше при наличии карьера, чем расход в том же сечении в бытовых условиях на ширине части русла равной B_x . Он может быть определен в результате расчета распределения средних на вертикалях скоростей течения по сечению потока или удельных расходов воды. Зная величину Q_x , можно определить в любом расчетном створе ту часть ширины русла, над которой он проходит.

Сложность определения Q_x заключается в том, что в зоне расположения карьера шероховатость русла может заметно отличаться по сравнению с бытовыми условиями.

Допуская, что на ширине русла, не занятой карьером, шероховатость не изменяется, можно записать для среднего коэффициента шероховатости в расчетном сечении следующую зависимость:

$$n_{np} = (n_6 (B_0 - B_x) + n_x B_x) / B_0, \quad (13)$$

где n_x – коэффициент шероховатости в пределах карьера, B_0 – ширина русла в расчетном сечении, B_x – ширина карьера в этом же сечении.

Обозначим относительную ширину карьера B_x/B_0 через $B_{ок}$, получим:

$$n_{np} = n_6 (1 - B_{ок}) + n_x B_{ок}. \quad (14)$$

В одной из публикаций по исследованию системы “русло-карьер” [6] предложена следующая эмпирическая зависимость:

$$n_x / n_6 = (\omega_x / \omega_6)^{1,25}, \quad (15)$$

где ω_6 и ω_x – соответственно площади живых сечений до и после образования карьера.

В этом случае расход в зоне карьера выразится следующим образом:

$$Q_x = Q_{6к} (h_x / h_{6к})^{5/12} (J_x / J_{6к})^{1/2}, \quad (16)$$

где индекс “6к” соответствует параметрам в зоне карьера в бытовых условиях.

Очевидно, что при ширине карьера равной ширине русла произведение сомножителей при $Q_{6к}$ будет равно 1. Это значит, что чем уже карьер, тем больше разница между Q_x и $Q_{6к}$.

Поскольку вопрос изменения шероховатости русла при образовании карьера пока изучен недостаточно, то при расчетах распределения стока по ширине расчетного сечения предлагается поступать следующим образом. Глубину воды на скоростных вертикалях над карьером принимать равной глубине на его боковых откосах в данном расчетном сечении.

Определив, таким образом, по всей длине карьера наибольший Q_x , можно определить в любом расчетном сечении ту часть ширины русла, над которой он проходит. Эта величина в дальнейшем будет приблизительно соответствовать ширине зоны размыва дна ниже низового откоса, а также ширине зоны перемещения влкомых наносов выше верхового откоса карьера, которые будут перехвачены последним.

Строгое определение положения исходного створа выше карьера, с которого начинается перестройка пространственной структуры потока в сравнении с существовавшей в бытовых условиях, весьма сложно. Поэтому грубо предлагается приурочивать расположение этого створа к ближайшему гребню выше лежащего переката. Чем ближе этот гребень к верховому откосу карьера, тем радикальнее будет происходить пространственная перестройка потока. Если створ верхового откоса располагается выше гребня переката, то он и будет исходным, вплоть до совпадения его со створом наибольших глубин вышележащего плеса или плесовой ложины.

Восстановление пространственной структуры ниже карьера также происходит на некотором расстоянии от него.

Предполагается располагать нижнюю границу этой зоны за ближайшим ниже по течению перекатом, а точнее, в створе наибольших глубин следующего за ним плеса, т.е. в самом близком за перекатом створе с наибольшей площадью живого сечения.

В целом поток можно рассматривать состоящим как бы из двух отдельных потоков, общим для которых является избыток, по сравнению с бытовыми условиями, твердого стока на участке выше карьера. На участке в зоне карьера часть потока, приуроченная к нему, разгружает переносимый твердый материал в карьер почти полностью. Другая часть потока достигает наибольшей транспортирующей способности вблизи верхового откоса карьера и далее также может аккумулировать в русле избыточную часть твердого стока до створа, где происходит восстановление пространственной структуры потока и ее гидравлики. Ниже карьера освещенная часть потока восстанавливает дефицит твердого материала в нем за счет размыва русла полностью, либо частично (в зависимости от геологии дна). Другая часть на некотором учас-

тке по-прежнему может аккумулировать часть наносов, либо приблизиться к бытовым условиям.

Учитывая вышеизложенное, производится расчет распределения скоростей течения и удельных расходов воды на вертикалях в следующих расчетных створах:

- в створе низового откоса карьера;
- в створе верхового откоса карьера;
- во всех створах в зоне размещения карьера;
- в створе гребня ближайшего вышележащего переката (ближайшего выше по течению живого сечения с наименьшей площадью);
- в створе с наибольшей площадью живого сечения на ближайшем ниже карьера плесе.

5. Деформации русла на участке влияния карьера. Деформации (размыв) русла выше карьера будут вызваны увеличением скоростей течения и уклонов водной поверхности при тех же режимах водности, что и в бытовых условиях.

Объем этого размыва русла за расчетный интервал времени и для данной фазы водности определяется следующим образом:

$$W_B = 8,64 \cdot 10^4 \cdot T \cdot \sum ((\Delta G_i + \Delta G_{i+1}) / 2), \quad (17)$$

где W_B – средний объем размыва русла на всем участке русловых деформаций выше карьера длиной L_{pb} , m^3 ; T – продолжительность данной фазы водности в течении расчетного срока, сут.; ΔG_i – увеличение расхода влекомых наносов в i -створе в расчетный срок по сравнению с предшествующим, начиная от бытовых условий, m^3/c ; i – порядковый номер расчетного створа, начиная от створа верхового откоса карьера вверх до створа, отстоящего от него на расстоянии L_{pb} .

Средняя глубина h_p в нижнем сечении каждого расчетного участка длиной между выбранными створами $L_{i,i+1}$ после размыва русла определяется, исходя из следующих соображений:

$$W_{i,i+1} = ((\bar{h}_{\partial i} + \bar{h}_{\partial i+1}) / 2) \cdot L_{i,i+1} \cdot B_{i,i+1} \quad (18)$$

где $W_{i,i+1}$ – объем размыва дна на участке между створами, m^3 ; $B_{i,i+1}$ – средняя ширина русла на этом участке, м; $\bar{h}_{\partial i}$, $\bar{h}_{\partial i+1}$ – средние по сечениям величины размыва дна русла в соответствующих расчетных створах, м.

Для самого верхнего участка в начале зоны размыва $h_{pm} = 0$ и тогда:

$$h_{\partial m-1} = (2W_{m-1,m}) / (L_{m-1,m} \cdot B_{m-1,m}). \quad (19)$$

Для каждого последующего участка:

$$h_{\partial i} = (2W_{i,i+1}) / (L_{i,i+1} \cdot B_{i,i+1}) - \bar{h}_{\partial i+1}, \quad (20)$$

откуда

$$h_{pi} = h_{npi} + h_{\partial i} \quad (21)$$

Для упрощения расчетов можно принять, что величина размыва дна по мере удаления от карьера уменьшается по линейному закону. В этом случае:

$$W_B = 8,64 \cdot 10^4 \cdot T \cdot (\Delta G_{BK} / 2), \quad (22)$$

где ΔG_{BK} – увеличение расходов влекомых наносов в расчетный срок в створе верхового откоса карьера по сравнению с бытовым в этом же створе, m^3/c .

Средняя глубина размыва дна в створе верхового откоса будет в этом случае наибольшей в пределах зоны размыва и выразится аналогично (19):

$$h_{\partial max} = 2W_B / (L_{pb} \cdot B_L). \quad (23)$$

На участке русла ниже карьера длиной L_{pb} также будет происходить размыв дна в связи с увеличением транспортирующей способности потока вследствие его осветления на выходе из карьера. Общий дефицит твердого стока в потоке ниже карьера составит:

$$\Delta R_T = \Delta G_T + \Delta R_B = (G_D - G_{DK}) + (R_B - R_{BK}), \quad (24)$$

где G_D и R_B – соответственно сток донных и взвешенных наносов, индекс “к” – относится к периоду существования карьера.

Вследствие инерционности пространственной структуры потока, этот дефицит твердого стока на некотором участке длиной L_d в начале зоны размыва ниже карьера будет иметь место не по всему сечению, а в некоторой его части шириной B_d .

Точное теоретическое определение L_d и B_d весьма затруднительно. С небольшой погрешностью можно утверждать, что на протяжении зоны восстановления пространственной структуры потока, длиной L_{nb} и шириной в замыкающем створе B_{nb} , через сечение ω_{nb} , где проходит расход воды Q_k , указанный дефицит твердого стока будет сохраняться полностью, снижаясь от низового откоса карьера до замыкающего створа по мере насыщения этой части потока наносами, практически исключительно влекомыми.

В прямолинейном русле и при слабой турбулентности потока ниже замыкающего створа приуроченность дефицита ΔR_T лишь к части потока может сохраняться на значительном расстоянии. Выравниванию ΔR_T по всему сечению будут способствовать изгибы русла, порожистые участки и другие зоны повышенной турбулентности.

Увеличение ширины зоны дефицита твердого стока B_d примерно можно принять по линейной интерполяции отдельно для двух участков:

1 участок:

$$B_d^1 = B_{km} + (B_{km} - B_{nb}) \cdot (L_d^1 / L_{nb}), \quad (25)$$

2 участок:

$$B_d^2 = B_{nb} + (B_{nb} - B_{on}) \cdot (L_d^2 / L_{on}), \quad (25a)$$

где B_d – ширина зоны дефицита твердого стока на любом удалении L_d от исходного створа, для участка I – от створа с наибольшим Q_k в зоне карьера, где ширина последнего – B_{km} , для участка II – от створа, в котором завершается восстановление простран-

ственной структуры потока ($B_{\text{нв}}$ – ширина части русла в этом створе над которой проходит расход воды Q_k), $B_{\text{он}}$ – полная ширина русла, охваченная дефицитом твердого стока, $L_{\text{нв}}$, $L_{\text{он}}$ – протяженности соответственно 1 и 2 участков.

В случае, если восстановление пространственной структуры потока произойдет за пределами участка длиной $L_{\text{рн}}$, то $L_{\text{нв}} = L_{\text{рн}}$ и расчетный участок будет только один.

При решении плоской задачи приведенные рассуждения не имеют принципиального значения, поскольку рассматриваются изменения гидравлических и морфометрических показателей русла осредненных по живому сечению. Но если нас интересует перераспределение стока по живому сечению (например, при разделении русла на рукава и стесненных условиях судоходства), либо интенсивность русловых деформаций у того или иного берега, в той или иной протоке, при наличии здесь каких-либо гидротехнических и иных сооружений и опасности их подмыва, то очевидно, что рассмотренный вопрос приобретает особую важность.

Расчет величины размыва русла на рассмотренных участках предлагается выполнять следующим образом.

Без учета образования самоотмостки полная глубина размыва на вертикали определяется согласно [1]:

$$h_{\text{н}} = (q_{\text{нр}} / 2\omega)^{5/6}, \quad (26)$$

где $q_{\text{нр}}$ – удельный расход воды на вертикали в условиях разработки карьера, $\text{м}^2/\text{с}$; ω – гидравлическая крупность наиболее крупных частиц, находящихся в составе влекомых, $\text{м}/\text{с}$.

В свою очередь $q_{\text{нр}} = h_{\text{нр}} v_{\text{нр}}$, тогда:

$$h_{\text{н}} = (h_{\text{нр}} v_{\text{нр}} / 2\omega)^{5/6}, \quad (27)$$

где $h_{\text{нр}}$, $v_{\text{нр}}$ – глубина и средняя скорость на вертикали в условиях разработки карьера, м , $\text{м}/\text{с}$.

Мощность размытого слоя грунта (донных отложений), или понижение отметки дна:

$$h_{\text{д}} = h_{\text{н}} - h_{\text{нр}}. \quad (28)$$

При отсутствии данных гранулометрического состава влекомых наносов средний диаметр наиболее крупных частиц в их составе можно с небольшой погрешностью принять равным или чуть меньше предельного диаметра неподвижных фракций согласно (4). Для этого $d_{\text{пред}}$ определяются w , $h_{\text{н}}$ и $h_{\text{д}}$.

Далее, учитывая, что $h_{\text{д}}$ в конце зоны размыва равна 0 и, допуская, что процесс насыщения потока наносами протекает линейно на протяжении всего участка, то к моменту стабилизации русла справедлива зависимость:

$$W_{\text{д}} = (\bar{h}_{\text{д}} / 2) \bar{B}_{\text{р}} L_{\text{р}}, \quad (29)$$

где $W_{\text{д}}$ – предельный объем грунта, смытого в русле ниже карьера, м^3 ; $\bar{B}_{\text{р}}$ – средняя по ширине зоны раз-

мыва $B_{\text{р}}$ мощность размытого слоя донных отложений, м ; L – длина зоны размыва, м .

С другой стороны:

$$W_{\text{д}} = \Delta R_{\text{т}} T. \quad (30)$$

Решая совместно (29) и (30), получим:

$$\Delta R_{\text{т}} \cdot T = (\bar{h}_{\text{д}} / 2) \bar{B}_{\text{р}} L_{\text{р}}, \quad (31)$$

где T – время стабилизации русла, с .

Более строгое уравнение (31) следует записать так:

$$\Delta R_{\text{т}} T = (\bar{h}_{\text{дт}} / 2) \bar{B}_{\text{р}} L_{\text{р}}, \quad (32)$$

где $\bar{h}_{\text{дт}}$ – фактическая средняя мощность размытого слоя донных отложений, которая может принимать значения в диапазоне от 0 до $h_{\text{нк}}$ ($h_{\text{нк}}$ – глубина карьера у низового откоса).

При расчетной $h_{\text{д}}$ меньше $h_{\text{нк}}$ могут наблюдаться два варианта динамики заиления карьера и размыва дна ниже него.

1. $\bar{h}_{\text{д}}$ достигнута раньше, чем нижняя граница призмы заиления сравняется с отметкой дна на низовом откосе карьера, которая соответствует глубине $h_{\text{нк}}$. В этом случае после достижения $\bar{h}_{\text{д}}$ и до указанного момента $W_{\text{д}}$ будет нарастать за счет увеличения $L_{\text{р}}$.

2. $\bar{h}_{\text{д}}$ не достигнута, а граница призмы заиления сравнялась с отметкой глубины $h_{\text{нт}}$, которая меньше расчетной $h_{\text{д}}$. В этом случае $W_{\text{д}}$ определится временем наступления этого момента и $L_{\text{р}}$ будет меньше предельно возможной.

При расчетной $\bar{h}_{\text{д}} \geq h_{\text{нк}}$ фактическая $h_{\text{дт}}$ будет либо меньше, либо равной $h_{\text{нк}}$. Здесь $W_{\text{д}}$ определяется как и в предыдущих вариантах.

Таким образом, строгое решение уравнения (32) возможно только в том случае, когда известна функция $h_{\text{дт}} = f(T)$. Современный уровень теоретических разработок в этой области не дает ответа на поставленную проблему. Поэтому она может быть решена путем натурных наблюдений за системой “русло-карьер”.

Пока предполагается следующий упрощенный подход.

При расчетной $h_{\text{д}} \geq 0,5h_{\text{нк}}$ принимать $h_{\text{дт}} = 0,5h_{\text{нк}}$; при расчетной $h_{\text{д}} < 0,5h_{\text{нк}}$ принимать $h_{\text{дт}} = \bar{h}_{\text{д}}$. Тогда:

$$W_{\text{д}} = W_{\text{к}} = \bar{h}_{\text{к}} \bar{B}_{\text{к}} L_{\text{к}}, \quad (33)$$

где $W_{\text{к}}$ – объем карьера при его линейных размерах; $B_{\text{к}}$ – средняя ширина; $L_{\text{к}}$ – длина;

$\bar{h}_{\text{к}}$ – средняя глубина, определяемая от линии, соединяющий бровку верхового откоса (с учетом размыва дна на ней) и бровку низового откоса (с учетом размыва дна на глубину $0,5h_{\text{нк}}$ или глубину $h_{\text{д}}$).

При параллельном решении перечисленных задач возникает еще одна сложность, связанная с неопределенностью изменения глубины размыва h_n во времени. Дело в том, что каждой фазе водности может соответствовать своя h_n . Если соотношение продолжительностей этих фаз за расчетный период будет таким же, как за предшествующий многолетний, то с физической точки зрения h_n должна нарастать по закону близкому к экспоненциальному, все медленнее приближаясь к своему предельному значению. Равенство объемов размыва за равные промежутки времени (имеются в виду промежутки, включающие равное число всех фаз водности) будет достигаться за счет увеличения длины зоны размыва в соответствии с тем же экспоненциальным законом. В реальных природных условиях чередование маловодных и многоводных лет и циклов лет, а также неоднозначность предшествующего и ожидаемого водных режимов естественно нарушают эту закономерность, особенно при небольших периодах стабилизации русла.

В идеальных условиях графически процесс нарастания призмы размыва дна ниже карьера проиллюстрирован на рис. 1, откуда очевидно:

$$h_{дт} / h_{дн} = L_{рн} / L_{рн} \quad (34)$$

С другой стороны из (32):

$$L_{рн} h_{дт} / 2 = \Delta R_1 T / B_p \quad (35)$$

$$L_{рн} h_{дн} / 2 = \Delta R_1 T_i / B_p \quad (36)$$

откуда:

$$L_{рн} / L_{рн} = (\Delta R_1 h_{дт} T) / (\Delta R_1 h_{дн} T_i) \quad (37)$$

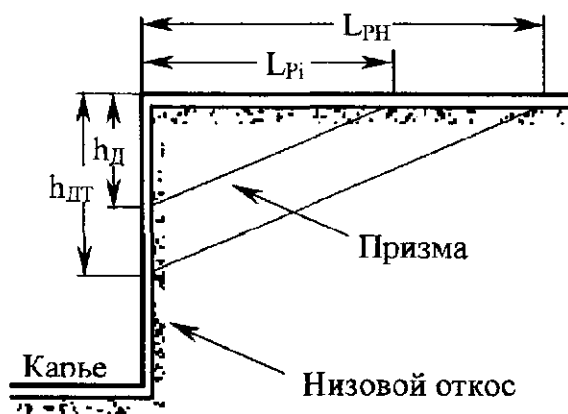


Рис. 1. Графическая схема динамики развития призмы размыва дна ниже низового откоса карьера

Решая совместно (34) и (37) и перейдя к объемам твердого стока, получим:

$$h_{дт} = h_{дн} (W_{дт} / W_{дн})^{1/2} \quad (38)$$

и

$$L_{рн} = L_{рн} (W_{дт} / W_{дн})^{1/2} \quad (39)$$

Таким образом, зная предельные значения $h_{дт}$ и $L_{рн}$, можно, используя (38) и (39), приближенно оценить их промежуточные значения на любой заданный срок. Чем более продолжительным будет расчетный интервал, тем, по-видимому, будет меньше ошибка в этой оценке.

6. Заилнение и занесение карьера. Для части створа на гребне ближайшего вышележащего переката, через которую проходит расход воды равный наибольшему для данной водности Q_k , определяется расход влекомых наносов $G_{дк}$, либо по известным уже формулам, либо, исходя из соображения пропорциональности твердого стока жидкому:

$$G_{дк} = G_d (Q_k / Q), \quad (40)$$

где G_d – расход донных наносов по всему расчетному сечению, м³/с.

Этот сток донных наносов и будет перехвачен карьером. Объем его для данной фазы водности составит:

$$W_{дк} = 8,64 \cdot 10^4 T G_{дк} \quad (41)$$

Соответствующий расход взвешенных наносов, попадающих в зону расположения карьера, определится также, исходя из допущения его распределения по сечению потока пропорционально распределению расходов воды:

$$R_{вк} = R_v (Q_k / Q), \quad (42)$$

где R_v – расход взвешенных наносов по всему сечению, м³/с.

Объем стока этих наносов:

$$W_{вк} = 8,64 \cdot 10^4 T R_{вк} \quad (43)$$

По известным $W_{вк}$ и $W_{дк}$ определяется объем заилнения и занесения карьера W_z . Подробно этот этап изложен в нормативном документе [1].

Литература

1. Рекомендации по прогнозу деформаций речных русел на участках размещения карьеров и в нижних бьефах гидроузлов. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 128 с.
2. Богомолов А.И., Михайлов К.А. Гидравлика. М.: Стройиздат, 1972. 648 с.
3. Гончаров В.Н. Динамика русловых потоков. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 373 с.
4. Барышников Н.Б., Попов И.В. Динамика русловых потоков и русловые процессы. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 454 с.
5. Шапов Г.И. Речные наносы. Л.: Гидрометеиздат, 1954. 347 с.
6. Беркович К.М., Рулева С.Н., Гопченко Е.Д., Качанов Я.И., Наумов Г.Г., Сергутин В.Е. Влияние карьеров строительных материалов на уровень и русловый режим рек. Эрозионные и русловые процессы (материалы координационных совещаний ВУЗов 1986–1990 гг.). Лудз, 1991. С. 116–127.