

4. РАСЧЕТ ДВИЖЕНИЯ ВЛЕКОМЫХ НАНОСОВ И ОБЩЕГО ТРАНСПОРТА НАНОСОВ

4.1. Вычисление элементов донных гряд

При решении многих практических вопросов, связанных с проектированием гидротехнических сооружений в речных руслах, проектированием и эксплуатацией дноуглубительных прорезей, оценкой судоходных условий на реках и т. д., необходимо знание элементов (параметров) донных гряд, особенно их высоты и длины. Возникает также необходимость нахождения расхода влекомых наносов. Выше уже указывалось, что одним из способов получения расхода влекомых наносов является определение его по параметрам донных гряд: по их высоте h_r , длине l_r , скорости перемещения c_r или периоду τ_r . При этом обращалось внимание на то, что расход влекомых наносов и расход наносов, перемещаемых в виде гряд, не идентичны, они лишь приближенно могут быть приняты взаимно равными.

Если элементарный расход наносов, движущихся в виде гряд, обозначить через p_r кг/(с·м), то полный расход донно-грядового перемещения наносов будет

$$P_r = \int_0^{B_*} p_r(z) dz, \quad (4.1)$$

где B_* — ширина той части русла, в пределах которой происходит движение гряд; z — горизонтальная ось координат, направленная по нормали к динамической оси потока.

При использовании некоторых средних значений параметров гряд для всей полосы B_* будем иметь простое соотношение

$$P_r = p_{r, \text{ср}} B_*, \quad (4.2)$$

в котором $p_{r, \text{ср}}$ — среднее по ширине B_* значение элементарного расхода наносов.

При отсутствии данных непосредственных измерений гряд их параметры могут быть приближенно вычислены по расчетным зависимостям. В настоящее время таких зависимостей известно довольно много. Некоторые из них приведены выше, в гл. 2, посвященной теории движения наносов. Ниже будут помещены лишь те зависимости, которые имеют применение в практике расчетов или же могут быть рекомендованы для этого.

Так, в 1948 г. В. Ф. Пушкарев [129], изучая грядовое движение в лотке, предложил формулы для определения h_r и c_r . Первая из них имеет вид

$$h_r = 0,00445 \frac{v_{cp}^2}{gd_{50}} H + 0,049H, \quad (4.3)$$

где v_{cp} — средняя скорость потока; g — ускорение свободного падения; H — глубина потока. Величина диаметра частицы донных наносов d_{50} определяется по гранулометрической кривой как диаметр 50%-ной обеспеченности. Линейные величины здесь измеряются в метрах, а скорость — в м/с; та же размерность использована и во всех приводимых ниже формулах.

Предложенная формула дает хорошие результаты в основном для условий лабораторных лотков. Для рек в большинстве случаев получаются очень большие расхождения с данными измерений. В частности, при весьма больших скоростях течения или при малых значениях d_{50} высота гряд получается больше глубины потока. Кроме того, не выполняются предельные условия, а именно при скорости течения $v = 0$ формула дает $h_r = 0,049H$, тогда как должно было бы получиться $h_r = 0$. Удовлетворительную сходимость с натурой рассматриваемая формула дает для рек с крупным составом донных отложений (например, р. Полометь). Заметим, что автор формулы работал в лаборатории с наносами примерно такой крупности, как на р. Полометь.

Остановимся на формуле В. Ф. Пушкарева для скорости перемещения гряд. Формула имеет вид

$$c_r = 0,0188 \frac{v_{cp}^3}{gH} - 0,0292 \frac{gd_{50}}{v_{cp}}. \quad (4.4)$$

Проверка показала, что эта формула дает завышенные по сравнению с натурой результаты; в ряде случаев получается многократное превышение.

В 1960 г. В. С. Кнороз [70] получил формулы для высоты, длины и скорости перемещения гряд. Формула Кнороза для высоты гряды имеет вид

$$h_r = 3,5 \frac{\left(\frac{v_{cp} - v_0}{v_{cp}}\right)^{2/3}}{\lg \frac{R}{d_{50}} + 6} \cdot R; \quad (4.5)$$

здесь R — гидравлический радиус потока; v_0 — неразмывающая скорость; по Кнорозу, — это средняя скорость потока, отвечающая условиям предельного равновесия частиц, слагающих русло. Для v_0 он дает зависимость

$$v_0 = 1,3 \sqrt{gd} \lg \frac{14,7R}{d^{0,75}}. \quad (4.6)$$

Формула пригодна для однородных по крупности несвязных наносов. Для неоднородных наносов Кнороз дает графическую зависимость $v_0 = f(H, d)$, которая позднее была уточнена Н. С. Знаменской [47]. Для этой цели она использовала данные Кнороза, Гидропроекта и своих экспериментальных исследований.

Нами установлено, что формулы Кнороза для элементов гряд дают удовлетворительный результат при вычислении содержащейся в них величины v_0 по формуле Г. И. Шамова, которая имеет вид

$$v_0 = 6,0d^{1/3}H^{1/6}. \quad (4.7)$$

Предельные скорости, вычисленные по формуле (4.7), соответствуют массовому движению частиц и практически совпадают со скоростями, полученными по графической зависимости Знаменской. Последние разработки В. В. Романовского [141] подтверждают целесообразность использования формулы Шамова при расчете параметров донных гряд.

Формула В. С. Кнороза для высот гряд, как показала проверка, дает в общем удовлетворительный результат. Несколько заниженные значения h_r получаются для рек с крупным составом донных отложений ($d_{50} > 1$ мм). Для рек с меньшей крупностью отложений формула дает некоторое завышение высот гряд.

Для определения длины гряды Кнороз дает следующую формулу:

$$l_r = \frac{\left(1g \frac{R}{d_{50}} + 6\right) h_r}{1,2} \left(\frac{v_{cp}}{v_0}\right)^{5/3}. \quad (4.8)$$

Длины гряд, рассчитанные по этой формуле, хорошо сходятся с натурными данными для больших рек; для малых же рек по формуле получается некоторое завышение l_r . Кнороз осуществил проверку своих формул на экспериментальных материалах В. Ф. Пушкарева, при этом он пришел к выводу, что формулы применимы при значениях v_{cp}/v_0 , не превышающих 2,5—2,7. Он считает, что при больших величинах v_{cp}/v_0 частицы донных наносов переходят во взвешенное состояние и при этом исчезает грядовая структура дна.

Как уже указывалось (гл. 2), интересное обобщение материала по донным грядам и их типизации выполнено Н. С. Знаменской [46], которая построила серию графиков, предназначенных для практического определения параметров гряд. Эти графики помещены в гл. 2 монографии. Графическую зависимость Знаменской для высоты гряд в общем виде можно представить как следующую функцию:

$$h_r = H \cdot f\left(1g \frac{H}{d_{50}}; \frac{v_{cp}}{v_0}\right). \quad (4.9)$$

Использование графиков Знаменской для определения h_r обнаруживает сравнительно близкую сходимость с натурой.

Графическая зависимость Знаменской для длины гряд l_r может быть изображена в виде функции

$$l_r = \frac{h_r}{f \left(Fr^* \frac{v_{cp}}{u_{50}} \right)}, \quad (4.10)$$

где Fr^* — корень квадратный из числа Фруда Fr , т. е. $Fr^* = \sqrt{Fr}$; u_{50} — гидравлическая крупность частиц, отвечающая их диаметру 50%-ной обеспеченности на интегральном графике granulометрической кривой.

Зависимость (4.10) дает заниженные значения l_r . Введение масштабного коэффициента, предложенного в последних разработках Знаменской [47], несколько улучшает результаты расчетов l_r для малых рек.

Большой интерес представляют собой исследования, выполненные Ю. М. Корчохой [77] на р. Полометь. Собранный им на протяжении нескольких лет натуральный материал позволил проверить некоторые расчетные зависимости элементов гряд и получить новые формулы для высоты и скорости перемещения гряд. Выполненная в ГГИ проверка формулы Корчохи на натурном материале по другим объектам показала, что для c_r она дает хорошую сходимость с измеренными величинами. Эта формула имеет вид

$$c_r = 0,0114 v_{cp} \sqrt{\frac{d_{50}}{h_r}} - 0,00018. \quad (4.11)$$

Практически приемлемыми оказались расчетные зависимости высоты и скорости движения гряд, предложенные в 1971 г. Г. В. Железняковым и В. К. Дебольским [42]. Их зависимости имеют вид:

$$h_r = 1,25H \left(\frac{v_{cp}}{v_0} \cdot \frac{d_{50}}{H} \cdot \frac{u_{50}}{\sqrt{gH}} \right)^{0,2}, \quad (4.12)$$

$$c_r = 0,001 \sqrt{gd} \left(\frac{v_{cp}}{v_0} \cdot \frac{H}{h_r} \cdot \sqrt{\frac{u_{50}}{v_0}} \right)^2. \quad (4.13)$$

Обозначения и размерности величин те же, что и в предыдущих зависимостях.

Для вычисления длин гряд наиболее удачной оказалась формула А. В. Караушева [50], предложенная им в 1974 г.,

$$l_r = 0,44H \sqrt{N}. \quad (4.14)$$

Она может быть использована для рек различного размера и лабораторных лотков. В приведенной формуле N — характеристическое число, определяемое равенством

$$N = \frac{MC}{g}, \quad (4.15)$$

где C — коэффициент Шези; M — параметр, зависящий от C .

На основании детального рассмотрения и проверки методов расчета и формул параметров донных гряд оказалось возможным дать некоторые рекомендации по их практическому применению. Для проверки формул использованы данные натурального изучения гряд, полученные Н. М. Капитоновым, Ю. М. Корчохой, Н. М. Кулеминой, Б. Ф. Снищенко и др. (табл. 23). Из табл. 23 видно, что при проверке использованы данные по таким крупным рекам, как Волга, Днепр, Дон и т. д. Наряду с этим проверка выполнялась и по материалам изучения гряд на малых реках Хия (ширина 8 м) и Полометь (ширина 30 м). Общий диапазон изменения глубин от 0,2 до 10 м, а скорости течения — от 0,4 до 1,7 м/с. Гранулометрический состав донных отложений был весьма разнообразный; d_{50} колеблется от 0,20 до 4 мм. Для вычисления каждого параметра гряд (l_r , h_r , c_r) использовано от 80 до 100 натуральных измерений.

В результате проверки различных формул установлено, что для расчета высоты гряд в практических целях могут использоваться формулы Кнороза, Железнякова—Дебольского и метод Знаменской, по которому получается несколько лучшая сходимость с натурой. При вычислении длин гряд в потоках разного размера целесообразно применять формулу Караушева. Зависимость Кнороза целесообразно использовать для крупных рек, а метод Знаменской — для небольших рек. Для определения скорости перемещения гряд следует пользоваться формулой Корчохы, так как она дает хорошую сходимость для рек разного размера. Могут применяться также формулы Железнякова—Дебольского и Пушкарева.

В табл. 23 приведены данные измерения и вычисления параметров донных гряд по тем формулам, которые обнаружили лучшую сходимость с измеренными величинами. Вычисления велись также по многим другим формулам (В. Н. Гончарова, Б. А. Шуляка, А. Ф. Кудряшова, Д. Кеннеди, Т. Хаяши и др.). Данные расчетов по этим формулам в таблицу не помещены, поскольку отклонения от природы оказались весьма значительными. Следует заметить, что ряд предложенных различными исследователями методов вычисления параметров гряд не доведен до возможности практического использования. Сюда относятся теоретические методы Д. Кеннеди, М. Жиль и др. Упрощенные варианты методов указанных авторов дают явно неудовлетворительный результат.

Таблица 23

Измеренные и вычисленные параметры донных гряд (среденные по участкам рек и периодам измерений)

Река, автор исследования, год	Число измерений	Измеренные параметры гряд в натуре							Вычисленные параметры гряд (по формулам)							
		H м	v м/с	d ₅₀ мм	h _T м	l _T м	c _T м/сут	Знаменской	Кнорова	Железнякова-Лебольшкого	Караушева	Кнорова	Знаменской	Корчохи	Железнякова-Лебольшкого	Пушкарева
Днепр, Н. М. Кулемина, 1968	10	3,0-7,5	0,87	0,42	0,59	27	5,5	0,33	0,82	0,37	31	32	11,6	8,1	6,3	11,5
		7,5-10	0,98	0,48	0,91	35	4,0	0,60	1,30	0,58	56	54	17,8	6,7	9,4	6,7
Волга, Б. Ф. Сниценко, 1966	10	4,6	0,86	0,22	0,32	23	2,6	0,44	0,91	0,29	25	11	7,8	8,3	17	17
Дон, Н. М. Капитонов, 1971-73	18	3,8	0,81	0,39	0,41	23	8,0	0,31	0,65	0,32	23	24	7,0	9,5	8,7	12
Вычегда, Н. М. Кулемина, 1969	12	5,1	1,10	0,47	0,36	7,1	3,2	0,49	1,07	0,42	31	14	7,2	23	34	36
Полометь, Ю. М. Корчоха, 1968	17	0,55-1,10	0,95	1,16	0,34	4,3	41	0,09	0,18	0,16	3,8	18	2,9	39	8,9	140
		1,10-2,40	1,32	2,09	0,53	7,2	79	0,20	0,35	0,29	7,2	21	3,5	70	31	190
Полометь, Б. Ф. Сниценко, 1966	5	0,22	0,49	0,56	0,07	2,0	24	0,02	0,03	0,05	0,9	6,0	0,8	54	71	67
Хия, Синохара и Цзубаки, 1962	15	0,37-0,66	0,78	1,30	0,08	1,7	91	0,03	0,08	0,12	1,9	5,5	0,9	82	47	120
		8,66-1,03	0,85	1,21	0,19	2,4	75	0,06	0,14	0,16	3,2	12	1,4	56	23	88

4.2. Методы расчета расхода влекомых наносов

В практике гидрологических расчетов для вычисления расхода влекомых наносов широко используются формулы, связывающие количество переносимых потоком наносов с гранулометрическим составом донных отложений и гидравлическими элементами потока. Обычно эти формулы дают удовлетворительную сходимость результатов вычислений с фактическими данными лишь в определенных диапазонах изменений гидравлических характеристик потока и русла. Поэтому при выборе расчетной зависимости во всех случаях, когда имеются данные измерений, целесообразно производить проверку формул по фактическим материалам и в случае необходимости вводить корректирующий множитель α_k , находимый из соотношения

$$\alpha_k = \frac{P_{\text{вл. изм}}}{P_{\text{вл}}}, \quad (4.16)$$

где $P_{\text{вл. изм}}$ и $P_{\text{вл}}$ — соответственно измеренное и вычисленное значения расхода влекомых наносов.

При отсутствии фактических данных о расходах влекомых наносов рассматриваемой реки для контроля можно использовать материалы по реке-аналогу с близкими значениями крупности донных наносов, глубин, уклонов и скоростей течения.

В связи с неравномерным распределением скоростей течения и крупности донных наносов по ширине потока движение влекомых наносов часто не охватывает всего сечения потока, а носит так называемый жильный характер. Поэтому расчет ведется обычно по вертикалям; вычисляются элементарные расходы влекомых наносов $p_{\text{вл}}$ в кг/(с·м) (на 1 пог. м ширины потока). Полный расход влекомых наносов $P_{\text{вл}}$ по всей ширине русла вычисляется затем обычным в гидрометрии методом с учетом расстояний между вертикалями. При отсутствии данных о распределении скоростей v и крупности d донных наносов по ширине русла расчет расхода влекомых наносов выполняется приближенно по средним для сечения значениям v и d с последующим умножением среднего значения $p_{\text{вл}}$ на B .

Сопоставительные расчеты по разным формулам и проверка на натурном материале показали, что для вычисления расходов влекомых наносов равнинных рек с песчаным и песчано-гравелистым дном может применяться формула Г. И. Шамова

$$p_{\text{вл}} = k \left(\frac{v_{\text{ср}}}{v_{\text{отл}}} \right)^3 (v_{\text{ср}} - v_{\text{отл}}) \left(\frac{d_{\text{ср}}}{H} \right)^{1/4}. \quad (4.17)$$

В этой формуле $p_{\text{вл}}$ — элементарный расход влекомых наносов, кг/(с·м); k — коэффициент, учитывающий состав донных отложений; $v_{\text{ср}}$ — средняя скорость на вертикали, м/с; $v_{\text{отл}}$ — средняя скорость, при которой прекращается движение наносов данной крупности, м/с; $d_{\text{ср}}$ — средний диаметр подвижных фракций

донных наносов в пробе, взятой на данной вертикали, метры;
 H — глубина на вертикали, метры.

Для расчета по формуле (4.17) необходимо установить верхний предел диаметра наносов, которые могут перемещаться потоком при заданных скоростях и глубинах. Предельный диаметр подвижной части наносов определяется по формуле Шамова для начальной скорости движения наносов (см. п. 2.3)

$$d_{\text{пред. в}} = \frac{0,012v_{\text{ср}}^3}{\sqrt{H}}. \quad (4.18)$$

Неподвижные фракции наносов, диаметр которых превышает полученную величину $d_{\text{пред. в}}$, при дальнейшем расчете не учитываются. После исключения из состава донных наносов неподвижных фракций производится пересчет гранулометрической кривой и определяется средний диаметр подвижных фракций донных отложений по формуле

$$d_{\text{ср}} = 0,01 \sum_{i=1}^m \alpha_i d_i, \quad (4.19)$$

где α_i и d_i — соответственно процентное содержание и средний диаметр некоторой (i -той) фракции наносов; m — число подвижных фракций.

При расчете расхода песчаных фракций при однородном составе донных наносов ($0,1 \text{ мм} \leq d \leq 2 \text{ мм}$) коэффициент k в формуле (4.17) зависит только от средней крупности частиц и находится из соотношения

$$k = 0,95 \sqrt{d_{\text{ср}}}. \quad (4.20)$$

При песчано-гравелистом русле вместо k вводится коэффициент k' , определяемый равенством

$$k' = a_0 \sqrt[3]{d_{\text{к. п.}}}, \quad (4.21)$$

которое дает увеличение расхода влекаемых наносов при неоднородном составе донных отложений. В этой зависимости $d_{\text{к. п.}}$ — средний диаметр (метры) наиболее крупной фракции из числа подвижных, составляющей не менее 10% состава подвижной части донных наносов; a_0 — опытный коэффициент, зависящий от процентного содержания крупной подвижной фракции, он определяется по табл. 24. В том случае, если самая крупная фракция

Таблица 24

Значения коэффициента a_0 в формуле Г. И. Шамова

Содержание наиболее крупных фракций, %	40—70	20—40, 70—80	10—20 80—90
	a_0	3	2,5

составляет менее 10%, в качестве $d_{\text{кп}}$ принимается средний взвешенный диаметр самой крупной и следующей за ней более мелкой фракций (имеется в виду разделение наносов на фракции по шкале Гидрометслужбы).

Скорость $v_{\text{отл}}$, отвечающая прекращению движения наносов крупностью $d_{\text{ср}}$, по данным Шамова пропорциональна начальной скорости движения частиц $v_{\text{нач}}$ и вычисляется по следующей формуле:

$$v_{\text{отл}} = 3,7 d_{\text{ср}}^{1/2} H^{1/6}. \quad (4.22)$$

Нижним пределом крупности наносов, при котором применима формула Шамова, является $d_{\text{ср}} \geq 0,1$ мм; верхний предел автором не оговорен. Расчеты, выполненные в ГГИ, показали удовлетворительную сходимость расчетных и натуральных расходов влекомых наносов при $d_{\text{ср}} \leq 50$ мм.

Широкое распространение для расчета расходов песчано-гравелистых наносов получила следующая формула В. Н. Гончарова [27]:

$$p_{\text{вл}} = 1,2 (1 + \varphi) v_{\text{нпл}} d_{\text{ср}} \left(\frac{v_{\text{ср}}}{v_{\text{нпл}}} \right)^{4,33}. \quad (4.23)$$

Размерности величин в этой формуле те же, что и в формуле Шамова. Значения параметра φ , учитывающего отличия режима обтекания мелких частиц ($d < 1,5$ мм) от режима обтекания крупных частиц, приведены в табл. 25.

Таблица 25

Значение параметра φ в формуле В. Н. Гончарова

$d_{\text{ср}}$ мм . . .	0,06	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	$\geq 1,5$
φ	15,8	7,3	3,2	2,1	1,7	1,4	1,25	1,15	1,0

В формулу (4.23) входит предельная неподвижная скорость $v_{\text{нпл}}$ м/с, которую следует определять по формуле Гончарова

$$v_{\text{нпл}} = 1g \frac{8,8H}{d_{95\%}} \sqrt{\frac{2g(\rho_s - \rho)}{3,5\rho} d_{\text{ср}}}, \quad (4.24)$$

где $d_{95\%}$ — диаметр крупных частиц донных отложений в метрах, доля которых от общего количества составляет 5%; ρ_s — плотность частиц наносов (для речных наносов обычного состава с достаточным приближением можно принять $\rho_s = 2700$ кг/м³); ρ — плотность воды (1000 кг/м³).

Входящая в формулы (4.23) и (4.24) величина $d_{\text{ср}}$ — средний диаметр перемещаемых потоком наносов — определяется по формуле (4.19) на основании данных о гранулометрическом составе донных наносов после исключения из него крупных неподвижных фракций и наиболее мелких наносов. Наибольший диаметр передвигающихся наносов $d_{\text{пред. в}}$ определяется при этом из

условия равенства средней (по вертикали или по живому сечению) скорости течения $v_{\text{ср}}$ и так называемой скорости срыва $v_c = 1,4v_{\text{нпд}}$, отсюда

$$d_{\text{пред. в}} = \frac{v_{\text{ср}}^2}{\frac{2g(\rho_s - \rho)}{1,75\rho} \left(\lg \frac{8,8H}{d_{95\%}}\right)^2} = \frac{v_{\text{ср}}^2}{19 \left(\lg \frac{8,8H}{d_{95\%}}\right)^2}. \quad (4.25)$$

Если измерения скоростей течения не производились, то значение $v_{\text{ср}}$ в формуле (4.25) следует принять по формуле Гончарова

$$v_{\text{ср}} = 4 \left(\lg \frac{8,8H}{d_{95\%}}\right) \sqrt{2gHI}; \quad (4.26)$$

тогда предельный диаметр перемещаемых фракций определится соотношением

$$d_{\text{пред. в}} \leq 17HI. \quad (4.27)$$

Диаметр наиболее мелких фракций $d_{\text{пред. н}}$, не учитываемых формулой (4.23), рекомендуется вычислять на основании следующего соотношения:

$$d_{\text{пред. н}} \leq \frac{d_{\text{ср}}}{3,12} \left(\frac{d_{\text{ср}}}{H}\right)^{1/6}. \quad (4.28)$$

Исключение мелких фракций производится обычно в два приема, поскольку величина $d_{\text{пред. н}}$ зависит от искомого значения $d_{\text{ср}}$. В первом приближении вычисляют величину $d'_{\text{пред. н}}$ по средневзвешенному диаметру $d_{\text{ср}}$, включающему все частицы $d \leq d_{\text{пред. в}}$, в том числе и самые мелкие; во втором приближении величину $d_{\text{пред. н}}$ вычисляют по среднему взвешенному диаметру, полученному после отсека фракций мельче $d'_{\text{пред. н}}$.

Окончательно значение $d_{\text{ср}}$ вычисляют по формуле (4.19) после исключения из состава донных отложений частиц $\leq d_{\text{пред. н}}$ и $\geq d_{\text{пред. в}}$. Формулу (4.23) по рекомендации ее автора следует применять для наносов крупностью $0,1 \text{ мм} \leq d \leq 10 \text{ мм}$.

Для горных рек с гравелисто-галечным руслом применяется формула И. В. Егиазарова [40]. По его мнению, она дает суммарный расход влекомых и части взвешенных (так называемых руслоформирующих) наносов. В преобразованном виде формула имеет вид

$$p_{\text{свл}} = 24q \sqrt{I} \left(\frac{RI}{1,6f_0d} - 1\right), \quad (4.29)$$

где $p_{\text{свл}}$ — расход влекомых и руслоформирующих взвешенных наносов, кг/(м·с). Егиазаров выражает $p_{\text{свл}}$ весом наносов под водой в т/(м·с), поэтому числовой коэффициент у него равен 0,015 [в формуле (4.29), где $p_{\text{свл}}$ выражен весом наносов в воздухе, он равен 24 кг/м³]; q — элементарный расход воды м²/с; R — гидравлический радиус потока, метры; d — расчетный диаметр подвижных наносов, метры. Егиазаров вводит параметр

f_0 , названный им коэффициентом сопротивления подвижного русла и определяемый по формуле

$$f_0 = 0,1 \left(1g \frac{d}{\bar{d}_{\text{ср}}} \right)^{-2}. \quad (4.30)$$

Здесь $\bar{d}_{\text{ср}}$ — среднее арифметическое из значений $d_{\text{ср}}$, полученных по двум гранулометрическим кривым: одна из них характеризует полный состав донных отложений, а вторая — лишь ту часть наносов, которые находятся в движении при заданном расходе воды; d — расчетный диаметр подвижной части наносов.

Верхний предел подвижных фракций определяется по критерию подвижности, записываемому, согласно Егиазарову, для условий трогания частицы в виде

$$d_{\text{макс}} = \frac{RI}{1,6f_0}. \quad (4.31)$$

Коэффициент сопротивления f_0 подбирается методом последовательных приближений. Определив $d'_{\text{макс}}$ по произвольной величине f_0 (для ориентировки укажем, что при однородном составе наносов $f_0 = 0,06$), отсекаем на гранулометрической кривой неподвижные фракции ($\geq d'_{\text{макс}}$) и пересчитываем гранулометрическую кривую пропорционально содержанию подвижных фракций в составе донных отложений. Пользуясь полученной гранулометрической кривой подвижной части наносов, определяем значение f_0 по формуле (4.30). Затем повторяем весь расчет с использованием вычисленного значения f_0 .

Расчет по формуле Егиазарова (и соответственно подбор величины f_0) можно вести пофракционно, полагая $d = d_i$, а также для смеси в целом, принимая $d = d_{50}$, где d_{50} — медианная крупность частиц по гранулометрической кривой подвижных наносов.

Формула Егиазарова дает близкие к натурным величины при условии массового срыва потоком естественной отмытки русла, в обычных же условиях результаты расчета оказываются завышенными.

В последнее время для расчета расхода влекомых наносов получила распространение формула К. И. Россинского [146]. Для однородного состава донных отложений (например, песчаного) формула имеет вид

$$p_{\text{вл}} = 0,20 \rho_s d_{\text{ср}} k v_{\text{ср}} \left[\eta - \frac{v_{0\text{л}}}{k v_{\text{ср}}} (\eta - \eta_{\text{в}}) + \right. \\ \left. + 0,40 \frac{\sigma_x}{v_{\text{л}}} \exp \frac{-\left(\frac{v_{0\text{л}}}{k v_{\text{ср}}} - 1 \right)^2}{2 \left(\frac{\sigma_x}{v_{\text{л}}} \right)^2} \right]. \quad (4.32)$$

В этой формуле $\rho_{вл}$ — удельный расход влекомых наносов, кг/(с·м); ρ_s — плотность наносов, кг/м³; $d_{ср}$ — средний диаметр донных наносов, метры; $v_{ср}$ — средняя скорость потока на вертикали (или по сечению), м/с; η — коэффициент сплошности движения всех влекомых наносов (перекатывающихся и сальтирующих); $\eta_{в}$ — то же для сальтирующих наносов; $\bar{v}_д$ — осредненная донная скорость потока, м/с; $v_{0д}$ — мгновенная донная скорость, сдвигающая частицы, м/с; σ_x — среднее квадратическое значение продольных пульсаций скорости в придонной области; k — отношение донной скорости к средней скорости потока.

При большой неоднородности донных отложений расчет ведется пофракционно и результаты суммируются. Таким образом имеем

$$\rho_{вл} = 0,20 \rho_s v_{ср} \sum_{i=1}^m \frac{\alpha_i}{100} d_i k_i \left[\eta_i - \frac{v_{0ди}}{k_i v_{ср}} (\eta_i - \eta_{ви}) + \right. \\ \left. + 0,40 \frac{\sigma_x}{\bar{v}_д} \exp \frac{-\left(\frac{v_{0ди}}{k_i v_{ср}} - 1\right)^2}{2 \left(\frac{\sigma_x}{\bar{v}_д}\right)^2} \right]. \quad (4.33)$$

Величины η и $\eta_{в}$ определяются по графику (рис. 31), при этом η находится по аргументу x_1 , а $\eta_{в}$ — по аргументу x_2 . Частные значения η_i и $\eta_{ви}$ определяются по этому же графику с использованием частных значений k_i , $v_{0ди}$ и $v_{двi}$. Аргументы вычисляются соответственно по следующим формулам:

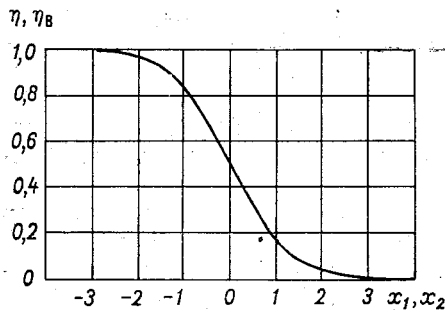


Рис. 31. График функции $\eta(x_1)$, $\eta_{в}(x_2)$.

$$x_1 = \frac{\frac{v_{0д}}{k v_{ср}} - 1}{\frac{\sigma_x}{\bar{v}_д}}; \quad (4.34)$$

$$x_2 = \frac{\frac{v_{дв}}{k v_{ср}} - 1}{\frac{\sigma_x}{\bar{v}_д}}; \quad (4.35)$$

остальные параметры формул (4.32) — (4.35) вычисляются по выражениям, приводимым ниже, и графикам; $v_{дв}$ — обезвешивающая донная скорость;

$$\left. \begin{aligned} v_{0д} &= 7,7 \sqrt{d_{ср}}, \\ v_{0ди} &= 7,7b \sqrt{d_i}, \end{aligned} \right\} \quad (4.36)$$

где b определяется по графику (рис. 32);

$$\left. \begin{aligned} k &= \frac{1,25}{\lg 6,15 \frac{H_{\text{ср}}}{0,7d_{\text{ср}}}}; \\ k_i &= \frac{\lg \left(11,7 \frac{d_i}{d_{\text{ср}}} + 0,50 \right)}{\lg 6,15 \frac{H_{\text{ср}}}{0,7d_{\text{ср}}}}; \end{aligned} \right\} \quad (4.37)$$

значения σ_x/\bar{v}_d определяются по графику (рис. 33);

$$\left. \begin{aligned} v_{\text{дв}} &= 10,8 \sqrt{d_{\text{ср}}}, \\ v_{\text{дв}i} &= 10,8 \sqrt{d_i}. \end{aligned} \right\} \quad (4.38)$$

Для практических целей расчеты можно производить и по среднему диаметру, как для однородного состава наносов.

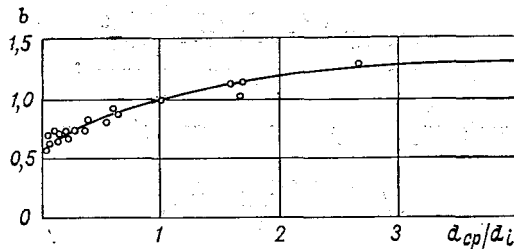


Рис. 32. График $b(d_{\text{ср}}/d_i)$.

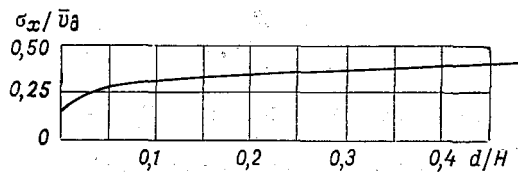


Рис. 33. График $\frac{\sigma_x}{v_d}(d/H)$.

Остановимся теперь на применении формулы В. В. Романовского

$$p_{\text{вл}} = 0,01 \rho_{\text{гр}} d \left(\frac{v_{\text{ср}}}{v_{\text{нач}}} \right)^3 \alpha \left(v_{\text{ср}} - v_{\text{нач}} \sqrt{\frac{f}{f_0}} \right), \quad (4.39)$$

которая, по-видимому, наиболее подходит для расчета транспорта влекомых наносов горных рек, переносящих частицы размером от 2 до 200 мм, поскольку коэффициент 0,01 получен именно для этих условий.

Величина $\rho_{гр}$ представляет собой среднее значение плотности грунта, образующего поверхность русла на участке реки, пересекаемом расчетным створом; $\rho_{гр}$ находят по данным измерений или по гранулометрическому составу донных наносов, пользуясь таблицей Г. А. Петуховой (табл. 3). Расчетный диаметр донных наносов d определяется как среднее значение диаметра подвижных фракций в составе донных отложений по формуле (4.19). Подвижные фракции отсекаются по предельному значению $d_{пред}$, т. е. по диаметру частиц, способных еще придти в движение при заданной средней скорости потока $v_{ср}$. Значение $d_{пред}$ определяется по формуле

$$d_{пред} = \frac{v_{ср}^2 (\alpha^2 N + 1,81)}{30,2N (2,4\Theta - 0,7)^2}, \quad (4.40)$$

где Θ — коэффициент формы частиц наносов по Романовскому; α — коэффициент перехода от донной скорости к средней на вертикали. При эллиптическом распределении скорости на вертикали

$$\alpha = \frac{1,11C \sqrt{1 - P \left(1 - \frac{d}{2H}\right)^2}}{C - 1}; \quad (4.41)$$

N — безразмерный параметр, определяемый по следующей зависимости:

$$N = \frac{(0,7C + 6) C}{g}, \quad (4.42)$$

где C — коэффициент Шези.

Коэффициент Θ вычисляется по формуле

$$\Theta = \frac{d_{ср}^2}{ab}, \quad (4.43)$$

где a и b — соответственно длина и ширина частицы; d — ее средний диаметр.

В расчетах используется среднее для всех фракций значение Θ ; при отсутствии данных принимают $\Theta = 0,75$. Начальная скорость влечения частиц ($v_{нач}$) определяется по зависимости

$$v_{нач} = u \sqrt{\frac{jf_0N}{\alpha^2N + jf_0}}. \quad (4.44)$$

Значение j находится по табл. 8 как функция формы частиц наносов Θ . Гидравлическая крупность u определяется по таблице $u(d)$. Для установления статического (f_0) и динамического (f) коэффициентов трения, входящих в выражение (4.39), необходимо использовать табл. 8 и графики, представленные на рис. 7 и 9. При использовании этих данных необходимо учитывать, что эксперименты по определению величин f_0 и f проводились с од-

нофракционной, жестко закрепленной шероховатостью дна, которая позволяла довольно точно определять высоту выступов донной шероховатости (Δ). При разнофракционных донных наносах высота выступов донной шероховатости, очевидно, будет зависеть от их гранулометрического состава. Зависимость между гранулометрическим составом донных наносов и величиной Δ пока не установлена. Поэтому в первом приближении при использовании зависимости $f_0 = \varphi\left(\theta, \frac{d}{\Delta}\right)$ можно принять отношение $d/\Delta = \text{const} = 1$.

В соответствии со сказанным метод расчета $P_{\text{вл}}$, основанный на формуле (4.39), надо трактовать как приближенный, подлежащий дальнейшему усовершенствованию.

При песчано-гравелистых грунтах в руслах рек, как правило, образуются донные аккумулятивные формы — гряды и рифели, которые в условиях активного взаимодействия потока и русла перемещаются в направлении течения. Расход наносов $P_{\text{г}}$, определяемый перемещением гряд и рифелей, называют расходом донно-грядового движения наносов, который довольно хорошо отражает транспорт руслоформирующих фракций. Если не ставится задача полного учета стока наносов (взвешенных и влекомых), то расход руслоформирующих фракций, получаемый по перемещению донных гряд, может рассматриваться как расход влекомых наносов $P_{\text{вл}}$. При определении суммарного расхода (или стока) взвешенных и влекомых наносов величина $P_{\text{г}}$ не может использоваться без соответствующего корректива (об этом см. в следующем разделе), поскольку она включает расход некоторых промежуточных фракций, учитываемых при измерении (или вычислении) расхода взвешенных наносов.

Расход донно-грядового перемещения наносов может быть определен по данным расчета элементов гряд или рифелей, их высоты $h_{\text{г}}$ и скорости перемещения $c_{\text{г}}$. Кроме этого, должна учитываться также плотность грунта $\rho_{\text{г}}$, составляющего активный слой русла. Выражение $P_{\text{г}}$ может быть записано следующим образом:

$$P_{\text{г}} = a \rho_{\text{г}} h_{\text{г}} c_{\text{г}}, \quad (4.45)$$

где a — коэффициент формы гряды, учитывающий соотношение между ее средней и максимальной высотой; в первом приближении $a \approx 0,5$.

Для подсчета стока влекомых наносов за те или иные промежутки времени рекомендуется использовать графики зависимости расходов влекомых наносов от расходов воды $P_{\text{вл}} = f(Q)$. График строится по вычисленным значениям расходов влекомых наносов во всем диапазоне изменения расходов воды данной реки за многолетний период.

На реках с плавным ходом стока воды средний суточный расход влекомых наносов снимается с графика $P_{\text{вл}} = f(Q)$ по

значениям среднего суточного расхода воды. На реках с резкими колебаниями расхода воды внутри суток средний суточный расход влекомых наносов подсчитывается как средняя взвешенная (по времени) величина из расходов влекомых наносов, снятых с графика связи $P_{вл} = f(Q)$ по характерным (переломным) значениям расходов воды за сутки.

Сток влекомых наносов за длительные интервалы времени (месяц, год) подсчитывается путем суммирования средних суточных расходов влекомых наносов. Допускается подсчет стока наносов и по осредненным за более крупные интервалы времени значениям Q , если контрольные расчеты показывают удовлетворительную сходимость результатов такого упрощенного подсчета с данными посуточного расчета.

По данным вычислений за характерные по водности годы строится график связи годовых значений стока воды и влекомых наносов. Этот график используется для определения параметров годового стока влекомых наносов (средней многолетней величины, коэффициента вариации и годовых величин заданной вероятности превышения) графо-аналитическим способом. Пользуясь этим графиком, можно также определить сток влекомых наносов за конкретные годы, для которых имеются сведения о годовом стоке воды.

4.3. Вычисление суммарного расхода взвешенных и влекомых наносов

В отличие от предыдущих разделов настоящей главы, где рассматривались способы вычисления параметров гряд и расхода влекомых наносов теми или иными расчетными методами, здесь излагается способ получения суммарного расхода взвешенных и влекомых наносов по данным раздельного измерения указанных величин в речном потоке. При этом используются общие теоретические соображения о взаимосвязи фракционного состава транспортируемых наносов с их разделением на взвешенные и влекомые. Именно по этой причине настоящая задача рассматривается в данной книге, посвященной теоретическим расчетным методам.

При раздельном измерении взвешенных и влекомых наносов возникает опасность двойного учета одних и тех же транспортируемых фракций в составе взвешенных и влекомых наносов. На это обстоятельство обращалось внимание в статьях А. И. Кузнецова [79] и А. В. Караушева [61]. Кузнецов отмечал, что влекомые наносы частично входят в эпюру мутности. В работе Караушева указывалось, что разделение транспортируемых наносов на категории взвешенных и влекомых выполняется по крупности частиц на основе их гидродинамических характеристик. Вследствие турбулентной пульсации скоростей течения

эти характеристики изменяются во времени; соответственно изменяются во времени и границы между категориями наносов. Последнее происходит даже в условиях установившегося потока. Поэтому при транспортировании многофракционных наносов всегда имеет место взаимное проникновение частиц взвешенных и влекомых наносов, особенно в области граничных фракций. Из изложенного видно, что одной из важнейших задач при оценке общего транспорта взвешенных и влекомых наносов, а также при выделении одной из этих категорий из суммарного расхода наносов, является определение граничных взаимнопроникающих фракций. На детальном рассмотрении этой задачи мы остановимся ниже, а сейчас перейдем к изложению некоторых предположений, имеющих в ряде опубликованных работ.

Интересную попытку теоретического обоснования методики получения полного расхода взвешенных и влекомых наносов предприняли Х. А. Эйнштейн и Н. Чинн [192]. Они нашли взаимосвязь между интенсивностью транспорта наносов, гранулометрическим составом поверхностного слоя русла и гидравлическими характеристиками потока. Теоретические разработки Эйнштейна и Чинна доведены до расчетных зависимостей, предусматривающих получение полного расхода наносов. Однако практическое применение этих зависимостей затрудняется необходимостью определения мгновенных характеристик гранулометрического состава донных отложений (особенно мелкой илистой фракции). С другой стороны, сомнительна и надежность рекомендуемого способа, поскольку вызывают сомнения некоторые исходные положения.

Попытку количественной оценки среднего диаметра частиц, разграничивающей категории взвешенных и влекомых наносов, предпринял В. Крессер [206]. В основу его методики положено сопоставление гранулометрических кривых взвешенных и влекомых наносов. Кривая гранулометрического состава взвешенных наносов помещается под кривой гранулометрического состава донных отложений так, чтобы горизонтальная шкала крупности частиц совместились. Обе эти кривые соединяют путем графической интерполяции. Точка пересечения интерполированного участка объединенной кривой с горизонтальной осью характеризует по мнению Крессера, диаметр частиц, разграничивающий обе категории наносов. К. В. Разумихина произвела графическую обработку материалов натурных наблюдений по 18 измерениям на р. Полометь за 1965—1966 гг. при использовании методики Крессера. Полученные на основании графической интерполяции значения граничных диаметров приводятся в табл. 26, из которой видно, что с увеличением средней скорости на вертикали увеличивается и значение граничного диаметра наносов. При изменении скорости в диапазоне 0,5—1,9 м/с граничный диаметр, по Крессеру, изменяется от 0,09 до 0,45 мм. Приведенные в этой же таблице значения наибольших диаметров частиц в составе

взвешенных наносов, полученные по непосредственным измерениям, в несколько раз превышают значения граничных диаметров по Крессеру, что свидетельствует о недостаточной удовлетворительности его способа.

Таблица 26

Сравнение граничного диаметра частиц по Крессеру с наибольшим диаметром взвешенных наносов

Дата	№ вертикали	Скорость v_{cp} м/с	Граничный диаметр по Крессеру d_r мм	Наибольший диаметр взвешенных наносов (измеренный) d_{max} мм	
1965 г.	17/IV	2	0,53	0,09	0,5
	27/IV	2	1,64	0,23	0,7
	27/IV	4	1,42	0,23	2,5
	27/IV	6	1,37	0,19	0,9
	3/V	4	1,06	0,18	0,9
1966 г.	9/IV	3	1,24	0,27	0,5
	18/IV	2	1,39	0,19	0,6
	18/IV	3	1,38	0,25	2,1
	21/IV	2	1,52	0,20	1,0
	21/IV	3	1,63	0,25	1,8
	23/IV	6	1,89	0,45	3,0
	23/IV	4	1,86	0,36	2,5
	25/IV	2	1,77	0,22	2,1
	25/IV	3	1,68	0,23	2,1
	4/V	3	1,08	0,20	1,2
	4/V	5	1,06	0,18	0,6
	7/V	3	1,24	0,22	1,6
	7/V	5	1,14	0,23	1,6

На основании графической обработки материалов наблюдений на реках Австрии Крессер получил эмпирическую зависимость для определения граничного диаметра зерен d_r , имеющую вид

$$d_r = \frac{v_{cp}^2}{gk} \quad (4.46)$$

где v_{cp} — средняя скорость потока; g — ускорение свободного падения; k — коэффициент, изменяющийся от 100 до 1000. Для рек Австрии $k = 360$. Если выразить v в м/с, а d в мм, то для граничного диаметра частиц, разделяющих влекомые и взвешенные наносы, согласно Крессеру, получим

$$d_r = 0,28v^2 \quad (4.47)$$

Попытка получить подобную зависимость была предпринята Разумихиной при обработке материалов по р. Полометь. Ею найдена зависимость

$$d_r = 0,18v^{1,4} \quad (4.48)$$

параметры которой отличаются от зависимости Крессера. По-видимому, можно сделать вывод о том, что в потоках с разными гидравлическими характеристиками граничный диаметр существенно различается. Кроме того, очевидно, что вполне определенной границы (по крупности частиц) между взвешенными и влекомыми наносами существовать не может, поскольку некоторые фракции наносов, как указывалось выше, одновременно входят в состав взвешенных и влекомых наносов.

Если заведомо идти на допущение определенной неточности, то получаемую тем или иным приближенным способом условную границу крупности между взвешенными и влекомыми наносами при заданном гидравлическом режиме потока можно принимать за истинную границу между этими категориями. В этом случае полный расход наносов вычисляют как сумму расходов взвешенных и влекомых наносов. При этом первая из этих величин может быть измерена, а вторая вычислена по формуле, или наоборот, они могут также обе быть измерены или же вычислены. В этом случае при расчете расхода взвешенных или соответственно влекомых наносов учитываются только те фракции, которые согласно граничной крупности d_T оказываются относящимися к категории взвешенных или же влекомых наносов.

Разумихиной предложен метод расчета полного расхода наносов для равнинных рек, который не требует предварительного деления наносов по крупности на взвешенные и влекомые. Устанавливается лишь верхний предел крупности взвешиваемых фракций. Разумеется, частицы такого размера могут находиться и в составе влекомых наносов.

Рекомендации разработаны Разумихиной на основе анализа выполненных ею на р. Полометь детальных исследований транспорта наносов. Анализируя процентное содержание частных фракций наносов, перемещающихся в виде донных гряд и во взвешенном состоянии, она установила, что частицы мельче 0,2 мм, составляющие 70—75% взвешенных наносов, содержатся в донных грядах в незначительном количестве — не более 1—2%. Основная масса наносов, формирующих гряды (55—65%), оказалась представленной частицами крупнее 1 мм. Таких частиц в составе взвешенных наносов менее 1%. Фракции 1—0,5 и 0,5—0,2 мм, которые Разумихина назвала промежуточными (для данных конкретных условий), присутствовали как в составе взвешенных, так и влекомых наносов.

Далее Разумихина делает следующий весьма важный вывод: промежуточные и более мелкие фракции, входящие в состав гряд и, следовательно, участвующие в формировании расхода влекомых наносов, перемещаются в основном в составе взвешенных наносов. Характерно, что при возрастании суммарного содержания промежуточных фракций в составе гряд увеличивается их доля во взвешенных наносах. Это свидетельствует о том, что за

счет промежуточных фракций осуществляется наиболее интенсивный взаимообмен наносами потока и русла.

Очевидно, что при определении общего расхода наносов ни одна фракция не должна учитываться дважды (в составе взвешенных и в составе влекомых наносов). Чтобы избежать такого двойного учета, Разумихина предлагает промежуточные фракции учитывать в составе взвешенных наносов, где обычно их значительно больше, а из расхода влекомых наносов их исключать. Из расхода влекомых наносов исключаются также и более мелкие фракции, принадлежащие к взвешенным наносам.

Полный элементарный расход наносов (взвешенных и влекомых), кг/(с·м) может быть определен следующим выражением:

$$P_{\text{полн}} = P_{\text{взв}} + \left(P_{\text{вл}} - \sum_{d_i=0}^{d_{\text{п. взв}}} P_{\text{вл}i} \right), \quad (4.49)$$

где $d_{\text{п. взв}}$ — верхний предел наибольшей фракции взвешенных наносов; $P_{\text{взв}}$ — элементарный расход взвешенных наносов (всех взвешенных фракций); $P_{\text{вл}}$ — элементарный расход влекомых наносов (по всем перемещающимся у дна фракциям);

$\sum_{d_i=0}^{d_{\text{п. взв}}} P_{\text{вл}i}$ — сумма частных элементарных расходов мелких

Таблица 27

Пример вычисления полного расхода наносов р. Полометь у с. Яжелбицы 21/IV 1965 г.

d мм	P_i взв кг/с	d мм	$\frac{P_i \text{ взв}}{P_i \text{ вл}}$	d мм	P_i вл кг/с
<0,005	305				
0,005—0,01	147				
0,01—0,05	439				
0,05—0,01	248				
0,1—0,2	217	0,2—0,5	$\frac{222}{38,8}$		
		0,5—1,0	$\frac{90,2}{68,5}$		
				1,0—2	52,3
				2—5	25,0
				5—10	9,9
				>10	10,1
Сумма	1356		$\frac{312,2}{107,3}$		97,3

$$P_{\text{полн}} = 1356 + 312,2 + (107,3 + 97,3 - 107,3) = 1766 \text{ кг/с}$$

фракций влекомых наносов (фракций от $d=0$ до $d=d_{п.взв}$), т. е. тех фракций, которые учитываются в составе взвешенных наносов.

Для р. Полометь Разумихина получила для периода паводка $d_{п.взв} = 1$ мм. Для других условий и в других потоках величина $d_{п.взв}$ должна устанавливаться путем измерений в натуре.

В рассуждениях Разумихиной транспорт влекомых наносов отождествляется с донно-грядовым перемещением наносов, поэтому естественно полагать $p_{вл} = p_{г}$, где $p_{г}$ — расход донно-грядового перемещения наносов. В соответствии с этим полный элементарный расход наносов рекомендуется определять так:

$$P_{полн} = P_{взв} + \left(p_{г} - \sum_{d_i=0}^{d_{п.взв}} p_{гi} \right). \quad (4.50)$$

Таблица 28

Полный расход наносов р. Полометь у с. Яжелбицы

Дата	Расход наносов по фракциям, кг/с			$P_{взв} + P_{вл}$ кг/с	$P_{полн}$ по методу Разумихиной, кг/с	Уточнение по методу Разумихиной, %
	<0,2 мм (взвешенные)	0,2—1,0 мм взвешенные влекомые	>1,0 мм влекомые			
1965 г. 21/IV	1356	$\frac{312,2}{107,3}$	97,3	1873	1766	6,1
29/IV	1047	$\frac{322,8}{115,7}$	230,8	1716	160	7,2
3/V	527	$\frac{183,8}{79,8}$	128,1	919	839	9,5
5/V	305	$\frac{50,0}{14,1}$	110,4	480	465	3,2
1966 г. 8/IV	1653	$\frac{554}{169,6}$	99,7	2476	2307	7,3
11/IV	1217	$\frac{619}{115,3}$	195,9	2147	2032	5,7
15/IV	1115	$\frac{435}{151,2}$	173,3	1874	1723	8,8
19/IV	1684	$\frac{533}{129,5}$	260,1	2607	2477	5,2
1967 г. 15/IV	1025	$\frac{214,3}{91,7}$	130,8	1462	1370	6,7

Полный расход наносов по всему сечению потока вычисляется по формуле

$$P_{\text{полн}} = \sum_{j=1}^n p_{\text{полн}j} \Delta B_j, \quad (4.51)$$

где j — номер отсека поперечного сечения потока; ΔB_j — расстояние между измерительными вертикалями; $p_{\text{полн}j}$ — значения элементарных расходов наносов, полученные по уравнению (4.49) — (4.50).

Суммирование выполняется по всей ширине русла с соответствующим учетом крайних приурезовых участков поперечного профиля. Пример расчета по приведенным здесь формулам дан в табл. 27. Сравнение результатов расчета полного расхода наносов предложенным методом и путем простого суммирования приводится в табл. 28.

Как показали расчеты, выполненные по материалам р. Полометь при скорости течения 1,0—1,5 м/с и средней крупности наносов, слагающих гряды, 2—3 мм, завышение полного расхода наносов (взвешенных и влекомых) за счет двойного учета промежуточных фракций в среднем составляет 6—10%. Эта систематическая ошибка возрастает с увеличением скорости течения за счет увеличения диапазона фракций, участвующих в активном взаимообмене наносов, перемещаемых во взвеси и в виде гряд.