

3. РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МУТНОСТИ ПО ВЕРТИКАЛИ И ТРАНСПОРТА ВЗВЕШЕННЫХ НАНОСОВ

3.1. Распределение мутности по вертикали

Общая закономерность распределения мутности по вертикали речного потока выражается экспоненциальной кривой, дающей убывание мутности от дна к поверхности потока. В большинстве случаев речное русло бывает полностью или частично сложено подвижными фракциями наносов, в том числе и взвешенными, участвующими в постоянном более или менее интенсивном процессе обмена наносами потока и русла. При этом происходит насыщение потока за счет захвата донных наносов и его осветление при выпадении частиц на дно. Если в среднем имеет место равенство масс осаждающихся и взвешиваемых со дна наносов, то это означает, что процесс взвешивания стабилизировался. Полная стабилизация взвешивания наносов может наблюдаться только в равномерном установившемся потоке. При стабилизации процесса взвешивания форма кривой распределения (эпюры) мутности по длине потока не изменяется. Эпюра мутности, соответствующая сбалансированному взаимодействию наносами потока и русла, отражает состояние насыщения потока и может быть названа равновесной эпюрой мутности. Расход наносов при равновесной эпюре мутности является измерителем транспортирующей способности потока.

Вид равновесной эпюры, а вместе с тем и транспортирующая способность потока существенно зависят от крупности переносимых наносов. Эпюры распределения крупных наносов обнаруживают интенсивное убывание мутности от дна к поверхности потока, а эпюры мелких фракций отличаются малой кривизной и дают сравнительно небольшое убывание мутности от дна к поверхности (рис. 17).

Весьма существенное влияние на распределение мутности оказывают местные условия, например изменение глубины и скорости течения как по длине, так и по ширине потока; соответственно изменяются и формы эпюр мутности. От участка к участку может изменяться транспортирующая способность потока и его насыщенность наносами. Это также отражается на форме эпюр мутности: при их сравнительной оценке для одних и тех же гидравлических условий и того же состава наносов

обнаруживается, что при перегрузке потока наносами эпюра дает менее интенсивное убывание мутности к поверхности, чем при недогрузке, равновесная же эпюра занимает положение, промежуточное между ними (рис. 17).

Для получения представления об общей закономерности распределения мутности по вертикали речного потока необходимо анализировать осредненные для участков реки графики мутности и связывать получаемые осредненные кривые со средними значениями скорости, глубины, гранулометрического состава наносов, параметров шероховатости русла. Это в значительной

мере исключает влияние местных условий, отражающихся на форме отдельных эпюр.

Как было показано выше, все теоретические модели взвешенного потока для условий сравнительно небольшой мутности, характерных почти для всех естественных потоков (за исключением селевых или приближающихся к ним по насыщенности), позволяют не учитывать обратное влияние

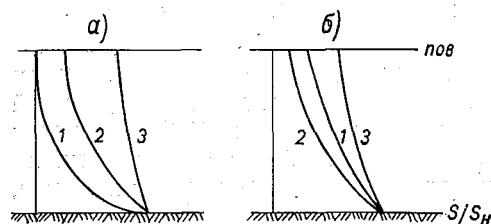


Рис. 17. Распределение безразмерной мутности S/S_n по вертикали.

- а) 1 — крупные наносы, 2 — средние наносы, 3 — мелкие наносы.
б) 1 — распределение мутности в потоке, насыщенном наносами; 2 — поток недогружен наносами; 3 — поток перегружен.

взвешенных частиц на несущий их поток и взаимодействие этих частиц. Как указывалось, при этом условии диффузионная теория, которую мы используем ниже для построения расчетных зависимостей, дает хорошую оправдываемость при сравнении с фактическими экспериментальными и натурными данными.

С другой стороны, указанное условие позволяет изучать поведение в потоке отдельных фракций наносов, характеризующихся узкими диапазонами крупности, даже в том случае, если потоком транспортируются смеси нескольких фракций наносов с весьма большим общим диапазоном крупности. Принятое условие позволяет использовать метод суммирования частных мутностей, т. е. концентрации отдельных фракций, для получения общей мутности в точке.

Общую мутность в точке потока будем обозначать через S , а частную мутность некоторой i -той фракции — через s_i . Очевидно, что

$$S = \sum_{i=1}^m s_i, \quad (3.1)$$

где m — общее число транспортируемых потоком фракций наносов. Заметим, что процентное содержание α_i каждой фракции

при этом выразится соотношением

$$\alpha_i = 100 \frac{s_i}{S}. \quad (3.2)$$

При увеличении дробности разбивки наносов на фракции число членов суммы в формуле (3.1) возрастает, но зато соответственно уменьшается значение каждого члена суммы.

Ниже для мутности используются размерности, соответствующие международной системе единиц (СИ). Основным способом ее выражения принято отношение суммарной массы твердых взвешенных частиц m_S к общему объему смеси воды с наносами $V_{см}$; ее размерность будет

$$|S| = \left| \frac{m_S}{V_{см}} \right| = \text{кг/м}^3, \quad (3.3)$$

где кг — килограмм-масса. В качестве дополнительного способа выражения мутности используется безразмерная величина S_v , являющаяся отношением объема твердых частиц v_S к объему заключающей их смеси $V_{см}$, т. е.

$$|S_v| = \left| \frac{v_S}{V_{см}} \right| = \frac{\text{м}^3 \text{ твердого вещ.}}{\text{м}^3 \text{ смеси}}. \quad (3.4)$$

В системе Гидрометслужбы СССР и в других ведомствах у нас и за рубежом, а также во многих публикациях используется выражение мутности в г/м^3 , где г — грамм-масса. В прежних публикациях граммы характеризовали весовое количество наносов. Обозначая такое выражение мутности через S_* , запишем

$$|S_*| = \left| \frac{p_S}{V_{см}} \right| = \frac{\text{г (вес)}}{\text{м}^3}. \quad (3.5)$$

В настоящей книге это выражение не используется.

В формулах (3.3) — (3.5) дана общая мутность. Совершенно очевидно, что и для частной мутности применяется та же размерность, причем используются обозначения s_i , s_{iv} и s_{i*} .

Величины S и S_* численно равны. Переход от S_v к S осуществляется по соотношениям:

$$\left. \begin{aligned} S \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} &= S_v \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3} \rho_S \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \\ S &= \rho_S S_v \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

и

$$\left. \begin{aligned} S \frac{\text{г}}{\text{м}^3} &= S_v \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3} \rho_S \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 10^3, \\ S &= \rho_S S_v \cdot 10^3 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}, \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

где ρ_S — плотность частиц наносов.

На рис. 18 изображены эпюры мутности, полученные по измерениям на р. Полометь. Измерения выполнялись К. В. Разумихиной [132] по продольным профилям, совпадавшим с продольными осями гряд. На рис. 18 *а* представлены эпюры общей мутности на вертикалях, расположенных над различными элементами донной гряды: ее подвалем, гребнем и двумя точками тыльного ската. Как видим, на сравнительно коротком участке

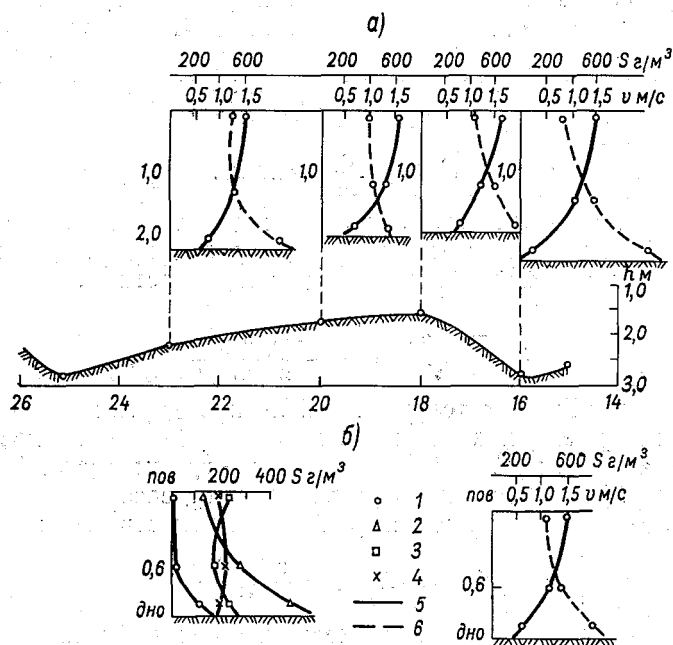


Рис. 18. Распределение мутности над донной грядой на р. Полометь.

а — эпюры общей мутности над элементами гряды, *б* — осредненные эпюры над всей грядой. Фракции: 1) 1–0,5 мм, 2) 0,5–0,1 мм, 3) 0,1–0,01 мм, 4) <0,01 мм; 5) скорость, 6) общая мутность.

вдоль потока происходит весьма существенное перераспределение мутности, обусловленное как изменением глубин и средней скорости течения вдоль потока, так и особенностями обтекания гряды и распределением над ней пульсационных вихревых токов. На рис. 18 *б* изображены осредненные по всем четырем вертикалям эпюры общей мутности и скорости (справа), а также осредненные по вертикалям эпюры частных значений мутности для четырех фракций с общим диапазоном крупности от 0 до 1,00 мм (см. условные обозначения на рис. 18). На осредненных эпюрах глубины показаны в относительных единицах

$$\tilde{y} = \frac{y}{H}, \quad (3.8)$$

где y — координата, отсчитываемая от поверхности потока и направленная по вертикали вниз; H — общая глубина вертикали или же среднее значение глубины на четырех вертикалях.

На том же рисунке слева внизу изображены осредненные по всем четырем вертикалям эпюры частных значений мутности для четырех фракций наносов. В сумме частные значения мутности в каждой точке дают общую мутность, эпюра которой представлена справа (о ней мы уже говорили).

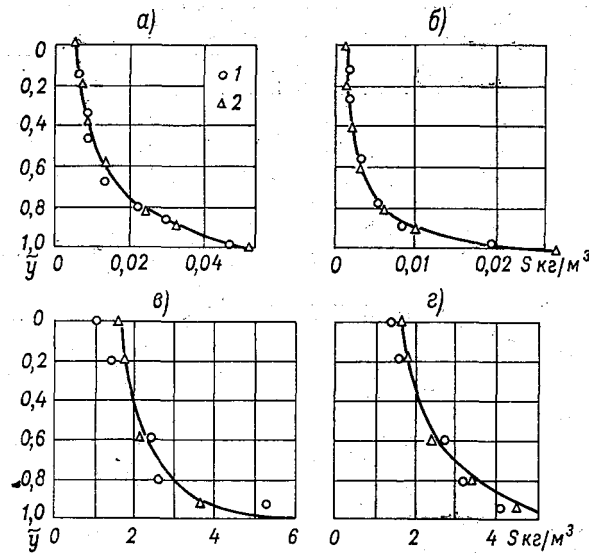


Рис. 19. Распределение общей мутности по вертикали в реках.

a — р. Волга у г. Сорново (натурные точки получены путем осреднения данных измерений на 15 вертикалях); *б* — р. Волга, участок выше г. Костромы (натурные точки получены путем осреднения данных измерений на 43 вертикалях); *в* и *г* — р. Амударья (одиночные вертикали).
1 — по измерениям; 2 — на основании расчета.

На рис. 19 изображены эпюры общей мутности, полученные по данным измерений на р. Волге (до зарегулирования) и на р. Амударье. Два верхних графика представляют собой осредненные эпюры по многим вертикалям, расположенным на сравнительно коротких участках р. Волги. Нижние графики построены по данным измерений на отдельных вертикалях р. Амударьи.

Все изображенные на рисунке осредненные эпюры общей мутности, а также отдельные эпюры для Амударьи, обладающей высокой транспортирующей способностью и переносящей весьма мелкие наносы, обнаруживают плавное монотонное убывание S от дна к поверхности потока. Осредненные эпюры частной

мутности дают менее плавную картину распределения s_i , что связано как с определенными неточностями натурального измерения гранулометрического состава взвешенных наносов, так и с пульсацией мутности, которая отражается в большей мере на величинах s_i , чем на S , поскольку при суммировании нескольких s_i сглаживаются случайные отклонения пульсации и влияние ошибок.

Перейдем к рассмотрению теоретического вывода уравнения распределения мутности по вертикали. Запишем уравнение турбулентной диффузии для случая установившегося равномерного течения, характеризующегося отсутствием поперечных составляющих осредненной скорости v_z и v_y , и для случая стационарного и неизменного по длине потока x и его ширине z распределения мутности. Это уравнение применительно к частной мутности s_i , выражающей содержание в воде наносов i -той фракции, имеет вид

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{d}{dy} \left(A \frac{ds_i}{dy} \right) - u_i \frac{ds_i}{dy} = 0, \quad (3.9)$$

где u_i — гидравлическая крупность рассматриваемой фракции наносов.

Профиль мутности (эпюру мутности) находим двухкратным интегрированием уравнения (3.9). После первого интегрирования получаем

$$\frac{A}{\rho} \frac{ds_i}{dy} = u_i s_i + \varphi_1, \quad (3.10)$$

где φ_1 — произвольная функция интегрирования. Для определения φ_1 используем граничные условия у свободной поверхности. При $y = 0$

$$\frac{A_0}{\rho} \left(\frac{ds_i}{dy} \right)_0 - u_i s_{0i} = 0. \quad (3.11)$$

Индексом «0» помечены величины на граничной поверхности потока. Это условие показывает, что перенос взвешенных частиц через свободную поверхность потока отсутствует. Записывая уравнение (3.10) для граничной точки вертикали $y = 0$, получаем $\varphi_1 = 0$. Поэтому уравнение (3.10) можно написать в виде

$$\frac{ds_i}{s_i} = \frac{\rho u_i}{A} dy. \quad (3.12)$$

Используем далее следующую формулу коэффициента турбулентного обмена, упоминавшуюся выше в разделе, посвященном вопросам речной гидравлики:

$$A = \frac{\rho g H v}{MC} = \frac{\rho g H v_0}{MC} \sqrt{1 - P \frac{y^2}{H^2}}. \quad (3.13)$$

Здесь в первой записи формулы фигурирует переменная по вертикали скорость v . Во второй записи зависимость скорости от y

представлена согласно эллиптической формуле. Через v_0 обозначена скорость у поверхности потока, а через P — безразмерный параметр, определяемый зависимостью

$$P = \frac{Mv_{cp}^2}{Cv_0^2}, \quad (3.14)$$

где, как и в формуле (3.13), M — параметр, имеющий размерность корня квадратного из ускорения и зависящий от коэффициента Шези C . Безразмерный параметр P может быть выражен также приближенной формулой в зависимости только от C . Эмпирические формулы M и P имеют следующий вид:

при $10 \leq C \leq 60$

$$M = 0,7C + 6, \quad (3.15)$$

$$P = 0,57 + \frac{3,3}{C}; \quad (3.16)$$

при $60 \leq C \leq 90$

$$M = 48 = \text{const}, \quad (3.17)$$

$$P = 0,0222C - 0,000197C^2. \quad (3.18)$$

Для приближенных вычислений M можно применять соотношения (3.15), (3.17) и за пределами, указанными выше. Так, при $C < 10$ для вычисления M можно пользоваться зависимостью (3.15), а при $C > 90$ принимать $M = 48$.

Используя безразмерную координату $\tilde{y} = \frac{y}{H}$ и подставляя зависимость (3.13) в уравнение (3.12), напишем

$$\frac{ds_i}{s_i} - \frac{MCu_i}{gv_0} \cdot \frac{d\tilde{y}}{\sqrt{1 - P\tilde{y}^2}} = 0. \quad (3.19)$$

Интегрируя, получаем

$$\ln s_i - \frac{MCu_i}{gv_0\sqrt{P}} \arcsin(\tilde{y}\sqrt{P}) + c_1 = 0. \quad (3.20)$$

Произвольная постоянная интегрирования c_1 определяется из граничного условия у дна: при $\tilde{y} = 1$ мутность $s_i = s_{Hi}$, т. е. имеем

$$c_1 = \ln s_{Hi} + \frac{MCu_i}{gv_0\sqrt{P}} \arcsin \sqrt{P}. \quad (3.21)$$

Подставив это равенство в уравнение (3.20), заменив величину P , согласно формуле (3.14), и введя функцию

$$\beta(\tilde{y}) = \arcsin \sqrt{P} - \arcsin(\tilde{y}\sqrt{P}), \quad (3.22)$$

получаем следующую запись искомого уравнения:

$$\ln \frac{s_i}{s_{Hi}} = - \frac{u_i C \sqrt{MC}}{g v_{cp}} \beta(\tilde{y}) \quad (3.23)$$

или

$$s_i = s_{Hi} e^{-a G_i \beta(\tilde{y})}, \quad (3.24)$$

где принято:

$$a = \frac{C \sqrt{MC}}{g}, \quad (3.25)$$

$$G_i = \frac{u_i}{v_{cp}}. \quad (3.26)$$

Величина G_i является безразмерным характеристическим числом, выражающим одно из условий подобия взвешивания наносов i -той фракции в потоке. Это число может быть отнесено и к многофракционным наносам при использовании средне-взвешенного, медианного или какого-либо другого репрезентативного значения гидравлической крупности смеси наносов. В общем виде оно записывается так:

$$G = \frac{U}{v_{cp}}. \quad (3.27)$$

Критериальное число G получено А. В. Караушевым [53] теоретически при анализе уравнения турбулентной диффузии, приведенного к безразмерному виду. Заметим, что одновременно И. И. Леви [85] на основе анализа условий взвешивания частиц в турбулентном потоке получил критерий v_{cp}/U , т. е. число, обратное G .

Формула (3.24) выведена Караушевым в 1948 г.; проверка на натурном материале обнаружила полную пригодность формулы для практического применения. Расчет распределения общей мутности многофракционных наносов выполняется путем суммирования частных значений для точек вертикали, т. е. сложением частных эпюр

$$S(\tilde{y}) = \sum_{i=1}^m s_i(\tilde{y}), \quad (3.28)$$

где m — число всех взвешенных в потоке фракций наносов.

Функция $s_i(\tilde{y})$ вычисляется по формуле (3.24).

На рис. 17 и 18 представлено сравнение эпюр частной мутности $s_i(\tilde{y})$ и общей мутности $S(\tilde{y})$, построенных по данным измерений и по расчету, выполненному по формулам (3.24) и (3.28). Как видим, соответствие кривых, полученных по измерениям и по вычислениям, достаточно хорошее.

В 1931 г. В. М. Маккавеевым при использовании предположения о постоянстве коэффициента турбулентного обмена A по вертикали была получена формула профиля мутности следующего вида:

$$s = s_{He} - \frac{2mCu}{gv_{cp}} (1 - \tilde{y}) \quad (3.29)$$

где m — параметр параболы Базена (формулы вертикального распределения скорости); по Буссинеску $m = 24 = \text{const}$. Более правильным является принятие переменного значения m . Наши определения показали, что

$$m = \frac{M}{2} \quad (3.30)$$

Содержащаяся здесь величина M находится по формуле (3.15) или (3.17).

Сравнение формул (3.24) и (3.29) между собой показывает относительно небольшое расхождение получаемых по ним графиков распределения мутности. Формула (3.24) обнаруживает все же большую кривизну эпюры мутности, что подтверждается и натурными данными. Тем не менее следует считать формулу (3.29) пригодной для приближенных расчетов распределения мутности в речных потоках. В настоящей книге используется в основном формула (3.24) как более точная.

В целях упрощения практического применения формулы (3.24) построена расчетная номограмма функции $\beta(\tilde{y})$. При этом учтено, что формула может быть отнесена и к случаю распределения мутности по вертикальному диаметру горизонтальной трубы с осесимметричным течением. При расположении начала координат на оси трубы будем получать положительные значения \tilde{y} вниз от оси и отрицательные — вверх от нее. На нижней и на верхней границах потока будем иметь соответственно $\tilde{y} = 1$ и $\tilde{y} = -1$, полагая, что в данном случае

$$\tilde{y} = \frac{y}{r} \quad (3.31)$$

где r — радиус трубы.

Ниже будет показано, как формула (3.24) может использоваться для описания эпюры мутности в речном потоке, покрытом льдом.

Номограмма функции $\beta(\tilde{y})$ для всех величин \tilde{y} от -1 до $+1$ при ряде значений S изображена на рис. 20.

При решении практических задач, относящихся, в частности, к учету мутности водных масс при оценке их качества применительно к различным условиям водопользования, возникает задача

оценки средней мутности водных масс в потоке. В первую очередь при этом оказывается необходимым определить среднюю по вертикали мутность. Говоря о мутности как одном из показателей качества воды, надо учитывать, что в зависимости от поставленной задачи средняя мутность водных масс должна

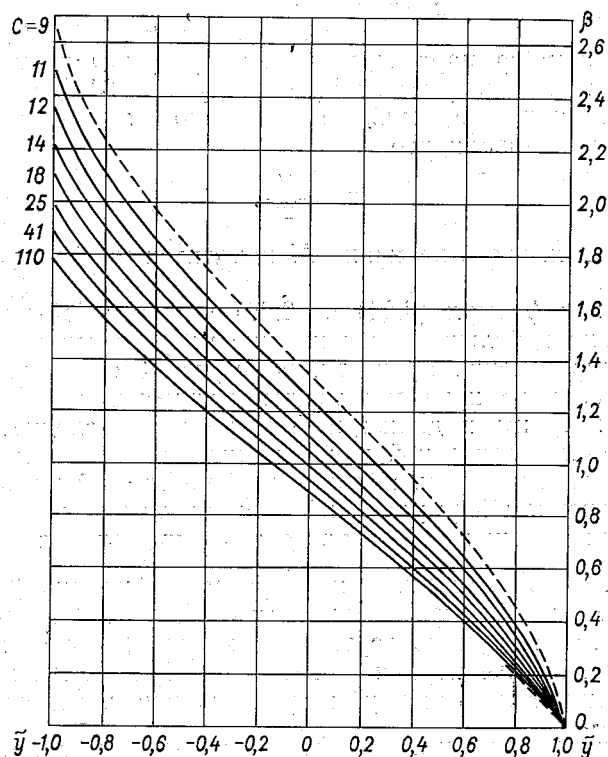


Рис. 20. Графики функции $\beta(\tilde{y})$ для расчета распределения мутности по вертикали открытого потока ($0 < \tilde{y} < 1$) и по вертикальному диаметру трубы ($-1 < \tilde{y} < 1$).

оцениваться по-разному. Следует различать среднюю расходную мутность и среднюю субстанциальную мутность. Размерность этих величин одинакова.

Средняя расходная мутность получается в результате осреднения мутности по вертикали или по сечению потока с учетом веса скоростей течения в точках измерения (или вычисления) мутности. Средняя расходная мутность всего потока выражает концентрацию наносов в секундном объеме потока (в объеме секундного расхода); она является характеристикой секундного переноса наносов (расхода наносов P_S) через фиксированный

створ. Величина P_s вычисляется как произведение средней расходной мутности на расход воды. Средняя по вертикали расходная мутность является характеристикой переноса наносов через вертикаль. Умножение средней по вертикали расходной мутности на элементарный расход воды дает элементарный расход наносов.

Средняя субстанциальная мутность получается в результате пространственного осреднения мутности: ее осреднения по площади или по вертикали, но без учета веса скоростей течения. Соответственно будем иметь среднюю субстанциальную мутность участка реки, среднюю субстанциальную мутность поперечного сечения потока (эту величину будем именовать средней субстанциальной мутностью потока) и среднюю по вертикали субстанциальную мутность.

Как видим, понятия расходной и субстанциальной мутности вводятся при осреднении этой величины и целиком определяются способом осреднения. Поэтому ясно, что когда речь идет о мутности в отдельных точках потока, мы будем иметь дело с одной единственной величиной, выражающей мутность воды в точке, как параметр ее качества, характеризующий плотность взвешенного потока в точке, а при умножении на скорость течения в той же точке потока — с единичным расходом наносов.

В настоящей книге, как это вообще принято в гидрологии, средняя расходная мутность будет именоваться средней мутностью потока. Общую среднюю мутность будем обозначать через $S_{ср}$, а частную — через $s_{срi}$. Для средней субстанциальной мутности всегда будем использовать ее полное наименование. Общую среднюю субстанциальную мутность будем обозначать через $S_{ср.с.}$, а частную — $s_{ср.сi}$.

При определении выноса рекой наносов в море, озеро или водохранилище, а также при оценке качества воды всего речного стока, поступающего в водоем или полностью используемого для хозяйственных целей (водоснабжение, орошение и т. п.), необходимо рассматривать среднюю мутность потока (расходную). При оценке качества воды в створе водозабора, отбирающего некоторую долю речного стока, следует пользоваться средней субстанциальной мутностью в сечении реки или соответственно на той или иной вертикали в зависимости от расположения водозабора. При детальном расчете качества воды, поступающей в водозаборы, следует пользоваться данными, характеризующими мутность водных масс в той точке сечения потока, в которой установлен водозабор.

Ниже мы увидим, что при решении практических задач во многих случаях вместо средней субстанциальной мутности можно использовать среднюю расходную мутность, и наоборот. Это обусловлено тем, что численные значения этих величин часто оказываются очень близкими, а точность измерения мутности в реках вообще невелика. Тем не менее не следует забывать

о принципиальном различии этих величин и о возможных случаях их существенного несовпадения. Способ перехода от $S_{\text{ср. с}}$ к $S_{\text{ср. с}}$ и обратно будет рассмотрен в следующем разделе.

Чтобы получить среднюю по вертикали частную субстанциальную мутность водных масс, необходимо проинтегрировать уравнение вертикального распределения мутности от поверхности до дна потока и разделить интеграл на глубину вертикали H . Используя уравнение (3.24), выполняем указанные операции

$$S_{\text{ср. с}i} = \frac{s_{Hi}}{H} \int_0^H e^{-aG_i \beta\left(\frac{y}{H}\right)} dy. \quad (3.32)$$

Учитывая выражение функции $\beta\left(\frac{y}{H}\right)$ по формуле (3.22), записываем

$$S_{\text{ср. с}i} = \frac{s_{Hi}}{H} e^{-aG_i \arcsin \sqrt{P}} \int_0^H e^{aG_i \arcsin\left(\sqrt{P} \frac{y}{H}\right)} dy. \quad (3.33)$$

После интегрирования и преобразований получаем

$$S_{\text{ср. с}i} = s_{Hi} f_i, \quad (3.34)$$

где f_i — функция коэффициента Шези C и безразмерной величины G_i , а именно

$$f_i = 1 - \frac{aG_i (aG_i \sqrt{P} - \sqrt{1-P} - e^{-aG_i \arcsin \sqrt{P}})}{\sqrt{P} (a^2 G_i^2 + 1)}. \quad (3.35)$$

Содержащиеся здесь величины a , G_i и P вычисляются соответственно по формулам (3.25), (3.26), (3.16) и (3.18). Для упрощения расчетов на рис. 21 даны графики функции $f_i(C, G)$, построенные для всей области наиболее часто встречающихся значений аргументов C и G . Для промежуточных значений C функцию f_i следует получать по интерполяции между кривыми.

Остановимся на вопросе о вычислении общей средней по вертикали субстанциальной мутности $S_{\text{ср. с}}$. Для этого надо знать процентное содержание отдельных фракций в общей массе содержащихся в потоке наносов. Гранулометрический состав транспортируемых наносов, т. е. состав наносов в объеме секундного расхода потока, и наносов, содержащихся в контрольном объеме потока, охватывающем все его поперечное сечение и имеющем в направлении течения размер 1 м, принципиально должен различаться. Однако простейшие расчеты показывают, что это различие не может быть значительным и в общем случае вполне укладывается в границы ошибок, допускаемых при определении гранулометрии транспортируемых наносов. Учитывая сказанное, будем считать, что измерения гранулометрического состава наносов, выполняемые обычными, принятыми на

гидрологической сети Гидрометслужбы СССР методами, предусматриваемыми, в частности, осреднение проб по всему сечению реки, могут использоваться для оценки частных значений как средней субстанциальной, так и средней расходной мутности. Заметим, что те же характеристики гранулометрического

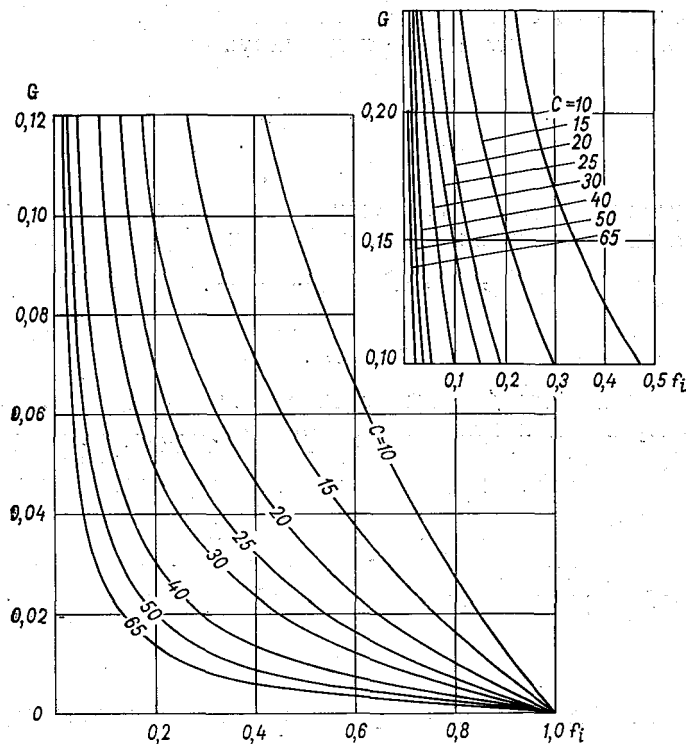


Рис. 21. График функции $f_i(C, G)$.

состава наносов во многих случаях мы вынуждены относить и к отдельным вертикалям ввиду отсутствия других данных.

Обозначим через $\alpha_{срi}$ процентное содержание i -той фракции в составе транспортируемых потоком наносов. Согласно принятому условию напишем:

$$\left. \begin{aligned} s_{срi} &\approx \frac{\alpha_{срi}}{100} S_{ср} \\ s_{ср.ci} &\approx \frac{\alpha_{срi}}{100} S_{ср.c} \end{aligned} \right\} \quad (3.36)$$

В дальнейшем изложении знак приближенности равенства будем опускать.

Общая средняя субстанциальная мутность выразится суммой

$$S_{\text{ср. с}} = \sum_{i=1}^m s_{\text{ср. с}i}, \quad (3.37)$$

где $s_{\text{ср. с}i}$ вычисляется по формуле (3.34). Величину $S_{\text{ср. с}}$ можно представить и в другом виде, более удобном для вычислений, связав $S_{\text{ср. с}}$ с общей донной мутностью S_H . Записывая формулу (3.34) относительно s_{Hi} и суммируя частные значения донной мутности по всем фракциям, получаем

$$S_H = \sum_{i=1}^m \frac{s_{\text{ср. с}i}}{f_i}. \quad (3.38)$$

Подставляя сюда выражение $s_{\text{ср. с}i}$ согласно зависимости (3.36) и разрешая уравнение относительно $S_{\text{ср. с}}$, находим

$$S_{\text{ср. с}} = S_H \frac{1}{\sum_{i=1}^m \frac{\alpha_{\text{ср}i}}{100f_i}}. \quad (3.39)$$

Отсюда видно, что для вычисления общей средней субстанциальной мутности необходимо знать гранулометрический состав транспортируемых наносов и донную мутность S_H . Вопрос о вычислении этой последней величины рассматривается ниже, в следующем разделе.

Соотношение между значениями средней субстанциальной и средней расходной мутности $S_{\text{ср}}$ будет дано ниже, после вывода расчетной формулы для $S_{\text{ср}}$ при рассмотрении транспортирующей способности потока.

3.2. Взаимообмен потока и русла наносами, донная мутность

Во вводной главе настоящей книги кратко рассматривался вопрос о взаимодействии потока и русла и указывалось, что одной из важнейших форм этого взаимодействия является взаимодействие потока и русла наносами. Взаимообмен наносами заключается в постоянно наблюдающемся осаждении частиц наносов на дно и взмыве их с его поверхности. Процесс может быть сбалансированным, когда количество наносов, выпадающих из потока, равно количеству наносов, взмытых с поверхности русла. Несбалансированный обмен имеет место как при дефиците наносов в потоке, когда наблюдается размыв русла, так и при их избытке, когда происходит намыв (заиление) русла.

Взаимообмен наносами в русловых потоках обусловлен турбулентностью потока, в первую очередь восходящими и нисходящими пульсационными течениями, и зависит от параметров перемещаемых наносов — их гидравлической крупности и начальной

скорости влечения частиц. При гладкой форме русла области восходящих и нисходящих пульсационных токов (вихрей) располагаются беспорядочно над его поверхностью, непрерывно сменяя друг друга. Вследствие этого дно потока представляет собой поле быстро чередующихся зон взмыва и осадения наносов. При грядовой форме русла области восходящих и нисходящих вихрей у дна довольно определенно разграничены. В соответствии с этим разграничены и области преобладающего взмыва и осадения наносов. Взмыв наносов приурочен к тыльному склону гряды, а осадение — к ее фронтальному склону и подвалю. Аналогичную картину можно наблюдать и на других, более крупных морфологических образованиях русла. Этим объясняется тот факт, что даже при сбалансированном обмене наносами потока и русла происходит деформация дна, заключающаяся в перемещении русловых аккумулятивных образований, т. е. имеют место частные сбалансированные деформации дна, которое в среднем характеризуется равновесным состоянием. При несбалансированном взаимодействии в рассматриваемом случае снижение средней высотной отметки русла будет происходить за счет преобладания размывов на тыльных склонах гряд над отложением наносов в подвалах или же будет иметь место общее поднятие русла за счет преобладания аккумуляции в подвалах гряд над эрозией их тыльных склонов. Движение гряд при этом не прекращается, хотя форма гряд должна быть, по-видимому, несколько иной, чем в случае сбалансированного обмена наносами.

Верхний слой наносов, покрывающих русло, характеризующийся взаимодействием частицами наносов с потоком, именуется, как отмечалось выше, активным слоем русла, а наносы, составляющие этот слой, — донными наносами. Нередко в составе наносов активного слоя русла присутствуют крупные частицы, которые могут передвигаться в потоке лишь в периоды очень высокой водности или же вообще оказываются неподвижными.

Подвижные наносы активного слоя могут быть разделены на категории в зависимости от их поведения в потоке. Критериями, на основании которых выполняется это деление, являются соотношения между гидравлической крупностью частицы u и параметрами пульсации ω и ω_{\max} вертикальной составляющей скорости, а также между начальной скоростью влечения частицы $v_{\text{нач}}$ и средней скоростью потока $v_{\text{ср}}$.

К категории I относятся частицы наносов, гидравлическая крупность u которых меньше ω , т. е. среднего абсолютного значения вертикальной составляющей пульсационной скорости ($u < \omega$). Эти наносы переносятся сравнительно устойчиво во взвешенном состоянии и могут проходить в потоке без остановки сравнительно большие пути.

Категорию II составляют частицы наносов, имеющие гидравлическую крупность, заключенную в пределах $\omega < u <$

$\omega_{\text{макс}}$. Наносы этой категории переносятся в неустойчивом взвешенном состоянии и путем сальтации. С поверхности дна они увлекаются при прохождении интенсивных вихрей, сопровождающихся мощными вертикальными пульсационными течениями. На пути от дна к поверхности эти наносы постепенно выпадают, хотя отдельные частицы могут достигать даже поверхности потока. В придонном слое наносы этой категории сальтируют, а при снижении пульсирующей продольной скорости — перекачиваются по дну.

К категории III принадлежат частицы, крупность которых удовлетворяет неравенствам $u \geq \omega_{\text{макс}}$, а $v_{\text{нач}} < v_{\text{ср}}$. Наносы не взвешиваются, они транспортируются в придонном слое потока путем скольжения, перекачивания и сальтации. Эта категория соответствует влекомым наносам в собственном смысле слова.

Категорию IV составляют неподвижные наносы донных отложений; их начальная скорость удовлетворяет неравенству $v_{\text{нач}} \geq v_{\text{ср}}$.

Наносы, формирующие верхний активный слой русла и находящиеся во взаимодействии с потоком, т. е. донные наносы, состоят из частиц всех указанных выше четырех категорий. В составе донных наносов процентное содержание частиц категорий I—III иное, чем в составе транспортируемых наносов. Очевидно, что гранулометрический состав донных наносов всегда будет характеризоваться сравнительно большим содержанием крупных частиц и меньшим содержанием мелких частиц, чем состав транспортируемых наносов.

При изменениях гидравлических элементов речного потока во времени, по длине реки или по ширине наносы одинаковых размеров могут перемещаться по-разному, т. е. могут менять свою принадлежность к той или иной категории. Это значит, что рассмотренную классификацию наносов следует применять для отдельных участков речного потока и определенных фаз гидрологического режима, характеризующихся конкретными значениями гидравлических элементов.

Для количественной характеристики условий взаимообмена наносами потока и русла, оценки некоторых параметров транспорта наносов и устойчивости русла может быть использована следующая система русловых коэффициентов: 1) коэффициент активности донных отложений μ_a , выражающий возможную степень участия донных наносов в процессе взаимообмена с потоком и формирования общего транспорта наносов, как взвешенных, так и влекомых, при данном гидравлическом режиме; 2) коэффициент взвешивания μ_v , показывающий ту долю донных наносов, которая при определенном режиме потока может переходить во взвешенное состояние; 3) коэффициент устойчивого взвешивания $\mu_{ув}$, выражающий долю наиболее мелких фракций донных наносов, которые при взаимообмене с потоком способны

сравнительно устойчиво поддерживаться во взвешенном состоянии.

Перечисленные коэффициенты находятся по данным гранулометрического анализа донных наносов для конкретных гидравлических условий потока. Способ определения русловых коэффициентов для наглядности покажем на дифференциальном графике гранулометрического состава донных наносов. Заметим, что аналогичные построения могут быть выполнены и при использовании интегральной кривой состава донных наносов.

Построив дифференциальную кривую гранулометрического состава донных наносов (рис. 22), вычисляют для конкретного

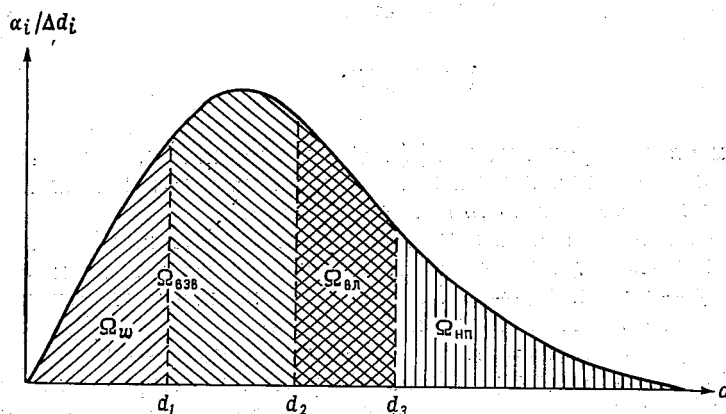


Рис. 22. Дифференциальный график состава наносов.

режима потока величины w и w_{\max} по формулам, приведенным в соответствующих разделах. Определяют, какие значения диаметра частиц соответствуют указанным величинам. Полагая, что $w = u$, находят по шкале гидравлической крупности соответствующее значение диаметра частицы, т. е. d_1 . Таким же образом определяют величину d_2 по предельному условию взвешивания $u_{\text{пред}} = w_{\max}$. Величине $u_{\text{пред}}$ отвечает d_2 . Откладывая на абсциссе дифференциального графика состава наносов значения d_1 и d_2 и проводя вертикальные линии, получают слева от этих линий соответственно площади графика Ω_w и $\Omega_{\text{взв}}$.

Далее необходимо найти границу d_3 , отвечающую наибольшей крупности влекомых наносов. Для этой цели используем следующую, упоминавшуюся выше, формулу начальной скорости влечения:

$$v_{\text{нач}} = u \sqrt{\frac{jf_0 N}{a^2 N + jf_0}} \quad (3.40)$$

(обозначения см. в разделе 2.3).

Заменяя здесь $v_{\text{нач}}$ средней скоростью потока $v_{\text{ср}}$, определяют величину d , отвечающую предельной крупности передвигаемых

частиц, т. е. величину d_3 . Нанеся на график границу d_3 , получаем справа от нее неподвижные наносы, а слева — влекомые и взвешенные.

Вся площадь графика $\Omega_{\text{общ}}$ равна 100%; площади $\Omega_{\text{взв}}$, $\Omega_{\text{вл}}$ и $\Omega_{\text{пл}}$, выраженные в процентах, в сумме дают 100%. Для вычисления русловых коэффициентов имеем следующие зависимости:

$$\left. \begin{aligned} \mu_a &= \frac{\Omega_{\text{взв}} + \Omega_{\text{вл}}}{\Omega_{\text{общ}}}, \\ \mu_{\text{взв}} &= \frac{\Omega_{\text{взв}}}{\Omega_{\text{общ}}}, \\ \mu_{\text{ув}} &= \frac{\Omega_w}{\Omega_{\text{общ}}}. \end{aligned} \right\} \quad (3.41)$$

Чем ближе русловые коэффициенты к единице, тем интенсивнее процесс взаимобмена потока и русла, тем в большей мере русло может подпитывать поток наносами.

Весьма неблагоприятные условия в отношении размывов русла возникают при $\mu_{\text{ув}} = 1$. Очевидно, что в этом случае также $\mu_{\text{взв}} = 1$ и $\mu_a = 1$. Менее подверженным размыву, хотя еще и очень неустойчивым, является русло при коэффициентах $\mu_{\text{ув}} < 1$, $\mu_{\text{взв}} = 1$, $\mu_a = 1$, а более устойчивым — при $\mu_{\text{ув}} \ll 1$, $\mu_{\text{взв}} < 1$, $\mu_a = 1$. Для устойчивых русел характерны значения $\mu_a < 1$. В дальнейшем полезно установить зависимость степени устойчивости русла к размыву от численных значений μ_a , изменяющихся в пределах $0 < \mu_a < 1$. Русла, проложенные в очень крупном обломочном материале или в скальных породах, характеризуются $\mu_a = 0$.

По русловым коэффициентам можно получить характеристику содержания различных категорий наносов в активном слое русла и составить представление о подвижности донных наносов. Русловые коэффициенты изменяются при изменении расходов воды в реке, отражая изменения и степень подвижности донных наносов. В табл. 9 приведены характерные значения русловых коэффициентов для рек ЕТС и показана их зависимость от обеспеченности расходов воды.

В речной гидротехнике для оценки устойчивости русла в течение многих лет применялось так называемое число В. М. Лохтина, записываемое в виде

$$\varphi_L = \frac{d}{\Delta}, \quad (3.42)$$

где d — средняя крупность донных наносов в миллиметрах; Δ — падение в метрах на километр длины рассматриваемого участка реки.

Таблица 9

Изменение подвижности донных наносов при изменениях расходов воды в реке
(осредненные данные по нескольким равнинным рекам
Европейской территории СССР)

Обеспеченность расхода воды, %	Содержание наносов разных категорий в составе активного слоя русла			
	доля устойчиво взвешиваемых наносов $\mu_{ув}$	доля неустойчиво взвешиваемых наносов $\mu_{взв} - \mu_{ув}$	доля влекомых наносов $\mu_a - \mu_{взв}$	доля неподвижных наносов $1 - \mu_a$
Ср. макс.	0,76	0,19	0,04	0,01
8	0,58	0,32	0,07	0,03
25	0,46	0,39	0,12	0,03
50	0,40	0,38	0,16	0,06
75	0,37	0,37	0,16	0,10
97	0,32	0,33	0,15	0,20

М. А. Великанов показал несовершенство числа Лохтина и предложил следующий критерий устойчивости русла:

$$\varphi_{в1} = \frac{v_{ср}^2}{gd}, \quad (3.43)$$

в котором $v_{ср}$ — средняя скорость течения, м/с; d — средняя крупность донных отложений, метры; g — ускорение свободного падения.

В работе Великанова [18] имеется иной вариант критерия устойчивости русла, а именно

$$\varphi_{в2} = \frac{v_{ср}^2}{gd} - \left(15 + \frac{6}{d}\right). \quad (3.44)$$

Как видим, здесь учитывается формула начальной скорости влечения, предложенная Великановым и Бочковым. Коэффициент $\varphi_{в2}$ возрастает с уменьшением устойчивости русла. Великанов приводит графики изменения $\varphi_{в2}$ во времени в зависимости от расходов воды для рек Амударьи, Волги и Дзорагет. Наибольшие значения $\varphi_{в2}$ получены для р. Амударьи (50—2500), наименьшие для р. Дзорагет (100—300). Большие значения $\varphi_{в2}$ относятся к периодам паводков и половодий, а малые — к межени.

Представляет интерес сравнение параметров устойчивости русла, предложенных Караушевым и Великановым. Такая работа проведена Г. А. Петуховой. Для сравнения она выбрала наиболее чувствительный к гидрологическому режиму параметр Караушева $\mu_{ув}$ и критерий Великанова $\varphi_{в2}$ (рис. 23). Рисунок показывает, что между рассматриваемыми величинами имеется довольно тесная связь. По-видимому, оба критерия пригодны для оценки устойчивости русла, однако предпочтение должно быть отдано коэффициенту $\mu_{ув}$, поскольку при его определении

полностью учитывается состав наносов, а не только их средняя крупность, как в критерии φ_{B2} . Петухова пришла к выводу, что по степени устойчивости при руслоформирующих расходах грунты активного слоя русла можно подразделить на следующие три группы, используя в качестве критериев параметры $\mu_{ув}$ и φ_{B2} :

I — слабо подвижные $0 < \mu_{ув} < 0,5$ $0 < \varphi_{B2} < 100$;

II — подвижные $0,5 < \mu_{ув} < 0,9$; $100 < \varphi_{B2} < 500$;

III — весьма подвижные $0,9 < \mu_{ув} < 1,0$; $\varphi_{B2} > 500$.

Это подразделение грунтов носит до некоторой степени условный характер и должно быть в дальнейшем уточнено.

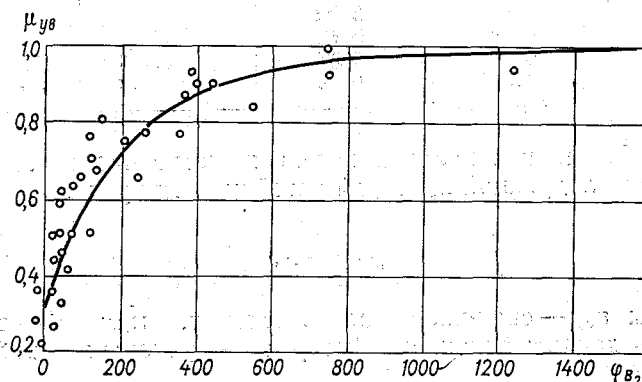


Рис. 23. Связь коэффициента устойчивого взвешивания донных наносов $\mu_{ув}$ и критерия устойчивости русла φ_{B2} .

При рассмотрении критериев подвижности донных отложений следует учитывать, что они не могут дать прямого указания о возможных деформациях русла, поскольку один и тот же состав наносов ведет себя по-разному в потоках, насыщенных, перегруженных и недогруженных наносами. Реально размывы подвижных грунтов на больших участках потоков могут наблюдаться лишь в условиях недогрузки потока наносами.

Теперь перейдем к вопросу о мутности придонного слоя потока. Во-первых, рассмотрим зависимость мутности взыва $S_{взм}$ от гидравлических элементов. Выше отмечалось, что существует предел насыщения потока наносами. Этот предел зависит как от гидравлики потока, так и от состава транспортируемых наносов. Существование предела можно объяснить влиянием насыщения наносами пульсационных индивидуумов придонного слоя (т. е. влиянием общей мутности взыва) на кинематику придонного слоя потока. По-видимому, при насыщении наносами пульсационных индивидуумов происходит их перестройка, нарушение их внутренней структуры с замедлением движения водных масс, находящихся непосредственно в контакте с поверхно-

стью русла. Благодаря этому в последующее мгновение процесс насыщения контактирующего с руслом слоя ослабевает, наносы частично выпадают на дно и вновь восстанавливается первоначальная структура вихрей, а это в свою очередь способствует увеличению взмыва. Таким образом, процесс взмыва можно рассматривать как саморегулирующийся процесс, что непосредственно приводит к выводу о том, что общая мутность взмыва в условиях конкретного потока вообще может достигать лишь определенного предела. В потоке, протекающем в русле, сложенном взвешиваемым материалом или содержащим таковой в активном слое, этот предел всегда оказывается достигнутым. Уточняя, можно сказать, что для достижения указанного предела достаточным условием является неравенство $\mu_{взм} > 0$.

Поскольку существует предел общей мутности взмыва и, как будет сказано ниже, существует определенная закономерная связь между мутностью взмыва и средней мутностью потока, постольку должен существовать и предел средней мутности потока; а следовательно, и предел расхода наносов. Этот предельный расход наносов определяет транспортирующую способность потока. Под предельным расходом следует понимать не абсолютный предел, а предел нормального транспортирования, при превышении которого поток начинает постепенно осаждать наносы.

Трактовка мутности взмыва потока, содержащего наносы и протекающего по неразмываемому руслу (например, в канале с твердым покрытием или в трубе), ничем не отличается от той, которая была дана выше, так как нельзя представить себя совершенно свободное от частиц наносов русло, ограничивающее поток, несущий наносы. Разница будет заключаться лишь в том, что мутность взмыва такого потока может быть меньше предельной; соответственно при этом не будет реализована и транспортирующая способность потока.

В. М. Маккавеев [97, 98] на основании общих соображений предложил следующую формулу для общей мутности взмыва:

$$S_{взм} = a \frac{v_H^2}{H}, \quad (3.45)$$

где v_H — донная скорость; H — глубина потока; a — постоянный коэффициент.

В работах А. В. Караушева [54, 58] показано, что формула (3.45) подтверждается натурными данными только при переменном коэффициенте a . Было установлено, что этот коэффициент зависит от безразмерного числа N , являющегося функцией коэффициента Шези C . Формула N приводилась выше. Обработка большого экспериментального и натурального материала позволила получить формулу мутности взмыва в следующем виде:

$$S_{взм} = 0,15 N \eta^2 \frac{v_{cp}^2}{H}; \quad (3.46)$$

мутность выражается в кг/м^3 . Содержащаяся в формуле величина η является отношением донной скорости к средней. Квадрат этой величины определяется по приближенной формуле

$$\eta^2 = \frac{0,53C - 4,1}{C - 2}, \quad (3.47)$$

где C , как и прежде, коэффициент Шези.

Для сильно насыщенных потоков в порядке обобщения формулы (3.46) можно принять

$$S_{\text{взм}} = 0,20 \frac{\rho_{\text{см}}}{\rho_s - \rho_{\text{см}}} N \eta^2 \frac{v_{\text{ср}}^2}{H}, \quad (3.48)$$

где ρ_s — плотность частиц наносов; $\rho_{\text{см}}$ — плотность взвесенесущего потока (смеси воды с наносами).

Формула мутности взмыва (3.48), как и формула (3.46), является приближенной, поэтому в ней учитывается только влияние изменения плотности взвесенесущего потока на его транспортирующую способность, но не принимается во внимание влияние изменения вязкости среды. Учитывая приближенность решения, будем определять величину $\rho_{\text{см}}$ по среднему насыщению потока наносами $S_{\text{ср}}$ без учета распределения мутности по вертикали. Соответственно величина $\rho_{\text{см}}$ определяется соотношением

$$\rho_{\text{см}} = \rho \left(1 - \frac{S_{\text{ср}}}{\rho_s} \right) + S_{\text{ср}}. \quad (3.49)$$

Здесь средняя мутность $S_{\text{ср}}$, а также плотность воды и смеси выражены в кг/м^3 . Очевидно, что $\rho_{\text{см}}$ в зависимостях (3.48) и (3.49) учитывает среднюю по сечению плотность взвесенесущего потока. Вычисление мутности взмыва сильно насыщенного потока производится по формулам (3.48) и (3.49) методом последовательного приближения, причем при вычислениях используется также и соотношение между $S_{\text{ср}}$ и $S_{\text{взм}}$, которое рассматривается в следующем разделе.

При вычислениях $S_{\text{взм}}$ надо иметь в виду, что эта величина не может превысить очевидного предела: в единице объема движущейся суспензии не может быть большей массы твердых частиц, чем в единице объема донных отложений (грунта), находящегося во взаимодействии с потоком. Этот предел выражается следующим образом:

$$S_{\text{взм}} \leq \rho_{\text{отл}}. \quad (3.50)$$

Если $S_{\text{взм}}$ по формуле (3.46) получается больше $\rho_{\text{отл}}$, то для этой величины принимается предельное значение $S_{\text{взм}} = \rho_{\text{отл}}$.

Рассмотрим, следуя рассуждениям автора [54, 58], процесс вертикального турбулентного переноса наносов в придонном слое потока. Процесс турбулентного обмена здесь можно представить себе как взаимно компенсирующееся перемещение вверх

и вниз объемов жидкости, составляющих части пульсационных объемов или вихрей. Объемы, опускающиеся ко дну, в среднем имеют мутность S_H , а мутность объемов, отрывающихся от дна и перемещающихся вверх, в среднем равна мутности взмыва $S_{взм}$.

Скорость вертикального перемещения жидких объемов при их движении вверх и вниз определяется величиной вертикальной составляющей пульсационной скорости. Абсолютное значение мгновенной вертикальной составляющей скорости обозначим через v'_y . В соответствии с принятым направлением оси y (от поверхности ко дну) будем считать нисходящие пульсационные токи положительными, а восходящие — отрицательными. Скорость перемещения частиц при движении вверх для каждого момента определяется разностью между v'_y и гидравлической крупностью u . Если в данный момент $v'_y \leq u$, то частица не взвешивается. В последующий момент времени в случае увеличения v'_y эта частица может быть взвешена.

Скорости перемещения вверх наносов, оторвавшихся от дна, для каждого момента времени и для каждой частицы различны и равны разности $v'_y - u$. Скорости опускания частиц, находящихся внутри нисходящих токов, равны сумме $v'_y + u$. Кроме того, может происходить опускание наносов, находящихся внутри восходящих токов пульсации, если в данный момент $v'_y < u$. Скорость такого опускания будет равна $u - v'_y$. Все эти особенности вертикального движения частиц учитываются в рассматриваемом ниже решении.

Как видим, при изучении условий отрыва частиц от дна необходимо учитывать изменение пульсационных скоростей во времени. В первом разделе настоящей главы уже отмечалось, что распределение во времени пульсационных скоростей в отдельных точках турбулентного потока может быть аппроксимировано законом нормального распределения Гаусса. Это относится и к точкам, находящимся вблизи от дна, о чем свидетельствуют, в частности, данные экспериментальных исследований Е. М. Минского [109]. Основным параметром кривой нормального распределения является среднее квадратическое отклонение, которое, имея в виду распределение скорости, будем обозначать через σ_v . От этой величины удобно перейти к среднему из абсолютных отклонений w , которое может быть вычислено по приводившейся в настоящей книге полуэмпирической формуле. При нормальном распределении

$$w = 0,798\sigma_v. \quad (3.51)$$

Для учета взаимодействия скоростей всего спектра пульсации с частицами наносов удобно разбить кривую распределения на интервалы и для каждого из них определить среднее значение

пульсационного отклонения v'_{yj} и соответствующую ему частную площадь Δf_j кривой распределения. Эта кривая может быть построена в масштабе величины ω . Части площади кривой, находящиеся за пределами значений $\pm 4\omega$, без практически ощутимой ошибки могут быть отброшены.

Рассмотрим отдельно положительную и отрицательную ветви кривой распределения и ограничиваемые ими площади разделим на n интервалов. Таким образом вся площадь кривой распределения будет разделена на $2n$ интервалов. В первом приближении можно было бы принять

$$\sum_{i=1}^{2n} \Delta f_i = f \approx 1, \quad (3.52)$$

однако в рассматриваемом ниже выводе оказалось достаточно удобным принять истинное значение площадей Δf_i , сумма которых немного меньше единицы. Выразим величины v'_{yj} и Δf_j через ω и f путем введения переходных множителей k_j и b_j , т. е. примем:

$$\left. \begin{aligned} v'_{yj} &= k_j \omega, \\ \Delta f_j &= b_j f \approx b_j. \end{aligned} \right\} \quad (3.53)$$

Представим себе условно сглаженную поверхность русла и расположим параллельно ей на весьма малой высоте δ контрольную площадку $\Delta\omega$, которую ввиду малости среднего продольного уклона русла будем считать горизонтальной. Расстояние δ площадки от дна несоизмеримо меньше глубины потока H (т. е. $\delta \ll H$). Такое условие позволяет принимать с достаточным приближением, что все наносы, переместившиеся через площадку сверху вниз, оказались на дне. Будем считать, что размер площадки $\Delta\omega$ достаточно мал и соизмерим с линейными горизонтальными размерами восходящих или нисходящих пульсационных течений.

Рассматриваемая модель обмена потока и русла наносами, предполагающая сглаженное русло, характеризующееся беспорядочным расположением над его поверхностью восходящих и нисходящих пульсационных токов, знаки которых меняются не только в пространстве, но и во времени, без труда распространяется и на случай грядового русла, когда восходящие и нисходящие вихри приурочены к определенным элементам гряд. Для этого фигурирующий в решении период осреднения T достаточно увеличить так, чтобы под фиксированной площадкой $\Delta\omega$ успели пройти все фазы гряды. Одновременно следует считать неизменным среднее расстояние δ от площадки до поверхности гряды. Площадка $\Delta\omega$ при этом будет совершать медленные колебательные движения вниз и вверх, следуя за фазами гряды и сохраняя в плане неизменность своего положения.

В процессе обмена потока и русла наносами через контрольную площадку $\Delta\omega$ будут перемещаться то вверх, то вниз порции наносов, имеющие массу ΔM_s . Рассмотрим вертикальный перенос через площадку $\Delta\omega$ наносов i -той фракции (с гидравлической крупностью u_i). Определим результирующий вертикальный перенос этих наносов Δq_{si} через площадку за время ΔT_j . Направляя (как и ранее) вертикальную ось y от поверхности потока ко дну, будем считать положительным перемещение (и расход) вниз, а отрицательным — вверх. В момент пересечения площадки объемы, идущие сверху вниз, будут в среднем иметь частную мутность s_{Hi} (донная мутность), а объемы, движущиеся вверх, в момент пересечения площадки — соответственно частную мутность $s_{взми}$ (мутность взмыва).

Перенос масс наносов i -той фракции через площадку $\Delta\omega$ за интервал времени ΔT_j при нисходящих и восходящих течениях соответственно выразится равенствами:

$$\left. \begin{aligned} (+) \Delta M_{ji} &= s_{Hi} \Delta\omega (v'_{yi} + u_i) \Delta T_j, \\ (-) \Delta M_{ji} &= s_{взми} \Delta\omega (v'_{ij} - u_i) \Delta T_j. \end{aligned} \right\} \quad (3.54)$$

Интервал ΔT_j можно представить в долях полного периода осреднения T путем введения коэффициента b_j , т. е.

$$\Delta T_j = b_j T. \quad (3.55)$$

Преобразуем выражения переноса наносов, вводя в них коэффициенты k_j и b_j , и получим соответственно следующие равенства:

$$\left. \begin{aligned} (+) \Delta M_{ji} &= s_{Hi} \Delta\omega (k_j \omega + u_i) b_j T, \\ (-) \Delta M_{ji} &= s_{взми} \Delta\omega (k_j \omega - u_i) b_j T. \end{aligned} \right\} \quad (3.56)$$

Составляя такие выражения для всех выделенных интервалов кривой распределения от 1 до n для положительных v'_y и от 1 до n для отрицательных v'_y , можем написать уравнение полного результирующего переноса Δq_{si} за время T , т. е. за время всех $2n$ интервалов ΔT_j , отвечающих как положительным, так и отрицательным v'_y . При этом получаем

$$\begin{aligned} \Delta q_{si} &= s_{Hi} \Delta\omega T [(k_1 \omega + u_i) b_1 + \dots + (k_n \omega + u_i) b_n] - \\ &- s_{взми} \Delta\omega T [(k_1 \omega - u_i) b_1 + \dots + (k_n \omega - u_i) b_n]. \end{aligned} \quad (3.57)$$

Секундный вертикальный результирующий расход наносов i -той фракции через единицу поверхности горизонтальной площадки $\Delta\omega$, обозначаемый через q_{si} , находится непосредственно из уравнения (3.57) путем деления последнего на $\Delta\omega T$.

Преобразование получаемого выражения и введение безразмерной величины

$$\varepsilon_i = \frac{u_i}{w} \quad (3.58)$$

дает следующее уравнение:

$$q_{sl} = \omega S_{HI} \sum_{j=1}^n (k_j + \varepsilon_i) b_j - \omega S_{B3MI} \sum_{j=1}^n [(k_j - \varepsilon_i) b_j]_{k_j > \varepsilon_i}. \quad (3.59)$$

На вторую сумму этого уравнения, учитывающую перенос частиц снизу вверх, накладывается ограничение $k_j \geq \varepsilon_i$, которое показывает, что частицы с рассматриваемой гидравлической крупностью u_i не взвешиваются теми пульсационными токами, вертикальная составляющая скорости которых $k_j w \geq u_i$.

Преобразуем уравнение (3.59), вводя в него численные значения b_j и k_j , найденные по кривой нормального распределения. Первая сумма непосредственно дает

$$\sum_{j=1}^n (k_j + \varepsilon_i) b_j = \frac{1}{2} (0,97 + \varepsilon_i). \quad (3.60)$$

Получение здесь числа 0,97 вместо единицы обусловлено тем, что в решении отброшены крайние отрезки кривой распределения, отвечающие абсолютным величинам $|v'_y| > 4w$. Пульсации, характеризующиеся такими большими скоростями имеют

столь короткое время действия, что не могут заметно повлиять на процесс взвешивания наносов. Именно этим обусловлено принятое нами ограничение в отношении пульсационной скорости.

Преобразуя вторую сумму уравнения, вводим некоторую функцию $\Phi(\varepsilon)$, определяемую формулой

$$\Phi_i = \frac{2 \sum_{j=1}^n [(k_j - \varepsilon_i) b_j]_{\varepsilon_i \leq k_j}}{0,97 + \varepsilon_i}. \quad (3.61)$$

На рис. 24 изображен график функции $\Phi(\varepsilon)$. При вычислении Φ по формуле (3.61) учитываются только те члены суммы, которые удовлетворяют неравенству $\varepsilon_i \leq k_j$ и оказываются положительными; отрицательные члены отбрасываются.

Теперь можно в окончательном виде записать уравнение вертикального результирующего расхода наносов частной фракции у дна

$$q_{sl} = \frac{w}{2} (S_{HI} - \Phi_i S_{B3MI}) (0,97 + \varepsilon_i). \quad (3.62)$$

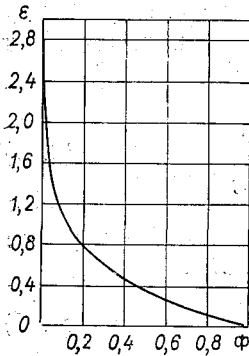


Рис. 24. График функции $\Phi(\varepsilon)$.

Общий результирующий расход всех фракций q_s через единицу поверхности горизонтальной площадки, расположенной на дне потока, находится простым суммированием расходов частных фракций

$$q_s = \frac{w}{2} \sum_{i=1}^m (0,97 + \varepsilon_i) (S_{Hi} + \Phi_i S_{взмi}), \quad (3.63)$$

где m — число взвешиваемых фракций.

Положительные значения q_s и q_{si} показывают преобладание осаждения над взвешиванием наносов, т. е. что имеет место заиление. Отрицательные значения этих величин соответствуют преобладанию взвешивания над осаждением, т. е. размыву.

Случай установившегося взвешивания отвечает отсутствию деформаций русла, т. е. $q_s = 0$. Для частной фракции имеем то же условие. На основании этого условия находим соотношения между мутностью взмыва и донной мутностью при установившемся взвешивании. Они имеют вид:

$$S_{Hi} = \Phi_i S_{взмi}, \quad (3.64)$$

$$S_H = \sum_{i=1}^m \Phi_i S_{взмi}. \quad (3.65)$$

Фигурирующая в этих формулах частная мутность взмыва $S_{взмi}$ вычисляется по следующему соотношению:

$$S_{взмi} = \frac{\alpha_{взмi}}{100} S_{взм}, \quad (3.66)$$

где $S_{взм}$ — общая мутность взмыва, определяемая по формуле (3.46); $\alpha_{взмi}$ — процентное содержание наносов i -той фракции в составе мутности взмыва, или, что равносильно, в составе взвешиваемой части донных наносов.

О способе выделения взвешиваемых наносов из состава донных отложений активного слоя русла подробно говорилось выше. Здесь приведем расчетную зависимость для $\alpha_{взмi}$. Обозначим через $\alpha_{днi}$ — процентное содержание i -той фракции в составе донных наносов (наносов активного слоя русла). Для перехода к гранулометрическому составу взвешиваемой части донных наносов используется коэффициент взвешивания $\mu_{взм}$, выражающий именно долю взвешиваемых наносов в общем составе активного слоя русла. Очевидно, что

$$\alpha_{взмi} = \frac{\alpha_{днi}}{\mu_{взм}}. \quad (3.67)$$

Применение этой формулы к любой взвешиваемой фракции предполагает такую разбивку наносов на фракции, при которой $u_{пред}$ совпадает с какой-либо границей между двумя фракциями. Если такого совпадения не получается, то фракцию, разделенную на две части величиной $u_{пред}$, относят пропорционально

к взвешиваемым и невзвешиваемым наносам при соответствующем изменении гидравлической крупности для обеих ее частей. Подставляя значение $s_{взм i}$ в формулу (3.65), получаем соотношение между значениями общей донной мутности S_H и общей мутности взмыва $S_{взм}$ в виде

$$S_H = S_{взм} \sum_{i=1}^m \frac{z_{взм i}}{100} \Phi_i. \quad (3.68)$$

Имея в распоряжении формулу для вычисления частной донной мутности (3.64), а также приведенное в предыдущем разделе уравнение распределения частной мутности по вертикали, можем вычислить частную мутность на любом расстоянии от поверхности потока. Суммирование частных значений мутности в точках вертикали позволяет построить эпюру общей мутности для условий насыщенного потока. Полученный результат используется при решении задач о транспортирующей способности потока.

Рассмотренная выше модель процесса вертикального турбулентного переноса наносов в придонном слое и полученные зависимости относятся к случаю, когда доля неподвижных наносов в составе активного слоя русла невелика и они практически не экранируют дно и не могут существенно повлиять на процесс обмена наносами потока и русла, а вместе с тем и на процесс насыщения придонного слоя потока наносами. Однако, если доля неподвижных фракций в составе донных наносов превышает 0,15—0,20 (т. е. $1 - \mu_a \geq 0,15 - 0,20$), то экранирующее действие крупных частиц должно учитываться. Вопрос о процессе взмучивания наносов в условиях русла, в значительной мере покрытого крупными фракциями, что характерно для горных рек, детально рассмотрен И. В. Боголюбовой [12], которая отмечает, что в этом случае отрыв мелких частиц от дна и процесс взмучивания происходит через «окна», как могут быть названы промежутки между крупными камнями. В работе Боголюбовой к экранирующим фракциям отнесены невзвешиваемые частицы, удовлетворяющие неравенству $u > 3\omega$. По-видимому, экранирующими частицами целесообразнее считать более крупные, т. е. неподвижные наносы ($v_{нач} > v_{ср}$). Приведенная ниже формула Боголюбовой дается в уточненном виде, учитывая указанный новый предел экранизации. Положив в основу модель обмена, предложенную А. В. Караушевым [58] и рассмотренную выше, Боголюбова пришла к следующему выражению функции $\Phi(\epsilon)$, содержащейся в формуле (3.62) (новая функция обозначена через Φ_{μ}):

$$\Phi_{\mu i} = \frac{1 + \epsilon_i}{1 + \epsilon_i \left(\frac{2}{\mu_a} - 1 \right)} \Phi_i, \quad (3.69)$$

где μ_a , как и выше, — коэффициент активности; Φ_i — функция обмена по Караушеву.

Заметим, что в решении Боголюбовой вместо величины μ_a фигурирует $\mu_{взв}$, что объясняется принятым ею более низким

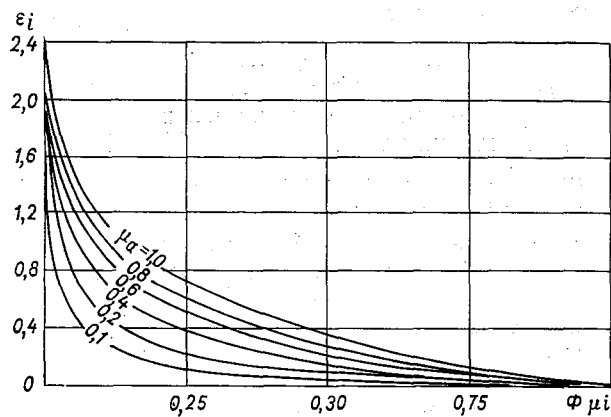


Рис. 25. График функции $\Phi_{\mu_i}(\epsilon_i, \mu_a)$.

пределом экранизации. На рис. 25 представлены графики Φ_{μ_i} как функции двух переменных ϵ и μ_a . В случае если $\mu_a = 1$, функция $\Phi_{\mu_i} = \Phi_i$.

3.3. Транспортирующая способность потока

Имеющиеся в литературе рекомендации по расчету транспортирующей способности потока можно разделить на две группы. К первой принадлежит большое количество работ, в которых предлагаются эмпирические формулы (С. Х. Абальянц, Е. А. Замарин, А. Г. Хачатрян и др.). Многие из этих формул получены на основании изучения гидравлики и режима наносов в лабораторных лотках. Ряд зависимостей относится к условиям среднеазиатских каналов и рек (формулы В. В. Пославского, А. Г. Хачатряна и др.). Сводка большого количества эмпирических формул дается в работах Е. А. Замарина [43], А. В. Ефремова [41], Ю. А. Ибад-Заде [48].

Большинство эмпирических формул после некоторых преобразований можно привести к виду

$$S_{cp} = k \frac{v^m}{H^n U^a}, \quad (3.70)$$

где S_{cp} — средняя мутность потока, отвечающая его транспортирующей способности; v — скорость потока; U — средняя гидравлическая крупность наносов, находящаяся по заданному гранулометрическому составу наносов при учете процентного содержания

фракций; H — глубина потока; численные значения показателей степени m , n , a определяются по эмпирическим данным. Такого рода формулы дают в большинстве случаев удовлетворительные результаты лишь в условиях, для которых они получены.

Довольно широко применяются в практике расчетов эмпирические формулы Замарина, полученные на основании обработки данных полевых исследований среднеазиатских каналов. В свое время эти формулы были рекомендованы в качестве расчетного стандарта в технических нормах (ГОСТ 3908—47).

Для наносов с гидравлической крупностью от 0,002 до 0,008 м/с Замарин предлагает формулу вида

$$S_{\text{ср}} = 0,022 \left(\frac{v_{\text{ср}}}{U} \right)^{3/2} \sqrt{RI}, \quad (3.71)$$

где R — гидравлический радиус потока; I — уклон свободной поверхности.

Для более мелких наносов при $0,0004 \leq U \leq 0,002$ м/с рекомендуется зависимость

$$S_{\text{ср}} = 11 v_{\text{ср}} \sqrt{\frac{R I v_{\text{ср}}}{U}}. \quad (3.72)$$

В 1960 г. автором [58] предложена эмпирическая формула, полученная на основании обработки материалов наблюдений на реках, каналах и в лотках. Формула предложена для расчета движения наносов, имеющих среднюю гидравлическую крупность U от 0,0009 до 0,02 м/с. Указанная формула имеет вид

$$S_{\text{ср}} = 0,36 \frac{N v_{\text{ср}}^2}{H} \left(\frac{v_{\text{ср}}}{U} \right)^{0,75} 10^{-3}, \quad (3.73)$$

где N — характеристическое число турбулентного потока, зависящее от коэффициента Шези S . Все эти формулы дают мутность в кг/м³.

Ко второй группе формул транспорта наносов принадлежат зависимости, полученные в результате комплексных теоретических и экспериментальных работ, раскрывающих в определенной мере физическую сущность процесса перемещения наносов. Полученные таким путем расчетные формулы более универсальны, однако и они требуют специальных рекомендаций к применению для естественных потоков. В ряде случаев необходимо введение корректирующих множителей, вычисляемых на основании результатов измерений в конкретных условиях. Здесь прежде всего следует отметить формулы В. М. Маккаева [98], М. А. Великанова [19], В. Н. Гончарова [26], А. Н. Гостунского [28], И. В. Егiazарова [40], И. Ф. Карасева [51], методы А. В. Караушева [54, 58], К. И. Россинского и

И. А. Кузьмина [145], и др. Великанов, исходя из разработанной им теоретической модели движения наносов, получил следующее выражение средней мутности потока (выражаемой в объемных единицах):

$$S_{\text{ср}} = \frac{1 - \frac{a\sigma}{\beta}}{2} \sqrt{\frac{\left(1 - \frac{a\sigma}{\beta}\right)^2}{4} - \frac{\sigma}{\beta}}, \quad (3.74)$$

где

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{axU}{I \sqrt{gRI}}, \\ \sigma &= \beta \frac{S(1-S)}{1+aS}, \\ a &= \frac{\rho_s}{\rho} - 1 \cong 1,65. \end{aligned} \quad (3.75)$$

Формула Гостунского основана на оценке работы сил взвешивания в русловом потоке; она приводится к виду

$$S_{\text{ср}} U = \frac{3,3 \cdot 10^3 v_{\text{ср}}^3}{C^3 H}, \quad (3.76)$$

где C — коэффициент Шези. Величина мутности определяется по заранее построенной связи $S_{\text{ср}} = f(U)$, где U — средняя гидравлическая крупность взвешенных наносов в м/с. Численный коэффициент зависит от плотности частиц наносов ρ_s . Эта формула дает мутность в кг/м^3 .

В последнее время довольно широкое распространение получил способ оценки транспортирующей способности, разработанный К. И. Россинским и И. А. Кузьминым, принявшими в качестве теоретической основы положение М. А. Великанова о виде обобщающего аргумента, определяющего предельное насыщение потока наносами. На основании многочисленных измерений на реках они пришли к выводу, что в корреляционном поле

$$\lg S_{\text{ср}} = f\left(\lg \frac{v_{\text{ср}}}{(HU)^{1/3}}\right) \quad (3.77)$$

существует зона, ограниченная двумя огибающими, между которыми находятся данные измерений мутности на всех реках.

Особенностью метода Россинского—Кузьмина является различие критериев, определяющих условия недогрузки потока наносами (при размыве) и состояние предельного насыщения. Для определения верхней огибающей, отвечающей насыщению, Россинский предложил формулу

$$S_{\text{ср}} = 0,024 \frac{v^3}{HU}. \quad (3.78)$$

Подобного же вида формула для условий насыщения получена С. Х. Абальянцем [1]. На основании данных по оросительным каналам с песчано-глинистыми наносами он получил коэффициент, равный 0,018. Ф. С. Салаховым [148] предложена формула такого же вида с постоянным коэффициентом 0,013 для условий ирригационных каналов.

Приведенные в качестве примера различные формулы имеют одинаковую структуру и отличаются друг от друга численными коэффициентами и показателями степеней, которые должны определяться на основании материалов натурных измерений.

Широко распространенный за рубежом метод Эйнштейна [191], основанный на статистической теории турбулентного потока и экспериментальных исследованиях, предназначен для расчета расхода наносов по всей толще потока. Однако этот метод отличается громоздкостью и требует наличия большого числа исходных данных: скорость, глубина потока, уклон и другие гидравлические элементы, параметры гранулометрического состава донных отложений $d_{65\%}$ и $d_{35\%}$, сведения о гранулометрии взвешенных наносов. Главное, однако, что создает затруднения в применении метода Эйнштейна, это необходимость наличия данных о мутности в придонной точке потока. Параметры, входящие в основное расчетное уравнение, уточняются в процессе вычисления методом последовательных приближений. Для получения расхода наносов используется уравнение распределения мутности и скорости по вертикали.

В ГГИ в 1951 г. А. В. Караушев разработал теоретический метод расчета транспорта наносов в потоках, который усовершенствован в последующие годы. Этот метод основан на диффузионной теории взвешивания наносов с использованием полуэмпирической формулы мутности взмыва. Он имеет широкий диапазон применения и позволяет более полно учитывать основные факторы, определяющие транспортирующую способность потока, чем рассмотренные выше способы. Метод Караушева имеет то преимущество, что позволяет через мутность взмыва учитывать взаимообмен между взвешенными наносами и донными отложениями. Поэтому при расчете расхода наносов можно использовать как данные о гранулометрии транспортируемых наносов, так и данные о составе донных отложений (в зависимости от того, какой материал имеется в распоряжении). Расчет средней мутности потока, отвечающей его транспортирующей способности, в этом методе ведется по отдельным фракциям наносов, в то время как при использовании большинства упомянутых выше формул гранулометрия наносов учитывается лишь через некоторый осредненный диаметр частиц.

Детально рассмотрим разработанный в ГГИ Караушевым и его сотрудниками метод расчета транспортирующей способности потока. Несколько слов по терминологии. Расход наносов потока, находящегося в состоянии насыщения, измеряет транспор-

тирующую способность этого потока. Среднюю мутность, соответствующую указанному расходу, будем называть мутностью транспортирующей способности.

Пользуясь приведенным в предыдущем разделе уравнением распределения мутности по вертикали речного потока $s(y)$, установим зависимость для его транспортирующей способности. Транспортирующую способность потока можно оценивать применительно как к полному расходу наносов всех фракций, так и к расходам частных фракций, имея в виду вполне определенный заданный состав наносов.

Элементарный расход наносов частной фракции p_s (индекс i пока опускаем), т. е. ее расход на единицу ширины потока, равен взятому от поверхности до дна интегралу произведения функций $v(y)$ и $s(y)$.

Для нахождения выражения p_s воспользуемся эллиптическим уравнением распределения скоростей $v(y)$ и выражением $s(y)$, приведенным выше. Тогда получим

$$p_s = s_H v_0 \int_0^H e^{-aG\beta\left(\frac{y}{H}\right)} \sqrt{1 - P\left(\frac{y}{H}\right)^2} dy, \quad (3.79)$$

где

$$a = \frac{C \sqrt{MC}}{g}, \quad (3.80)$$

$$\beta\left(\frac{y}{H}\right) = \arcsin \sqrt{P} - \arcsin \left(\sqrt{P} \frac{y}{H}\right). \quad (3.81)$$

После подстановки сюда значения β , нахождения квадратуры и после преобразований будем иметь

$$p_s = \frac{s_H v_0 H}{2 \sqrt{P}} \left[\frac{aG(1-2P) + 4\sqrt{P-P^2}}{a^2 G^2 + 4} + \frac{1}{aG} - \left(\frac{1}{aG} + \frac{aG}{a^2 G^2 + 4} \right) e^{-aG \arcsin \sqrt{P}} \right]. \quad (3.82)$$

Непосредственно из эллиптического уравнения распределения скорости находим

$$v_0 = \frac{2v_{cp} \sqrt{P}}{\sqrt{P-P^2} + \arcsin \sqrt{P}}. \quad (3.83)$$

Подставляя значение v_0 в уравнение (3.82), выполняя дальнейшие преобразования и вводя обозначение

$$B = \frac{aG(1-2P) + 4\sqrt{P-P^2}}{(a^2 G^2 + 4)(\sqrt{P-P^2} + \arcsin \sqrt{P})} + \frac{1}{aG} - \left(\frac{1}{aG} + \frac{aG}{a^2 G^2 + 4} \right) e^{-aG \arcsin \sqrt{P}}, \quad (3.84)$$

получаем следующую формулу частного элементарного расхода наносов (для i -той фракции):

$$p_{Si} = H v_{cp} s_{Hi} B_i. \quad (3.85)$$

Для облегчения вычисления расхода наносов составлена таблица и построены графики функции B , зависящей от коэффициента Шези C и безразмерного параметра G , где u — гидравлическая крупность рассматриваемой фракции наносов (рис. 26, табл. 10). Учитывая, что элементарный расход воды определяется равенством

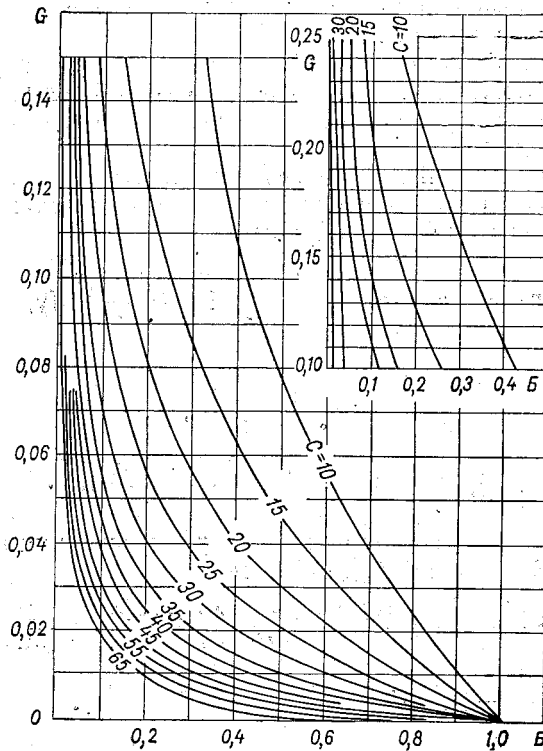


Рис. 26. График функции B (G и C).

циента Шези C и безразмерного параметра $G = \frac{u}{v_{cp}}$, где u — гидравлическая крупность рассматриваемой фракции наносов (рис. 26, табл. 10). Учитывая, что элементарный расход воды определяется равенством

$$q = H v_{cp}, \quad (3.86)$$

запишем уравнение (3.85) следующим образом:

$$p_{Si} = q s_{Hi} B_i. \quad (3.87)$$

Таблица 10

Таблица функции $B(C, G)$

G	C					
	10	20	30	40	50	60
0,000 1	0,998	0,998	0,995	0,992	0,988	0,983
0,001 0	0,989	0,973	0,952	0,922	0,886	0,845
0,002 0	0,982	0,959	0,907	0,852	0,788	0,719
0,003 0	0,972	0,929	0,866	0,790	0,706	0,620
0,005 0	0,955	0,884	0,787	0,678	0,565	0,562
0,010	0,912	0,784	0,628	0,477	0,350	0,253
0,015	0,872	0,703	0,518	0,363	0,251	0,183
0,020	0,835	0,628	0,424	0,273	0,177	0,129
0,030	0,762	0,502	0,292	0,168	0,102	0,069
0,060	0,590	0,300	0,140	0,074	0,046	0,033
0,10	0,425	0,157	0,069	0,039	0,025	0,018
0,16	0,311	0,088	0,040	0,023	0,015	0,010
0,20	0,242	0,071	0,031	0,019	0,013	0,008
0,25	0,155	0,050	0,020	0,014	0,010	0,006

Подставляя сюда значение частной донной мутности по формуле, отвечающей случаю задания состава донных наносов, будем иметь

$$p_{Si} = qS_{\text{взм}} \frac{\alpha_{\text{взм}i}}{100} B_i \Phi_i. \quad (3.88)$$

Общий элементарный расход наносов p_S выразится соотношением

$$p_S = qS_{\text{взм}} \sum_{i=1}^m \frac{\alpha_{\text{взм}i}}{100} B_i \Phi_i. \quad (3.89)$$

Суммирование производится по всем взвешиваемым (m) фракциям наносов. Если задан состав транспортируемых потоком наносов, выражаемый содержанием фракций в процентах $\alpha_{\text{сп}i}$, то формула элементарного расхода p_S записывается в виде

$$p_S = qS_{\text{взм}} \left(\sum_{i=1}^m \frac{\alpha_{\text{сп}i}}{100 B_i \Phi_i} \right)^{-1}. \quad (3.90)$$

Члены, учитывающие гранулометрический состав наносов в формулах (3.88) — (3.90), именуется гидромеханическим параметром наносов и обозначаются через Γ . Соответственно введем и понятие частного гидрохимического параметра (обозначаем Γ_i), характеризующего отдельные фракции, принимая при этом

$$\Gamma_i = B_i \Phi_i. \quad (3.91)$$

При заданном составе донных отложений гидромеханический параметр наносов выражается равенством

$$\Gamma = \sum_{i=1}^m \frac{\alpha_{взм i}}{100} \Gamma_i, \quad (3.92)$$

а при заданном составе транспортируемых наносов будем иметь

$$\Gamma = \left(\sum_{i=1}^m \frac{\alpha_{ср i}}{100 \Gamma_i} \right)^{-1}. \quad (3.93)$$

В случае однородных наносов, когда все частицы можно отнести к одной фракции ($m = 1$, $\alpha_{ср} = \alpha_{взм} = 100$), обе формулы приводят к одинаковому результату, а именно

$$\Gamma = B\Phi. \quad (3.94)$$

Теперь формула элементарного расхода наносов может быть записана в общем виде, отвечающем любому способу задания гранулометрического состава наносов,

$$p_s = qS_{взм} \Gamma. \quad (3.95)$$

В таком виде формула дает элементарный расход наносов в кг/(с · м).

Чтобы вычислить полный по всему сечению потока расход наносов P_s , необходимо определить элементарный расход p_s для средних условий поперечного сечения потока и умножить полученную величину на ширину потока B . Очевидно, что $qB = Q$, где Q — полный расход потока, а q — средний в поперечнике элементарный расход воды. Таким образом, для полного расхода наносов, отвечающего транспортирующей способности потока, можно написать

$$P_s = QS_{взм} \Gamma. \quad (3.96)$$

Если сюда подставить значения гидромеханического параметра наносов Γ , вычисляемого по составу донных отложений ($\alpha_{взм}$) или по составу транспортируемых фракций, то соответственно получим следующие записи формулы расхода наносов:

$$P_s = QS_{взм} \sum_{i=1}^m \frac{\alpha_{взм i}}{100} \Gamma_i, \quad (3.97)$$

$$P_s = QS_{взм} \left(\sum_{i=1}^m \frac{\alpha_{ср i}}{100 \Gamma_i} \right)^{-1}. \quad (3.98)$$

Соответственно для частного расхода наносов i -той фракции p_{si} будем иметь:

при заданном составе донных отложений

$$p_{Si} = QS_{взм} \frac{\alpha_{взм i}}{100} \Gamma_i, \quad (3.99)$$

при заданном составе транспортируемых наносов

$$p_{Si} = QS_{взм} \frac{\alpha_{ср i}}{100 \sum_{i=1}^m \frac{\alpha_{ср i}}{100 \Gamma_i}}. \quad (3.100)$$

Общие и частные значения средней мутности потока, отвечающие транспортирующей способности потока, определяются равенствами:

общее

$$S_{ср} = S_{взм} \Gamma, \quad (3.101)$$

при заданном составе донных наносов

$$s_{ср i} = \frac{\alpha_{взм i}}{100} S_{взм} \Gamma_i, \quad (3.102)$$

при заданном составе транспортируемых наносов

$$s_{ср i} = \frac{\alpha_{ср i}}{100} \frac{S_{взм}}{\sum_{i=1}^m \frac{\alpha_{ср i}}{100 \Gamma_i}}, \quad (3.103)$$

Очевидно, что все вычисления ведутся по средним для сечения потока глубинам, скоростям, значениям коэффициента Шези и т. д. Для расчета принимается средний для потока или русла состав наносов.

Использованные выше частные значения гидромеханического параметра наносов Γ_i , являющегося произведением функций $\Phi(\varepsilon_i)$ и $B(G_i C)$, зависит от трех переменных, т. е. $\Gamma_i(\varepsilon_i, G_i, C)$. Однако аргумент ε может быть выражен в виде функции G и C , соответственно и Γ_i оказывается функцией двух переменных G_i и C , т. е. $\Gamma_i(G_i, C)$. Действительно, учитывая, что

$$\varepsilon_i = \frac{u_i}{w} \quad (3.104)$$

и записывая выражение для среднего абсолютного значения пульсационной скорости w

$$w = \frac{v_{ср}}{\sqrt{N}}, \quad (3.105)$$

где N зависит только от коэффициента Шези C , получаем

$$\varepsilon_i = \frac{u_i}{v_{ср}} \sqrt{N} = G_i f(C). \quad (3.106)$$

Таблица 11
Таблица функции $\Gamma(C, G)$

G	C											
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
0,0001	0,998	0,998	0,998	0,997	0,995	0,992	0,990	0,988	0,986	0,983	0,980	0,977
0,0010	0,982	0,974	0,960	0,950	0,934	0,919	0,900	0,881	0,860	0,838	0,816	0,793
0,0020	0,967	0,950	0,927	0,902	0,874	0,844	0,812	0,778	0,742	0,706	0,669	0,635
0,0030	0,950	0,924	0,894	0,859	0,819	0,778	0,735	0,690	0,645	0,601	0,558	0,519
0,0040	0,935	0,899	0,861	0,815	0,766	0,714	0,665	0,612	0,560	0,512	0,465	0,422
0,0050	0,920	0,876	0,827	0,774	0,716	0,655	0,601	0,543	0,486	0,435	0,387	0,344
0,0060	0,904	0,854	0,797	0,736	0,673	0,607	0,550	0,484	0,428	0,375	0,329	0,288
0,0070	0,890	0,833	0,767	0,701	0,630	0,562	0,496	0,433	0,375	0,326	0,281	0,243
0,0080	0,875	0,812	0,741	0,667	0,591	0,518	0,450	0,388	0,331	0,283	0,240	0,205
0,0090	0,860	0,790	0,713	0,633	0,554	0,478	0,410	0,348	0,292	0,246	0,205	0,174
0,0100	0,845	0,770	0,687	0,604	0,520	0,444	0,373	0,312	0,259	0,214	0,177	0,149
0,015	0,780	0,680	0,576	0,478	0,390	0,312	0,252	0,200	0,160	0,133	0,109	0,094
0,020	0,718	0,599	0,479	0,377	0,290	0,219	0,169	0,129	0,099	0,079	0,066	0,057
0,025	0,662	0,530	0,405	0,303	0,225	0,167	0,123	0,091	0,069	0,053	0,043	0,037
0,030	0,608	0,464	0,337	0,241	0,168	0,122	0,084	0,061	0,044	0,033	0,026	0,021
0,035	0,561	0,414	0,294	0,203	0,139	0,098	0,066	0,048	0,034	0,026	0,019	0,015

σ	C											
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
0,040	0,517	0,368	0,254	0,168	0,110	0,077	0,052	0,036	0,026	0,020	0,015	0,011
0,045	0,476	0,329	0,218	0,138	0,088	0,060	0,039	0,027	0,019	0,0146	0,0110	0,0085
0,050	0,436	0,289	0,185	0,110	0,069	0,044	0,028	0,019	0,014	0,0101	0,0075	0,0062
0,055	0,403	0,261	0,161	0,095	0,058	0,036	0,023	0,0160	0,0110	0,0079	0,0058	0,0045
0,060	0,376	0,236	0,141	0,082	0,049	0,029	0,0188	0,0132	0,0089	0,0062	0,0045	0,0034
0,065	0,349	0,211	0,122	0,065	0,040	0,0237	0,0158	0,0107	0,0058	0,0048	0,0034	0,0027
0,070	0,323	0,188	0,106	0,054	0,032	0,0201	0,0124	0,0084	0,0052	0,0035	0,0027	0,0021
0,075	0,299	0,167	0,088	0,046	0,026	0,0160	0,0102	0,0065	0,0041	0,0029	0,0020	0,0015
0,080	0,280	0,152	0,079	0,041	0,0231	0,0136	0,0084	0,0052	0,0033	0,0023	0,0015	0,00120
0,085	0,260	0,137	0,070	0,035	0,0202	0,0116	0,0069	0,0043	0,0027	0,0018	0,00118	0,00093
0,090	0,241	0,124	0,061	0,031	0,0175	0,0097	0,0058	0,0035	0,0022	0,00140	0,00094	0,00066
0,095	0,224	0,112	0,052	0,027	0,0148	0,0080	0,0046	0,0030	0,00184	0,00114	0,00070	0,00051
0,10	0,207	0,100	0,044	0,023	0,0123	0,0061	0,0038	0,0024	0,00143	0,00090	0,00056	0,00041
0,15	0,115	0,038	0,015	0,006	0,0029	0,0014	0,00068	0,00033	0,00019	0,00010		
0,20	0,060	0,017	0,006	0,0020	0,00077	0,00033	0,00014					
0,25	0,027	0,007	0,0020	0,00053	0,00018							

На рис. 27 изображен расчетный график функции $\Gamma_i(G_i, C)$. Более точные значения Γ_i даются в табл. 11.

Вывод формулы мутности взмыва $S_{взм}$ кг/м³ был рассмотрен в предыдущем разделе. Здесь приведем лишь конечный вид этой формулы в двух вариантах:

для условий сравнительно малой мутности потока

$$S_{взм} = k N \eta^2 \frac{v_{ср}^2}{H}, \quad (3.107)$$

где $k \approx 0,15$,

для очень насыщенных потоков

$$S_{взм} = k_1 \frac{\rho_{см}}{\rho_s - \rho_{см}} N \eta^2 \frac{v_{ср}^2}{H}, \quad (3.108)$$

где $k_1 \approx 0,20$.

Напомним и предельное соотношение, показывающее наибольшую возможную величину $S_{взм}$, а именно

$$S_{взм} \leq \rho_{отл} \cdot 10^{-3} = \rho_{отл}. \quad (3.109)$$

Рассмотрим вопрос о переходе от средней расходной мутности (частной $s_{срi}$ и общей $S_{ср}$) к средней субстанциальной мутности (соответственно $s_{ср.ci}$ и $S_{ср.c}$). Записывая известные соотношения (3.34) и (3.87) в виде:

$$\left. \begin{aligned} s_{ср.ci} &= S_{Hi} f_i, \\ s_{срi} &= S_{Hi} B_i \end{aligned} \right\} \quad (3.110)$$

и делим первое на второе, получаем искомое выражение для перехода от $s_{срi}$ к $s_{ср.ci}$

$$s_{ср.ci} = K_i s_{срi}, \quad (3.111)$$

где

$$K_i = \frac{f_i}{B_i}. \quad (3.112)$$

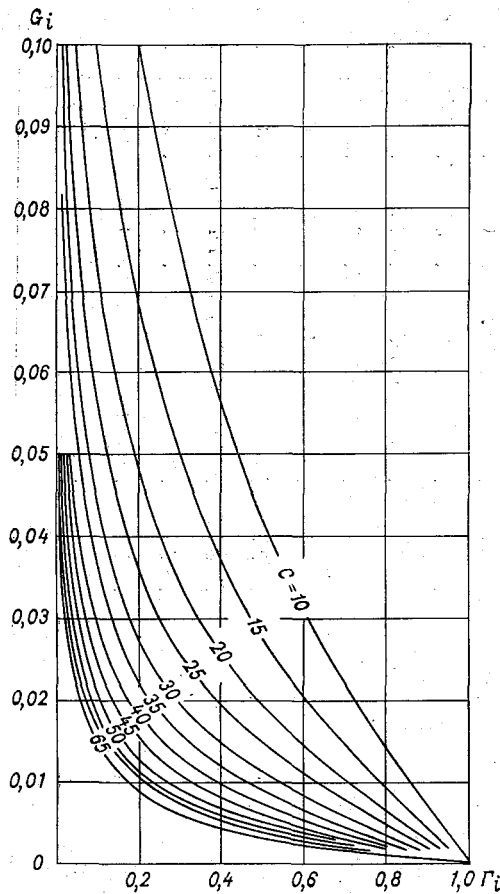


Рис. 27. График функции $\Gamma_i(G_i, C)$.

В практике гидрологических измерений и расчетов обычно получают значения средней расходной мутности. Точность измерений невелика, поэтому значения K_i целесообразно округлить и представить в виде небольшой таблицы как функцию C и G_i (табл. 12).

Таблица 12

Переходные коэффициенты K_i от частной средней расходной мутности к частной субстанциальной мутности

G_i	C				
	10	20	30	40	65
0,000	1,00	1,00	1,01	1,00	1,00
0,001	1,00	1,00	1,01	1,01	1,01
0,005	1,01	1,01	1,01	1,05	1,05
0,010	1,01	1,01	1,05	1,05	1,2
0,030	1,05	1,05	1,2	1,2	1,4
0,060	1,05	1,05	1,2	1,2	1,4
0,100	1,2	1,2	1,4	1,4	1,4
0,200	1,2	1,2	1,4	1,4	1,4

Нетрудно видеть, что общая средняя субстанциальная мутность потока может быть получена из соотношения

$$S_{\text{ср. с}} = \sum_{i=1}^m K_i S_{\text{ср}i}. \quad (3.113)$$

Учитывая, что

$$S_{\text{ср}i} = \frac{\alpha_{\text{ср}i}}{100} S_{\text{ср}}, \quad (3.114)$$

записываем выражение для перехода от $S_{\text{ср}}$ к $S_{\text{ср. с}}$

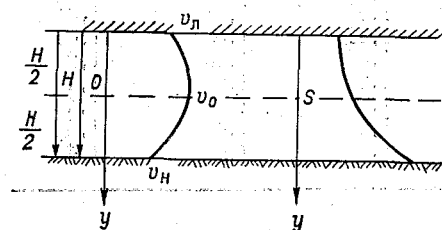
$$S_{\text{ср. с}} = S_{\text{ср}} \sum_{i=1}^m \frac{\alpha_{\text{ср}i}}{100} K_i \quad (3.115)$$

Известно, что при гидрологических измерениях определяется гранулометрический состав транспортируемых наносов, поэтому значения $\alpha_{\text{ср}i}$ оказываются известными и вычисления по формуле (3.115) не встречают затруднений.

В практике расчетов до сих пор отсутствовали зависимости для оценки транспортирующей способности потока, покрытого ледяным покровом. Наличие в потоке двух поверхностей с различной шероховатостью оказывает существенное влияние на гидравлическое сопротивление, распределение скорости и мутности по вертикали. К. В. Разумихина [135] на основе теоретических работ В. М. Маккавеева и А. В. Караушева о распределении

скорости и мутности по глубине получила выражение транспортирующей способности для речного потока при ледяном покрове. Она делит поток, закрытый льдом, на верхнюю и нижнюю зоны, условно принимая, что граница раздела между ними проходит через точку, в которой скорость имеет максимальное значение v_{\max} (рис. 28). В общем случае положение этой точки зависит от соотношения коэффициентов шероховатости нижней поверхности льда и русла; в первом же приближении можно считать ее находящейся в середине вертикали $\left(\frac{1}{2}H\right)$. Здесь H — глубина, отсчитываемая от нижней поверхности льда до дна.

В качестве уравнения распределения скорости по вертикали в потоке, закрытом льдом, может быть использована формула Базена. Если расположить начало координат на динамической оси потока (где $v = v_{\max}$), то для рассматриваемого случая эта формула запишется в виде



$$v = v_{\max} - \frac{M_3 v_{\text{ср}}}{2C_3} \left(\frac{y}{\frac{1}{2}H} \right)^2, \quad (3.116)$$

Рис. 28. Схема распределения скорости и мутности в потоке, закрытом льдом.

где M_3 — параметр Караушева, вычисляемый для закрытого русла по формуле

$$M_3 = 0,7C_3 + 6. \quad (3.117)$$

Эпюра получается симметричной относительно динамической оси потока.

Для удобства дальнейших выкладок целесообразно перенести начало координат y на поверхность раздела воды и льда. Соответственно формула Базена примет вид

$$v = v_{\max} - \frac{2M_3 v_{\text{ср}}}{2C_3 \left(\frac{H}{2}\right)^2} \left(y - \frac{H}{2} \right)^2. \quad (3.118)$$

После простого преобразования получаем

$$v = v_{\max} - \frac{2M_3 v_{\text{ср}}}{C_3} \left(\tilde{y} - \frac{1}{2} \right)^2, \quad (3.119)$$

где $\tilde{y} = \frac{y}{H}$ — относительная глубина погружения точки (от поверхности раздела лед—вода).

Соотношение между средней и максимальной скоростью на вертикали выражается при этом равенством

$$v_{\max} = v_{\text{ср}} \left(1 + \frac{M_3}{6C_3} \right). \quad (3.120)$$

Подставляя последнее равенство в зависимость (3.119), получаем следующее уравнение распределения скорости по вертикали закрытого льдом потока:

$$v = v_{\text{ср}} \left[\beta - \mu \left(\tilde{y} - \frac{1}{2} \right)^2 \right]. \quad (3.121)$$

Здесь использованы обозначения:

$$\left. \begin{aligned} \beta &= 1 + \frac{M_3}{6C_3}, \\ \mu &= \frac{2M_3}{C_3}. \end{aligned} \right\} \quad (3.122)$$

Коэффициент Шези для закрытого льдом потока C_3 вычисляется разработанным Караушевым методом переходных коэффициентов, согласно которому

$$C_3 = k_c C, \quad (3.123)$$

где k_c — множитель, определяемый выражением

$$k_c = \frac{1,26}{\sqrt{1 + \left(\frac{n_d}{n_p} \right)^2}}. \quad (3.124)$$

Коэффициент шероховатости русла (n_p) приближенно находится по формуле

$$n_p = 0,03d^{1/6}, \quad (3.125)$$

где d — эффективный диаметр частиц донных отложений.

Для определения коэффициентов шероховатости нижней поверхности ледяного покрова естественных рек (n_d) применяется известная шкала П. Н. Белокопя.

Для оценки распределения мутности по вертикали воспользуемся формулой В. М. Маккавеева, полученной им при условии постоянства коэффициента турбулентного обмена по вертикали, выражение которого для потока, закрытого льдом, можно представить в виде

$$A_3 = \frac{\rho g H v_{\text{ср}}}{2M_3 C_3}, \quad (3.126)$$

где $H/2$ является гидравлическим радиусом. Подставляя значение A_3 в упомянутую формулу Маккавеева, записываем выражение профиля мутности в виде

$$s_i = s_{Hi} e^{-\frac{2M_3 C_3}{g} \cdot \frac{u_i}{v_{\text{ср}}} (1 - \tilde{y})}. \quad (3.127)$$

Введем безразмерные характеристические числа:

$$\frac{M_3 C_3}{g} = N_3, \quad (3.128)$$

$$\frac{u_i}{u_{cp}} = G_i \quad (3.129)$$

и, используя обозначение

$$a_{3i} = 2N_3 G_i, \quad (3.130)$$

получим следующий вид формулы для распределения частной мутности в потоке, закрытом льдом:

$$s_i = s_{Hi} e^{-a_{3i}(1-\tilde{y})}. \quad (3.131)$$

Подставляя полученные выражения скорости и мутности в уравнение элементарного расхода наносов частной фракции для закрытого потока p_{Siz} и вынося постоянные за знак интеграла, будем иметь

$$p_{Siz} = v_{cp} s_{Hi} \int_0^1 \left[\beta - \mu \left(\tilde{y} - \frac{1}{2} \right)^2 \right] e^{-a_{3i}(1-\tilde{y})} d\tilde{y}. \quad (3.132)$$

После интегрирования и подстановки значений β , μ , a_{3i} получаем следующую формулу:

$$p_{Siz} = q s_{Hi} B_{3i}, \quad (3.133)$$

где q — элементарный расход воды; s_{Hi} — частная донная мутность; B_{3i} — функция C_3 и G_i , определяемая равенством

$$B_{3i} = \left[\frac{g}{C_3^2 G_i} \left(\frac{6,7C_3 + 6}{12M_3} - \frac{g^2}{2M_3^2 C_3^2 G_i^2} - \frac{g}{2M_3 C_3 G_i} - \frac{1}{4} \right) \times \right. \\ \left. \times \left(1 - e^{-\frac{2M_3 C_3 G_i}{g}} \right) + \frac{g^2}{M_3 C_3^3 G_i^2} \right]. \quad (3.134)$$

Далее, как и раньше, величину s_{Hi} выражаем через общую мутность взмыва, т. е. записываем

$$s_{Hi} = \frac{\alpha_{взм i}}{100} \Phi_i S_{взм}; \quad (3.135)$$

все содержащиеся здесь величины определяются таким же образом, как и для открытого потока. Различие в вычислении расхода наносов для открытого и закрытого льдом потоков заключается только в применении различных функций B_i (для открытого потока B_i , а для закрытого B_{3i}). Значения B_{3i} даны в табл. 13, а функция Φ представлена на рис. 24 в разделе 3.2.

Таблица 13

Таблица функций $B_z(C_3 G)$

σ	C_3					
	10	20	30	40	50	60
0,0001	0,999	0,989	0,979	0,972	0,963	0,955
0,0010	0,970	0,935	0,895	0,855	0,810	0,753
0,0020	0,966	0,914	0,848	0,768	0,676	0,585
0,0030	0,958	0,890	0,791	0,677	0,566	0,464
0,0050	0,935	0,823	0,678	0,536	0,412	0,312
0,010	0,873	0,681	0,483	0,327	0,222	0,155
0,015	0,823	0,572	0,360	0,223	0,144	0,099
0,020	0,772	0,486	0,279	0,164	0,105	0,072
0,030	0,686	0,362	0,185	0,105	0,067	0,046
0,060	0,492	0,186	0,085	0,048	0,031	0,022
0,10	0,335	0,104	0,048	0,028	0,018	0,013
0,16	0,211	0,061	0,029	0,017	0,011	0,0080
0,20	0,165	0,047	0,023	0,013	0,0089	0,0069
0,26	0,121	0,035	0,017	0,010	0,0068	0,0045
0,30	0,102	0,030	0,015	0,0088	0,0059	0,0044
0,36	0,082	0,025	0,012	0,0073	0,0049	0,0032
0,40	0,072	0,022	0,011	0,0066	0,0044	0,0032

Общая мутность взмыва (в $\text{кг}/\text{м}^3$) для потока, закрытого льдом, аналогично случаю открытого потока может быть выражена формулой

$$S_{\text{взм. з}} = 0,15 N_3 \eta_B^2 \frac{v_{\text{ср}}^2}{H_{\text{ср}}}; \quad (3.136)$$

здесь N_3 определяется по формуле (3.128); величина η_B выражает переход от средней скорости на вертикали $v_{\text{ср}}$ к донной v_H по параболе Базена

$$\eta_B = 1 - \frac{M}{3C}. \quad (3.137)$$

Параметр M зависит от коэффициента Шези C .

Выражение средней частной мутности для потока, закрытого льдом, записывается в виде

$$S_{\text{зиср}} = \frac{\alpha_{\text{взм}}}{100} \Phi_i B_{\text{зи}} S_{\text{взм. з}}. \quad (3.138)$$

Произведение функций Φ_i и $B_{\text{зи}}$ является частным значением гидромеханического параметра наносов для условий закрытого потока (обозначаем $\Gamma_{\text{зи}}$), т. е.

$$\Gamma_{\text{зи}} = \Phi_i B_{\text{зи}}. \quad (3.139)$$

Значения $\Gamma_{\text{зи}}$ приведены в табл. 14.

Таблица 14

Таблица функций $\Gamma_3(C_9, G)$

C

G	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
0,000 1	0,999	0,995	0,989	0,984	0,978	0,974	0,970	0,966	0,961	0,958	0,952	0,948
0,001 0	0,963	0,942	0,923	0,900	0,879	0,857	0,834	0,812	0,786	0,759	0,727	0,697
0,002 0	0,951	0,921	0,890	0,853	0,817	0,776	0,732	0,685	0,637	0,590	0,545	0,502
0,003 0	0,937	0,897	0,856	0,803	0,748	0,688	0,629	0,572	0,517	0,466	0,418	0,375
0,004 0	0,922	0,864	0,813	0,744	0,677	0,609	0,545	0,483	0,426	0,374	0,327	0,287
0,005 0	0,901	0,836	0,770	0,681	0,617	0,543	0,475	0,411	0,355	0,305	0,261	0,226
0,007 0	0,862	0,783	0,694	0,603	0,516	0,437	0,366	0,305	0,254	0,212	0,176	0,150
0,010	0,809	0,705	0,597	0,494	0,399	0,321	0,256	0,204	0,164	0,133	0,108	0,091
0,015	0,736	0,597	0,469	0,359	0,271	0,205	0,155	0,118	0,092	0,075	0,059	0,049
0,020	0,664	0,508	0,371	0,267	0,190	0,137	0,101	0,076	0,059	0,046	0,036	0,030
0,025	0,603	0,435	0,299	0,203	0,141	0,098	0,071	0,052	0,040	0,031	0,024	0,020
0,030	0,547	0,371	0,243	0,160	0,106	0,072	0,052	0,038	0,029	0,022	0,017	0,014
0,040	0,452	0,276	0,167	0,103	0,066	0,043	0,030	0,021	0,016	0,011	0,008 9	0,007 3
0,050	0,375	0,211	0,119	0,069	0,044	0,028	0,018	0,013	0,009 4	0,007 2	0,005 3	0,004 3
0,060	0,314	0,165	0,088	0,050	0,029	0,018	0,012	0,008 5	0,006 0	0,004 2	0,003 0	0,002 3
0,070	0,265	0,129	0,066	0,036	0,019	0,013	0,007 6	0,005 8	0,003 8	0,002 5	0,001 8	0,001 4
0,080	0,225	0,103	0,051	0,026	0,015	0,009 5	0,005 7	0,003 6	0,002 4	0,001 5	0,001 1	0,000 84
0,090	0,192	0,083	0,039	0,020	0,011	0,006 6	0,003 9	0,002 5	0,001 6	0,001 0	0,000 66	0,000 47
0,10	0,163	0,068	0,029	0,016	0,008 5	0,004 7	0,002 7	0,001 7	0,001 0	0,000 65	0,000 41	0,000 11
0,16	0,068	0,023	0,008 4	0,003 5	0,001 7	0,000 74	0,000 36	0,000 19	0,000 090	0,000 045	0,000 019	
0,20	0,041	0,012	0,003 9	0,001 5	0,000 57	0,000 23	0,000 094	0,000 041	0,000 008			
0,26	0,019	0,004 7	0,001 2	0,000 38	0,000 11	0,000 037						
0,30	0,012	0,002 6	0,000 58	0,000 15	0,000 037							
0,36	0,006	0,001 0	0,000 21	0,000 032								

Формулы общей мутности и общего расхода наносов, отвечающего транспортирующей способности потока, закрытого льдом, при заданном составе донных отложений и транспортируемых наносов записываются так же, как и для открытого потока, но вместо величин Γ_i и $S_{взм. з}$ содержат $\Gamma_{из}$ и $S_{взм. з}$. Например, формула общего расхода наносов при заданном составе донных отложений приобретает вид

$$P_{Sз} = QS_{взм. з} \sum_{i=1}^m \frac{\alpha_{взм. з}^i}{100} \Gamma_{из} \quad (3.140)$$

При заданном составе транспортируемых наносов будем иметь

$$P_{Sз} = QS_{взм. з} \frac{1}{\sum_{i=1}^m \frac{\alpha_{сп. i}}{100 \Gamma_{из}}} \quad (3.141)$$

Остановимся на формулах транспортирующей способности потока, полученных И. Ф. Карасевым [52] на основе рассмотренных выше теоретических предпосылок при использовании вероятностных соотношений, отражающих условия срыва частиц и их взвешивания. Изучая процесс взаимообмена частицами потока и русла, Карасев делит фазу взмыва частиц на две части: 1) срыв частиц со дна и 2) взвешивание частиц вертикальными составляющими скорости. Принимая распределение пульсационных скоростей по Гауссу, он записывает следующие приближенные зависимости:

для вероятности срыва —

$$\eta = 1,08 - 0,58 \left(\frac{v_{нач}}{v_{ср}} \right)^2, \quad (3.142)$$

для вероятности взвешивания —

$$\epsilon = 1,0 - 0,18 \frac{u_c}{v_{ср} \sqrt{g}} \quad (3.143)$$

Вероятность η определяется через величину начальной (срывающей) скорости $v_{нач}$, что позволяет учесть не только вес и диаметр частиц, но и весь комплекс факторов, который включают формулы $v_{нач}$ как для несвязных, так и связных грунтов. Для несвязных грунтов $v_{нач}$ может определяться по формуле В. В. Романовского [142], помещенной в гл. 2 настоящей монографии. Вероятность ϵ учитывает все те параметры частиц наносов, которые определяют их гидравлическую крупность u . В соответствии с эргодическими свойствами турбулентных потоков величины η и ϵ могут рассматриваться как характеристики временного, так и пространственного распределения. В частности, можно считать, что вероятность η выражает долю общей площади дна, на которой в каждый момент времени обеспечивается «обезвешивание» частиц грунтовой массы.

Анализ процессов, происходящих в придонной области, позволил Карасеву получить следующую зависимость для мутности взмыва (кг/м³):

$$S_{\text{взм}} = \alpha_S \frac{\rho_S \rho C^2 v_{\text{cp}}^2 \eta}{(\rho_S - \rho) g^2 H}. \quad (3.144)$$

Далее он составляет баланс вертикального перемещения наносов в придонном слое потока. При этом он учитывает, что область потока над верхней границей придонного слоя характеризуется донной мутностью основной зоны потока S_H , и принимает, что мутность придонного слоя выражается величиной $S_{\text{взм}}$. Обмен наносами через верхнюю границу придонного слоя определяется соотношением вертикальных пульсационных скоростей и гидравлической крупности частиц, что может быть выражено через вероятность e .

Из уравнения баланса вертикального переноса частиц для условий стационарного процесса находится следующая зависимость для придонной мутности:

$$S_H = \frac{\alpha_H \alpha_S \rho_S \rho v_{\text{cp}}^3 C^2 \sqrt{g} \eta e}{g^2 H (\rho_S - \rho) (0,76 v_{\text{cp}} \sqrt{g} + 0,5 u C)}. \quad (3.145)$$

Уравнение распределения мутности по вертикали Карасев получает в виде

$$S = S_H e^{-\frac{12 u C \left(H - \frac{y}{H} \right)}{u C + 0,7 v_{\text{cp}} \sqrt{g}}}, \quad (3.146)$$

где y — расстояние по вертикали, отсчитываемое от поверхности потока; H — полная глубина на вертикали.

При малой гидравлической крупности частиц, когда $u \ll \ll 0,7 v_{\text{cp}} \frac{\sqrt{g}}{C}$, его уравнение совпадает с известным уравнением распределения мутностей, полученным В. М. Маккаевым. Карасев считает свое уравнение более общим, чем уравнение Маккаеева, предполагая, что оно пригодно для описания переноса в потоке более крупных частиц по сравнению с тем, для чего предназначена диффузионная теория в чистом виде. Свои соображения И. Ф. Карасев подтверждает ссылкой на выполненные им сравнения с данными экспериментов Н. А. Михайловой и натуральных материалов К. В. Разумихиной. В этой связи необходимо подчеркнуть, что рекомендованные выше зависимости А. В. Караушева, основанные на теории Маккаеева при условии отнесения их к отдельным фракциям и получения общей мутности путем суммирования частных мутностей, дают вполне удовлетворительный результат для весьма широкого диапазона крупности наносов.

В связи с рассмотрением процессов в придонной области Карасев подразделяет наносы на взвешенные, которые перемещаются в толще потока вместе с течением в виде пассивной примеси, и донные, передвигающиеся влечением или короткими скачками по дну. При неоднородном фракционном составе донные наносы в основном состоят из наиболее крупных частиц, однако решающим признаком подразделения наносов является механизм их перемещения, а не крупность. В противном случае, например при однородных мелкозернистых грунтах, пришлось бы признать полное отсутствие влекомых наносов, что было бы ошибочным.

Для расчета всей массы перемещаемых в придонном слое потока наносов (элементарного расхода влекомых наносов в кг/(с · м)) Карасев выводит следующую формулу:

$$p_{вл} = 0,006 \frac{\rho_s \rho d C^2 v_{cp}^2 (v_{cp} - v_{нер})}{(\rho_s - \rho) g^2 H} \eta, \quad (3.147)$$

где d — средний диаметр транспортируемых частиц, мм; $v_{нер}$ — неразмывающая скорость, которая, по Карасеву, связана следующим соотношением с начальной (срывающей) скоростью:

$$v_{нач} = 1,4 v_{нер}. \quad (3.148)$$

Эмпирический коэффициент в формуле $p_{вл}$ определен по результатам натурных измерений Т. Ф. Талмазы, А. Ю. Умарова и др. Эта формула не уступает по точности формулам других авторов, но пригодна для более широкого диапазона условий движения наносов, что обеспечивается учетом вероятности срыва η .

Детальное рассмотрение процесса транспорта взвешенных и влекомых наносов, в частности изучение придонной мутности, распределения мутности по глубине потока, выяснение условий влечения частиц по дну и т. д., позволило Карасеву получить следующую формулу полного элементарного расхода наносов:

$$p_{общ} = 0,75 S_{взм} v_{cp} H \left(\frac{v \sqrt{g} B \varepsilon}{0,75 v_{cp} \sqrt{g} + 0,5 u C} + \frac{40 d (v_{cp} - v_{нер})}{v_{cp} H} \right), \quad (3.149)$$

где B — отношение средней расходной мутности на вертикали к придонной. В случае транспортирования глинистых частиц, после их распада на мелко дисперсные фракции, $B \approx 1$.

Карасев отмечает, что первый член стоящей в скобках суммы характеризует перенос взвешенных наносов, а второй — влекомых. Различный вид членов обусловлен неодинаковым механизмом перемещения указанных категорий наносов. В то же время содержащаяся в формуле в виде множителя мутность взмыва отражает единый для этих категорий процесс — взаимодействие жидкой и твердой сред.

Из формулы общего транспорта наносов Карасев получает отношение расхода влекомых наносов к расходу взвешенных, т. е. величину β

$$\beta = \frac{\rho_{вл}}{\rho_s}; \quad (3.150)$$

для мелких фракций ($d < 0,25$ мм) он находит

$$\beta \approx 30 \frac{d}{H}, \quad (3.151)$$

для крупных ($d > 1,5$ мм)

$$\beta = \frac{1300 \left(\frac{v_{ср}}{v_{нпр}} - 1 \right)}{\left(\frac{v_{ср}}{v_{нпр}} \right)^2 - 0,5 \frac{v_{ср}}{v_{нпр}}} \cdot \frac{d}{H}. \quad (3.152)$$

Карасев особо подчеркивает, что транспортирующая способность потока и фактический расход наносов не должны отождествляться. Это очевидно, поскольку последний зависит не только от физических условий транспорта наносов, выражаемых через транспортирующую способность, но также и от начальных и граничных условий. Естественно, что при оценке фактического расхода наносов должно быть исследовано продольное (вдоль потока) распределение мутности. Уравнения, предназначенные для решения подобных задач, рассматриваются ниже, в соответствующем разделе. Транспортирующая способность содержится в этих уравнениях как основной параметр.

3.4. Проверка формул транспортирующей способности потока и практические приемы расчета транспорта взвешенных наносов

Для расчета транспортирующей способности потока, как указывалось выше, применяется ряд расчетных формул и методов. Теоретические основы методов расчета транспортирующей способности и общий вид рекомендуемых зависимостей рассмотрены в п. 3.3.

Основными формулами и методами, применяемыми на практике, являются формулы А. Н. Гостунского [28], Е. А. Замакина [43], С. Х. Абальянца [1], теоретический метод А. В. Караушева и его эмпирическая формула, метод К. И. Россинского и И. А. Кузьмина [145]. Расчетные зависимости Абальянца, Великанова, Гостунского, Замакина, Хачатряна, зависимость, используемая в методе Россинского и Кузьмина, а также эмпирическая формула Караушева, могут быть представлены в следующем общем виде:

$$S = k \frac{v^e}{H^a u^n}. \quad (3.153)$$

В некоторых из этих формул коэффициент k определяется как функция коэффициента Шези.

Представляется весьма важной проверка формул и методов расчета транспортирующей способности для условий различных рек и выявление области их применения.

Проверка формул транспортирующей способности, предложенных Гостунским, Замариным, Хачатряном, Абальянцем и др., производилась в САНИИРИ А. В. Ефремовым [41]. С целью получения надежного исходного материала для такой проверки на каналах ирригационных систем Средней Азии и в лабораториях были организованы специальные исследования по изучению транспортирующей способности потоков. В результате было установлено, что рассмотренные эмпирические формулы дают удовлетворительные результаты лишь для условий, близких к тем, для которых они получены. Применительно к речным потокам эти формулы проверке в достаточной степени не подвергались.

Детальная проверка метода Россинского и Кузьмина [145] была выполнена в Югославии В. Милорадовой [209]. Она установила, что содержащийся в расчетной формуле Россинского коэффициент k зависит от турбулентности потока. Однако, как указал другой югославский ученый С. Брук [185], в настоящее время выявить характер такой зависимости еще не удалось. Можно предположить, что зависимость k от турбулентности косвенным образом выражается посредством коэффициента Шези S , который содержится, например, в формулах А. В. Караушева, И. О. Карасева, К. В. Разумихиной и др.

В 1966 г. К. В. Разумихина [131] выполнила проверку рассмотренных выше методов расчета для речных потоков на материалах Гидрометслужбы и специальных детальных измерений на р. Полометь. Расчет средней мутности по формулам Замарина, Гостунского и Караушева выполнялся для рек, протекающих в различных природных зонах, значительно отличающихся по гидрологическому режиму и условиям формирования стока наносов. Это позволило проверить расчетные формулы в достаточно широком диапазоне изменений режима и гидравлики потока, мутности и состава наносов.

Осредненные результаты вычисления мутности по названным формулам представлены в табл. 15. Материалы наблюдений и расчетов позволили установить, что в среднем для всех рассмотренных рек формулы Замарина и Гостунского дали очень большие расхождения. Для многих рек (Белая, Вятка, Кама и др.) по указанным формулам получены завышения мутности в 50—100 раз. Лишь для рек, отличающихся мелкими наносами, получены удовлетворительные результаты. По-видимому, эти формулы, выведенные авторами для среднеазиатских каналов и рек, транспортирующих большое количество мелких наносов, имеют ограниченное применение и могут использоваться только в аналогичных условиях.

При сравнении двух вариантов расчета мутности по эмпирической формуле Караушева оказалось, что при использовании крупности взвешенных наносов вычисленное значение мутности всегда значительно больше, чем при применении крупности донных отложений. При использовании значений крупности донных отложений формула Караушева в ряде случаев дала удовлетворительные результаты.

Наиболее близкая сходимость с натурными материалами получена по детально изложенному в п. 3.3 теоретическому методу Караушева. Из табл. 15 видно, что наилучший результат дает

Таблица 15

Осредненные результаты расчета мутности

Число случаев	Мутность, кг/м ³								
	измеренная	вычисленная						по формуле Зама-рина	По формуле Гостунского
		по теоретическому методу Караушева			по эмпирической ф-ле Караушева				
		по фракциям донных отложений	по фракциям взвешенных наносов	по среднему составу взвешенных наносов	по крупности донных отложений	по крупности взвешенных наносов			
33	0,526	0,505	1,320	1,540	0,171	1,230	3,870	10,900	

тот вариант теоретической формулы Караушева (3.102), в котором гидромеханический параметр наносов определяется по заданному составу донных отложений. При определении гидромеханического параметра по крупности взвешенных наносов вычисленная по формуле (3.103) мутность оказывается значительно завышенной. Мутность, вычисленная по среднему составу взвешенных наносов, также несколько превышает мутность, полученную по формуле, учитывающей фракционный состав взвешенных наносов.

Для более детальной проверки методов расчета К. В. Разумихина [132] провела на участке р. Полометь детальные измерения расходов наносов, гидравлических элементов потока, его уклона, гранулометрического состава взвешенных наносов и донных отложений. Было детально изучено распределение скоростей течения и мутности по глубине и ширине потока, распределение крупности взвешенных наносов по сечению реки, а также крупности донных отложений по элементам гряд и по ширине реки.

Расчеты транспортирующей способности потока были выполнены при использовании различных исходных данных о крупности наносов: 1) по фракциям донных отложений с осреднением их гранулометрического состава по ширине реки; 2) то же с осреднением по длине гряды в стрежневой части потока; 3) по фракциям взвешенных наносов с осреднением их состава по сечению реки; 4) то же при осреднении вдоль оси потока.

Детальные натурные исследования на р. Полометь подтвердили вывод о том, что наиболее приемлемым для расчета транспортирующей способности потока, оцениваемой по его средней мутности $S_{ср}$, является тот вариант метода Караушева, при котором гидромеханический параметр наносов вычисляется по гранулометрическому составу донных отложений, надежно осредненному по всей ширине потока. Результаты вычисления $S_{ср}$ по крупности донных отложений, осредненной по элементам гряд только в стрежневой зоне потока, получились в значительной степени заниженными по сравнению с измеренными. Это объясняется отчасти тем, что гранулометрический состав донных отложений при осреднении по элементам гряд в стрежневой зоне потока получается более крупным, чем при осреднении по ширине реки. В частности, осредненный по ширине реки состав отложений содержал около 20% частиц с диаметром менее 0,2 мм, а при осреднении по элементам гряд в стрежневой зоне потока частицы с диаметром менее 0,2 мм составляли лишь около 1%. Значения $S_{ср}$, вычисленные по крупности взвешенных наносов, в обоих случаях оказались значительно выше, чем измеренные.

На основании проведенных исследований удалось также установить, что расхождения между измеренными и вычисленными величинами можно объяснить как недостатками расчетных зависимостей, так и в определенной степени несовершенством применяемой в настоящее время методики отбора проб взвешенных наносов (особенно в придонной области потока) и донных отложений. Выявлено, что результат вычисления сильно зависит от надежности принятого для расчета состава наносов. Особую роль при этом оказывает полнота учета мелких фракций в составе руслового аллювия. В табл. 16 показано, что результаты расчета $S_{ср}$ по крупности донных отложений, полученные по определениям 1966 г., дали значительно лучшее совпадение с измеренной мутностью, чем по данным 1965 г. Это объясняется тем, что в 1966 г. для отбора проб донных отложений были применены грунтоотборники новой конструкции, разработанные в ГГИ Н. Я. Соловьевым [155]. Отличительной особенностью этих приборов является герметичность камеры, что обеспечивает сохранность всех фракций в пробе при поднятии прибора со дна.

При расчете $S_{ср}$ по крупности взвешенных наносов хороший результат может быть получен лишь в том случае, если для

Таблица 16

Вычисленные по методу А. В. Караушева и измеренные значения мутности
р. Полометь — с. Яжелбицы

Дата измерения	Мутность, кг/м ³		
	измеренная	вычисленная по крупности донных отложений	вычисленная по крупности взвешенных наносов
1965 г. 17/IV	0,262	0,175	0,600
19/IV	0,795	0,149	0,234
22/IV	1,860	0,210	2,260
27/IV	0,717	0,494	2,840
3/V	0,401	0,480	0,756
1966 г. 6/IV	1,015	0,260	1,110
9/IV	0,975	0,922	1,500
18/IV	0,680	0,502	3,450
21/IV	0,780	0,574	2,580
25/IV	0,950	1,260	4,034
4/V	0,516	0,514	1,160

построения гранулометрической кривой используется состав взвешенных наносов, осредненный по всей глубине потока. Особенно важным в этом случае является достаточно полный учет взвешенных наносов в придонной области потока. К сожалению, в настоящее время отсутствуют приборы, позволяющие надежно отбирать в речных потоках пробы в непосредственной близости от дна.

Проверка ряда зависимостей для вычисления транспортирующей способности потока в последние годы проведена также в Киргизском НИИВХ К. Ф. Артамоновым и А. Н. Крошкиным [5]. Результаты выполненных расчетов подтвердили выводы ГГИ о том, что большинство расчетных формул и для горных рек дает резко завышенные (в 10—100 раз и более) значения мутности по сравнению с измеренными. Наилучшие результаты для рек Киргизии также получены по теоретической зависимости А. В. Караушева.

Приведем результаты проверки формулы транспортирующей способности покрытого льдом потока (3.138), произведенной К. В. Разумихиной. Для расчета средней мутности потока использовались фактические данные измерения расходов воды и гранулометрического состава донных отложений за 1958—1960 гг. для: р. Урал — с. Тополи, р. Белая — створы г. Бирск и г. Уфа, р. Кама — створы г. Набережные Челны, с. Гайны, г. Сарапул, с. Волосническое, р. Сюнь — с. Миньярово и др. В связи с тем, что в формулу мутности потока, покрытого льдом, в качестве расчетного параметра входит коэффициент шероховатости шуго-ледяного покрова $n_{л}$, проверка формулы

осуществлялась для периодов начала ледостава, середины зимы и периода перед вскрытием реки. Вычисления велись для весьма различных гидравлических условий: расходы воды изменялись от 2 до 2000 м³/с и более, глубина потока — от 0,7 до 10 м, средняя скорость — от 0,17 до 0,54 м/с, коэффициент шероховатости русла n_p — от 0,022 до 0,040. Как показывают результаты расчета (табл. 17), значения мутности, полученные по формуле (3.138), в большинстве случаев обнаруживают более или менее удовлетворительную сходимость с измеренными данными. Чаще расчетные значения мутности получаются выше измеренных. Здесь следует учесть, что ошибки измерения малой мутности, являющиеся систематическими, направлены в сторону ее преуменьшения. Поэтому несколько преувеличенные расчетные значения мутности возможно иногда даже более близки к действительным ее значениям, чем измеренные. Причиной ошибок самих расчетов может являться то обстоятельство, что входящий в формулу расчетный параметр n_d , в значительной степени оказывающий влияние на результаты вычислений, определяется весьма приближенно (табл. 17).

Заметим, что попытка применения для зимних условий формулы мутности, составленной для открытого потока, показала значительно худший результат. В среднем вычисление мутности для зимы по формуле, предназначенной для открытых потоков, дает завышение на 40—60% по сравнению со значениями, полученными по формуле, учитывающей влияние ледяного покрова. В ряде случаев эти отклонения достигают значительно больших величин.

Поскольку теоретические методы, разработанные в ГГИ А. В. Караушевым и К. В. Разумихиной, дали для речных потоков наилучшие результаты, ниже детально изложена последовательность расчета транспортирующей способности потока этими методами. Рассматривая метод Караушева, дадим его с теми упрощениями, которые оказалось целесообразным внести для уменьшения трудоемкости расчетов. Как уже было сказано выше, в этом методе средняя мутность потока, отвечающая его транспортирующей способности, выражается соотношением

$$S_{\text{ср}} = S_{\text{взм}} \Gamma, \quad (3.154)$$

Исходными данными для расчета $S_{\text{ср}}$ являются гидравлические характеристики потока (скорость, уклон водной поверхности, глубина) и сведения о гидравлической крупности наносов (взвешенных или донных).

Расчет транспортирующей способности потока начинается с определения мутности взмыва (кг/м³) по формуле

$$S_{\text{взм}} = 0,15 N \eta^2 \frac{v_{\text{ср}}^2}{H}, \quad (3.155)$$

Таблица 17

Гидравлические элементы потока и результаты сравнения измеренной и вычисленной мутности для потока, закрытого льдом

Дата	Мутность, г/м ³		Q м ³ /с	H _{ср} м	v _{ср} м/с	n _л	n _р	C _з
	измеренная	вычисленная						
р. Урал — с. Тополи, F=194 000 км ²								
1958 г. 30/I	13,0	12,0	79,8	3,08	0,15	0,050	0,022	30,0
20/II	5,5	8,8	68,8	3,14	0,13	0,040	0,022	33,4
18/XII	3,0	30,0	59,7	1,31	0,33	0,150	0,022	8,7
1959 г. 16/I	7,6	37,3	63,4	1,57	0,33	0,100	0,022	12,8
30/XII	23	15,8	90,0	2,12	0,32	0,150	0,022	9,1
р. Белая — г. Уфа, F=100 000 км ²								
1959 г. 27/III	6,5	5,0	153	3,47	0,19	0,010	0,032	46,0
р. Белая — г. Бирск, F=121 000 км ²								
1959 г. 13/IV	10,0	15,9	280	2,97	0,27	0,010	0,036	39,6
11/XII	7,2	4,7	489	3,84	0,32	0,100	0,036	14,6
29/XII	7,2	6,6	388	3,38	0,30	0,060	0,036	21,9
1960 г. 13/I	3,9	7,2	348	3,17	0,29	0,040	0,034	28,9
28/XII	2,4	4,6	271	3,08	0,25	0,060	0,034	21,9
р. Кама — с. Волосническое, F=11 000 км ²								
1960 г. 27/III	8,6	30,5	13,0	1,26	0,24	0,030	0,029	31,4
19/IV	76,0	119	217	3,65	0,54	0,010	0,028	51,9
22/XI	18,0	16	6,7	0,81	0,18	0,050	0,029	21,0
р. Кама — с. Гайны, F=27 600 км ²								
1959 г. 5/IV	14	45	69	1,86	0,22	0,050	0,038	20,4
16/IV	130	95	91	1,94	0,27	0,045	0,038	24,7
11/XI	2,6	36	184	2,01	0,40	0,100	0,038	13,05
р. Кама — г. Сарапул, F=189 000 км ²								
1960 г. 30/III	15,0	30,0	1450	6,5	0,56	0,030	0,029	46,9
р. Кама — г. Набережные Челны, F=368 000 км ²								
1960 г. 18/I	4,9	18,6	1640	9,2	0,37	0,050	0,024	32,2
11/IV	57	45,6	2220	9,6	0,48	0,030	0,024	46,9
20/XII	4,8	4,0	1110	8,1	0,29	0,100	0,024	17,4
р. Сюнь — с. Миньярово, F=4230 км ²								
1960 г. 21/I	10	9,64	2,41	0,70	0,19	0,100	0,028	11,5
27/II	11	11,4	2,32	0,84	0,17	0,040	0,028	25,0
30/XII	8,7	7,2	2,87	0,78	0,21	0,120	0,028	9,96

Примечание. Измеренная и вычисленная мутность дается в г/м³ ввиду малых ее значений.

где H — средняя глубина потока; η — отношение донной скорости к средней; N — характеристическое безразмерное число;

$$\eta^2 = \frac{0,53C - 4,1}{C - 2}; \quad (3.156)$$

$$N = \frac{MC}{g}; \quad (3.157)$$

здесь g — ускорение свободного падения; величина M при $10 \leq C \leq 60$ находится по формуле

$$M = 0,7C + 6, \quad (3.158)$$

а при $C > 60$

$$M = 48 = \text{const.} \quad (3.159)$$

Для приближенных расчетов $S_{взм}$ может быть использована номограмма, в которой $S_{взм}$ представлена как функция трех переменных C , H и $v_{ср}$ (рис. 29).

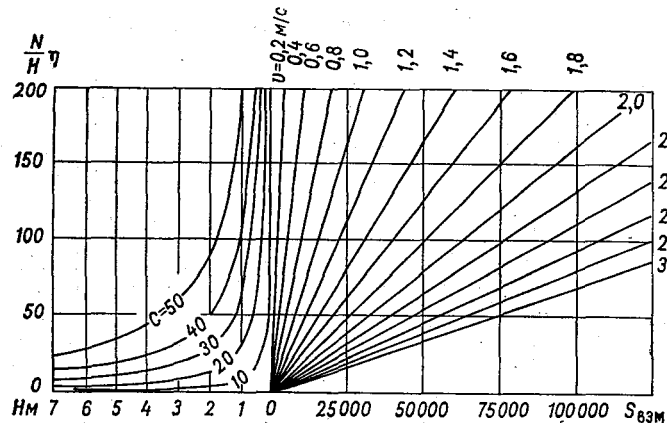


Рис. 29. Номограмма для вычисления $S_{взм}$.

Анализ расчетных материалов позволил установить степень влияния отдельных параметров, входящих в формулу мутности взмыва, на результаты расчета. Было установлено, что параметр η является наиболее стабильной величиной. Значения η^2 при $20 \leq C \leq 60$ изменяются от 0,38 до 0,48, а при $10 \leq C < 20$ — от 0,20 до 0,38. Поэтому с достаточным приближением можно принять при расчетах следующие постоянные значения:

при $20 \leq C \leq 60$

$$\eta^2 = \text{const} \approx 0,43,$$

при $10 \leq C < 20$

$$\eta^2 = \text{const} \approx 0,30.$$

Учитывая эти равенства и заменяя в формуле мутности взмыва величину v^2/H числом Фруда $Fr = v^2/gH$ с введением постоянной величины g в числовой коэффициент формулы мутности взмыва, запишем ее в виде

$$S_{\text{взм}} = kNFr. \quad (3.160)$$

Если выразить мутность в кг/м^3 , то коэффициент k приобретает следующие значения: для равнинных рек, коэффициенты Шези которых заключены в пределах 20—80, $k = 0,650$, для рек преимущественно горных, где $10 \leq C < 20$, $k = 0,450$.

Надежность вычисления мутности взмыва, а вместе с тем и транспортирующей способности потока в значительной степени зависит от надежности определения коэффициента Шези C , учитывающего влияния шероховатости русла как на скорость течения, так и на коэффициент турбулентного обмена. При наличии сведений об уклоне водной поверхности коэффициент Шези C обычно вычисляется по формуле

$$C = \frac{v_{\text{ср}}}{\sqrt{H_{\text{ср}}l}}. \quad (3.161)$$

При недостаточности данных об уклоне водной поверхности C вычисляется в зависимости от шероховатости русла. Наиболее эмпирически обоснованной зависимостью является формула Штриклера, получившая теоретическое подтверждение в трудах В. М. Маккавеева [100]. В последнее время эта формула вновь привлекла внимание ряда зарубежных исследователей. Детальный ее анализ дается в работе М. Пирковского [214], который предлагает широко применять эту формулу для выражения величины сопротивления.

Формула Штриклера с уточненным коэффициентом имеет вид

$$C = 33 \left(\frac{H_{\text{ср}}}{d_0} \right)^{1/6}, \quad (3.162)$$

где $H_{\text{ср}}$ — средняя глубина, метры; d_0 — эффективная крупность донных отложений, определяющая зернистую шероховатость русла, миллиметры.

Разумихиной было показано, что назначение эффективного диаметра определяется типом донных отложений. В частности, для речных потоков с гравелисто-песчаным руслом, крупность отложений которых от 0,05 до 10—20 мм, а в процентном отношении преобладают фракции 1—0,5 и 0,5—0,2 мм, в качестве эффективного следует принимать диаметр частицы, отвечающий 50%-ной обеспеченности на гранулометрической кривой. В подтверждение приводятся результаты сопоставления коэффициентов Шези, полученных непосредственно по формуле Шези и по уточненной формуле Штриклера при разных значениях d_0 (табл. 18).

Таблица 18

Значения коэффициентов Шези C по формуле Штриклера при d_0 разной обеспеченности (вычисления выполнены по средним за половодье гидравлическим элементам потока)

Река—пункт	Год	$C = \frac{v}{\sqrt{HI}}$	Значения C при	
			d_0 50%	d_0 50%
Мокша — Темников	1962	39,3	38,7	33,9
	1963	38,6	37,0	33,1
Молома — Шетиненки	1958	42,4	40,8	31,0
Кама — Тарловка	1958	55,3	57,0	31,8
Кама — Сарапул	1958	42,2	42,0	29,6
Обва — Карачай	1958	40,0	39,7	22,5
Полометь — Яжелбицы	1965	32,5	33,6	25,5
	1966	35,5	36,2	26,8

Гидромеханический параметр наносов Γ , как указывалось, может определяться по крупности взвешенных или донных наносов. Гранулометрический состав наносов выражается процентным содержанием отдельных фракций, размеры которых задаются геометрической величиной (средний диаметр частиц d мм) или гидравлической крупностью (u м/с). Связь между диаметрами частиц и их гидравлической крупностью определяется по детальной таблице, приведенной в п. 2.1. Здесь приведем сокращенную таблицу для наиболее часто используемых при расчетах транспортирующей способности размеров частиц (табл. 19). В табл. 19 гидравлическая крупность u дана при температуре воды 15°C . Чтобы при выполнении расчета транспорта наносов перейти к гидравлической крупности, отвечающей измеренной температуре воды, надо табличную величину u умножить на поправочный температурный коэффициент, связанный в свою очередь с размером частиц (см. табл. 7, п. 2.1).

Таблица 19

Значения гидравлической крупности частиц u в зависимости от их диаметра d при $t=15^\circ\text{C}$ ($\Theta=0,75$ по В. В. Романовскому)

d мм	u м/с	d мм	u м/с	d мм	u м/с	d мм	u м/с
0,001	0,000 000 8	0,1	0,006 1	1,2	0,128	2,2	0,204
0,005	0,000 02	0,2	0,017 4	1,5	0,154	2,5	0,221
0,01	0,000 08	0,5	0,055 5	1,8	0,177	3,0	0,242
0,05	0,001 95	1,0	0,110	2,0	0,192		

При однородном составе взвешенных наносов гидромеханический параметр Γ может быть определен по среднему значению гидравлической крупности наносов. В этом случае величина Γ находится непосредственно по графику (см. п. 3.3, рис. 27) или таблице (см. п. 3.3, табл. 11) в зависимости от коэффициента Шези C и безразмерной величины G , определяемой равенством

$$G = \frac{U}{v_{\text{ср}}}, \quad (3.163)$$

где U — средняя гидравлическая крупность транспортируемых наносов.

Следует иметь в виду, что неучет при вычислениях транспортирующей способности потока даже сравнительно небольшой неоднородности наносов может приводить к очень большим ошибкам. Поэтому предпочтение должно отдаваться детальному методу, учитывающему разнофракционность наносов.

При неоднородном составе транспортируемых наносов или донных отложений величина Γ вычисляется по формулам, содержащим суммы, слагаемые которых включают частные значения G_i , определяемые для отдельных фракций. Частные значения G_i находятся по упоминавшейся уже выше табл. 11 в зависимости от коэффициента Шези C и частного значения G_i , находимого из соотношения

$$G_i = \frac{u_i}{v_{\text{ср}}}, \quad (3.164)$$

где u_i — гидравлическая крупность i -той фракции.

При использовании для расчета гранулометрического состава транспортируемых наносов общее значение гидромеханического параметра вычисляется по формуле

$$\Gamma = \left(\sum_{i=1}^m \frac{a_{\text{ср}i}}{100G_i} \right)^{-1}. \quad (3.165)$$

При вычислении гидромеханического параметра по заданному составу донных отложений прежде всего производится выделение взвешиваемых (транспортируемых) фракций из состава донных отложений. Предельная гидравлическая крупность частицы, определяющая верхнюю границу крупности взвешиваемых наносов $u_{\text{пред}}$, находится на основании равенства

$$u_{\text{пред}} = w_{\text{макс}}, \quad (3.166)$$

где $w_{\text{макс}}$ — наибольшее абсолютное значение вертикальной составляющей пульсационной скорости, определяемое из соотношения

$$w_{\text{макс}} = 3w; \quad (3.167)$$

здесь ω — среднее значение абсолютной вертикальной составляющей пульсационной скорости, которое вычисляется по формуле

$$\omega = \frac{v_{\text{ср}}}{\sqrt{N}}. \quad (3.168)$$

Получив по формуле (3.166) границу взвешиваемых фракций, находим общее процентное содержание взвешиваемых фракций в составе отложений; пусть оно равно $r\%$. Необходимо сделать пересчет процентного содержания каждой фракции. Если в составе верхнего слоя донных отложений некоторая i -тая взвешиваемая при данных условиях фракция составляет $\alpha_{\text{дн}i}\%$, то в составе взвешиваемой части донных отложений она будет содержаться в относительно большем количестве. В том же количестве эта фракция будет находиться во взвешенных наносах граничного слоя потока, образующих мутность взмыва; этот процент обозначаем через $\alpha_{\text{взм}i}$. Для расчета используется следующее соотношение:

$$\alpha_{\text{взм}i} = \frac{100}{r} \alpha_{\text{дн}i}. \quad (3.169)$$

Очевидно, что при вычислениях должно получиться $\sum_{i=1}^m \alpha_{\text{взм}i} = 100$, где m — число всех взвешиваемых фракций. Если граница, определяющая предел взвешивания, делит какую-либо фракцию на две части (взвешиваемую и невзвешиваемую), то в соответствии с этим фракция делится на две, одна из которых со свойственной ей средней гидравлической крупностью включается в состав взвешиваемых наносов.

Гидромеханический параметр наносов при заданном составе донных отложений вычисляется по формуле

$$\Gamma = \sum_{i=1}^m \frac{\alpha_{\text{взм}i}}{100} \Gamma_i. \quad (3.170)$$

Содержащаяся под знаком суммы величина $\alpha_{\text{взм}i}$ находится из соотношения (3.169). Общая средняя мутность $S_{\text{ср}}$ и расход взвешенных наносов потока P_S выражаются формулами:

$$\left. \begin{aligned} S_{\text{ср}} &= \Gamma S_{\text{взм}}, \\ P_S &= S_{\text{ср}} Q, \end{aligned} \right\} \quad (3.171)$$

где Q — расход воды.

Перейдем к рассмотрению способа расчета транспортирующей способности потока при наличии ледяного покрова, который, согласно разработкам Разумихиной, выполняется по формуле

$$S_{\text{ср},\text{л}} = S_{\text{взм},\text{л}} \Gamma_{\text{л}}; \quad (3.172)$$

здесь индекс «з» показывает, что величины относятся к потоку, закрытому льдом. Исходными данными в этом случае также являются гидравлические характеристики потока, сведения о гидравлической крупности донных отложений и данные о коэффициенте шероховатости нижней поверхности шуго-ледяного покрова.

Мутность взыва потока, закрытого льдом, вычисляется по формуле

$$S_{\text{взм. з}} = 0,15 N_3 \eta_B \frac{v_{\text{ср}}^2}{H_{\text{ср}}}, \quad (3.173)$$

где

$$N_3 = \frac{M_3 C_3}{g}, \quad (3.174)$$

$$\eta_B = 1 - \frac{M}{3C_3}. \quad (3.175)$$

Расчет начинается с определения коэффициента Шези C для условий потока, закрытого льдом. Для этой цели вычисляется переходный множитель k_c , который является функцией коэффициента шероховатости нижней поверхности шуго-ледяного покрова ($n_{\text{л}}$), коэффициента шероховатости русла ($n_{\text{р}}$) и выражается формулой

$$k_c = \frac{1,26}{\sqrt{1 + \left(\frac{n_{\text{л}}}{n_{\text{р}}}\right)^2}}; \quad (3.176)$$

коэффициент шероховатости русла определяется по формуле

$$n_{\text{р}} = 0,03 d_9^{1/6}, \quad (3.177)$$

где d_9 — эффективный диаметр частиц донных отложений.

Для определения коэффициентов шероховатости нижней поверхности ледяного покрова естественных рек применяется шкала П. Н. Белокопя, которая считается официальной нормой (табл. 20).

Таблица 20

Коэффициенты шероховатости $n_{\text{л}}$ нижней поверхности шуго-ледяного покрова для естественных рек

(по П. Н. Белокопя)

Число дней после ледостава	Ледяной покров гладкий	Ледяной покров с торосами и шугой
1—10	0,050	0,150
10—20	0,040	0,100
20—60	0,030	0,050
60—80	0,015	0,040
80—100	0,010	0,025

Как видно из таблицы, коэффициенты шероховатости нижней поверхности шуго-ледяного покрова сильно изменяются в течение зимы, а также в значительной степени зависят от характера ледяного покрова. Отсутствие достаточных натуральных данных не позволило еще установить численную связь величины $n_{\text{л}}$ со всеми влияющими на него факторами.

Коэффициент Шези C_3 для закрытого льдом потока определяется по зависимости

$$C_3 = k_c C, \quad (3.178)$$

где C — коэффициент Шези, найденный для открытого потока, протекающего в том же русле, при той же глубине, что и расчетный поток.

Гидромеханический параметр наносов Γ_3 следует вычислять по взвешиваемым фракциям донных отложений, пользуясь теми же рекомендациями, которые даны для открытого потока. Частные значения Γ_{3i} определяются по специальной таблице $\Gamma_3(C_3 G)$, разработанной Разумихиной для зимних условий (см. табл. 14, п. 3.3).

Расход взвешенных наносов для закрытого льдом потока выражается формулой

$$P_{S_3} = S_{\text{ср. з}} Q. \quad (3.179)$$

Рассмотрим теперь особенности расчета расходов взвешенных наносов в разные фазы водного режима реки. Известно, что взвешенные наносы, формирующие мутность потока, образуются из двух различных источников: за счет смыва с поверхности бассейна («наносы смыва» по терминологии Б. В. Полякова 1935, 1940 гг.), «илистые наносы» по Эйнштейну [19] и за счет размыва речного русла («наносы размыва» по Полякову, «руслоформирующие наносы» по Эйнштейну, Егiazарову, Россинскому). Работами Караушева [54], а затем Эйнштейна и Чиина [92] показано, что расход взвешенных наносов и происходящий обмен между донными и взвешенными наносами может быть учтен предложенными ими зависимостями при наличии мгновенных характеристик гранулометрического состава донных отложений. Многими исследователями установлено, что наибольшую трудность представляет учет наносов неруслового происхождения, количество которых определяется состоянием поверхности бассейна всего водосбора и интенсивностью развития на нем эрозионных процессов. В 30-х годах Поляков применил понятие «мутность смыва» и «мутность размыва». Мутность смыва связана с явлениями на водосборе и не обнаруживает ясно выраженной зависимости от расходов воды; мутность размыва достаточно четко увязывается с расходами воды. Очевидно, что за счет притока мутных вод фактический расход наносов в реке может превысить транспортирующую способность потока, а в случае

притока осветленных вод может иметь место недогрузка потока. В обоих случаях сближение расхода наносов с транспортирующей способностью потока, происходящее за счет русловых деформаций, осуществляется иногда довольно медленно. Формулы транспортирующей способности в этих условиях мало эффективны. Отсюда следует, что получение универсальной расчетной зависимости, учитывающей все многообразие процессов формирования стока взвешенных наносов, является весьма сложной задачей. Наиболее рациональным в настоящее время является комбинированный подход к решению этой задачи, заключающийся в сочетании расчетных методов с кратковременными измерениями в натуре.

Многочисленные расчеты по теоретическим формулам транспорта наносов, выполненные Разумихиной на конкретном натурном материале, позволили не только выявить наиболее удовлетворительные формулы, но и регламентировать условия их применимости. Анализ материалов, относящихся к различным рекам, и детальное натурное исследование на р. Полометь показали, что разработанный в ГГИ метод Караушева расчета транспортирующей способности требует регламентации в отношении условий применимости. Для этой цели были использованы наиболее надежные и полные данные натуральных измерений по ряду равнинных рек Советского Союза. В основном были выбраны материалы по рекам с четко выраженной, одновершинной волной весеннего половодья. Таким типом гидрографа характеризуется подавляющая часть равнинных рек СССР. Связь измеренных расходов воды и взвешенных наносов выражается обычно для рек такого типа одной петлеобразной кривой, правая ветвь которой отвечает периоду подъема половодья, а левая — спаду половодья. В качестве примера рек с высокой мутностью и многопаводочным режимом водности для расчетов были использованы материалы по р. Сырдарье. Связь расходов воды и взвешенных наносов для рек такого типа обычно характеризуется однозначной криволинейной зависимостью с некоторым разбросом точек.

Анализ расположения на графиках связи $P_s = f(Q)$ расчетных точек позволил разделить все рассмотренные реки на три группы (рис. 30, табл. 21). Выяснилось, что эти группы рек различаются гранулометрическим составом донных отложений. Характерный состав донных отложений для рек этих групп приведен в табл. 22.

Для рек первой группы расчетные точки располагаются на ветви спада. Для периода подъема половодья вычисленные расходы наносов оказываются заниженными в 2—3 раза по сравнению с измеренными. Сюда относятся реки с выраженным весенним половодьем, имеющие гравелисто-песчаные донные отложения, крупностью от 0,05 до 10—20 мм с преобладающими в процентном отношении фракциями от 0,2 до 1,0 мм.

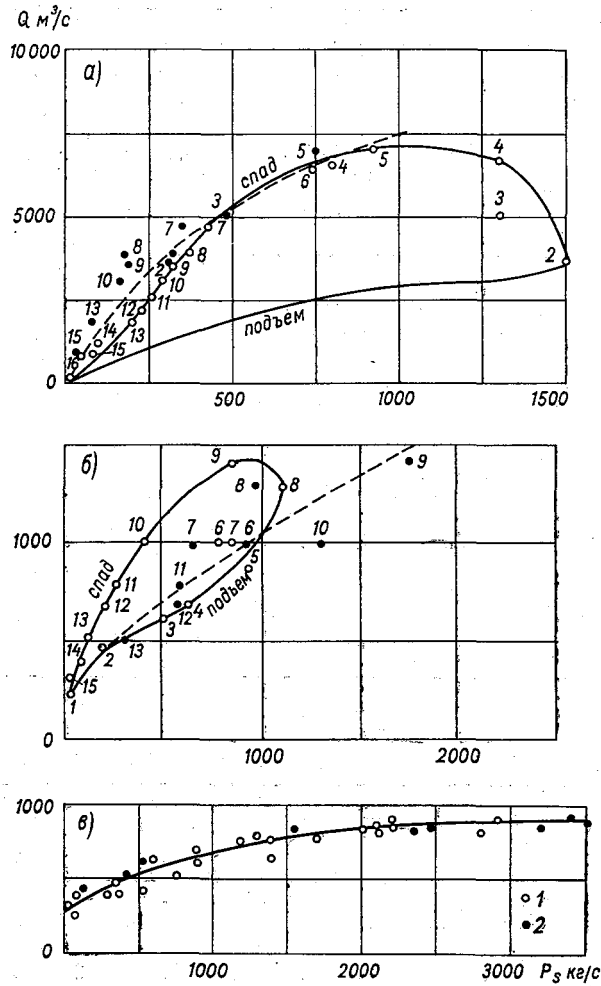


Рис. 30. Зависимость $P_s=f(Q)$.

a — первая группа рек (р. Белая — г. Уфа, 1959 г.); $б$ — вторая группа рек (р. Урал — д. Тополи), $в$ — третья группа рек (р. Сырдарья — г. Казалинск).
 1 — измеренные расходы взвешенных наносов, 2 — то же вычисленные.

Таблица 21

Систематизация результатов сравнения вычисленных и измеренных расходов взвешенных наносов по трем группам рек

1-я группа рек	2-я группа рек	3-я группа рек
Вычисленные значения P_S ложатся на ветвь спада на графике $P_{S \text{ изм}}=f(Q)$, но занижены для периода подъема весеннего половодья. Характер донных отложений: гравелисто-песчаные, крупность от 0,05 до 10 мм	Вычисленные значения P_S ложатся на ветвь подъема на графике $P_{S \text{ изм}}=f(Q)$, но завышены для периода спада половодья. Характер донных отложений: илесто-песчаные, крупность от 0,01 до 1 мм	Вычисленные значения P_S ложатся вблизи однозначной криволинейной зависимости $P_{S \text{ изм}}=f(Q)$. Режим рек многопаводочный, половодье растянутое
р. Белая — г. Бирск, 1958, 1959, 1960 гг. р. Белая — г. Уфа, 1959 г. р. Кама — с. Волосническое, 1958, 1959, 1960 гг. р. Сюнь — д. Миньярово, 1959, 1960 гг. р. Ока — г. Калуга р. Медведица — ст-ца Арчединская, 1960 г. р. Полометь — с. Яжелбицы, 1963, 1965, 1967 гг.	р. Урал — с. Тополи, 1958, 1959, 1960 гг. р. Сура — д. Траханиотово, 1961 г. р. Вятка — г. Киров, 1959, 1960 г. р. Пенза — свх Ардымский, 1961 г. р. Дон — х. Хованский, 1960 г.	р. Сырдарья — г. Казалинск р. Сырдарья — кишл. Каль р. Полометь — с. Яжелбицы, 1966 г.

Таблица 22

Характерный состав донных отложений для трех групп рек

Река—пункт	Диаметр частиц d (мм) и их содержание (в % от общей массы)									
	>10	10—5	5—2	2—1	1—0,5	0,5—0,2	0,2—0,1	0,1—0,05	0,05—0,01	$<0,01$
р. Белая — г. Уфа 1959 г. (1-я группа)	21,9	14,1	11,1	4,1	11,8	32,1	2,9	0,3	1,6	
р. Урал — г. Тополи 1959 г. (2-я группа)					0,2	19,3	37,7	16,8	20,0	6,0
р. Сырдарья — г. Казалинск 1961 г. (3-я группа)						16,2	39,1	27,5	10,5	6,3

Для рек второй группы расчетные значения P_s располагаются на ветви подъема весеннего половодья, а для спада половодья вычисленные значения P_s оказываются завышенными в 2—3 раза по сравнению с измеренными. К такому типу относятся также реки с выраженным половодьем и руслом, сложенным илисто-песчаными донными наносами крупностью от 0,001 до 1 мм и с преобладающими в процентном отношении фракциями от 0,2 до 0,05 мм.

Третья группа рек характеризуется достаточно удовлетворительным соответствием измеренных и вычисленных расходов взвешенных наносов для всех фаз водного режима. Здесь связь $P_s = f(Q)$ выражается однозначной криволинейной зависимостью. Сюда относятся реки с многопаводочным водным режимом и мелким довольно однородным составом грунтов (например, р. Сырдарья) и реки с растянутым весенним половодьем. Как показал анализ материалов, принятых для проверочных расчетов, большинство рассмотренных рек относится к первой группе, когда благоприятным для расчета оказывается период спада весеннего половодья, а неблагоприятным — период подъема половодья. Формирование стока наносов рек осуществляется в этот период в значительной степени за счет эрозионных процессов на поверхности бассейна реки и на склонах долины, что не может быть учтено при расчете по формуле транспортирующей способности потока, включающей как параметр характеристики состава руслового аллювия [формулы (3.149), (3.155), (3.165)]. Приближенный расчет мутности для рек этой группы в период подъема половодья можно выполнять по формулам (3.149), (3.155), (3.160) при использовании сведений о крупности взвешенных наносов. Следует, однако, иметь в виду, что в этом случае расчет дает некоторое завышение по сравнению с измеренными величинами вследствие преуменьшения крупности взвешенных наносов при современной методике отбора проб, не охватывающей придонный слой потока.

Для рек второй группы расчет по указанным формулам может выполняться для периода подъема половодья и периода межени.

Для рек с многопаводочным режимом водности и мелким однородным составом донных отложений, а также для рек с растянутым весенним половодьем, имеющим однозначную зависимость $P_s = f(Q)$, для расчета расходов взвешенных наносов в безледоставный период года может применяться теоретический метод Караушева в варианте, использующем состав донных отложений.

В период ледостава для всех трех групп рек расчет выполняется по формулам, полученным Разумихиной для условий потока, закрытого льдом.

При наличии данных отдельных измерений расходов наносов в расчетные зависимости транспорта наносов целесообразно

вводить корректирующий множитель a , определяемый соотношением

$$a = \frac{S_{\text{ср. изм}}}{S_{\text{ср}}} = \frac{P_{\text{Сизм}}}{P_S}, \quad (3.180)$$

где $S_{\text{ср. изм}}$ и $P_{\text{Сизм}}$ — соответственно измеренные значения средней мутности и расхода взвешенных наносов реки, а $S_{\text{ср}}$ и P_S — значения мутности и расхода наносов, вычисленные по формуле.

Выполненные исследования позволили предложить комбинированный способ определения сезонного и годового стока взвешенных наносов, основанный на сочетании теоретического метода расчета с измерениями, выполняемыми для коротких промежутков времени. Периоды обязательных измерений назначаются в соответствии с типом водного режима рек и крупностью донных отложений.