

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ, СЛУЖАЩИХ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСХОДА НАНОСОВ

Я. БОГАРДИ

Будапештский Технический Университет, Кафедра Гидротехнического Стронтельства

(Поступило 15-го июня 1969 г.)

Введение

Для определения влекомых наносов используются различные методы и способы. В начале написали принципиальные зависимости на основании теоретических соображений, которые обычно установились лабораторными исследованиями графически или нумерически. Позднее приступили к натурным измерениям на самих водотоках и старались измерять фактический расход наносов, транспортируемых водотоком. При этом применялись различные расходомеры т. н. донные батометры. Однако такие измерения скоро прекратились после некоторых начальных успехов, так как оказалось, что чрезвычайно трудно создать такой прибор, при помощи которого достаточно точно могли бы измерять расход наносов. Так сложилось новое направление развития, согласно которому исследователи старались установить зависимости для определения стока наносов исключительно путем лабораторных опытов.

При этом очень часто, главным образом при лабораторных опытах определяли т. н. полный расход наносов (G_t (кг/сек)), т. е. расход влекомых и взвешенных наносов.

При транспорте наносов водотоками необходимо решить много трудных задач. Среди них можно сказать, что сложнейшим является определение стока наносов. Такое положение подтверждается и тем обстоятельством, что до сих пор не удалось установить зависимость, которая удовлетворила бы всем требованиям, несмотря на то, что в этой области имеется много опубликованных статей.

В настоящей статье рассматриваются прежде всего теоретические зависимости с математической и физической точки зрения. Следует отметить, что определенно нельзя разграничить теоретические и опытные зависимости, полученные лабораторным путем. Несмотря на то, что все теоретические зависимости нуждаются в доказательствах, выведенных на основании лабораторных исследований или натуральных измерений, зависимости все-таки напишутся на основании заранее установленных принципиальных связей даже при лабораторных опытах.

Зависимости считаются приемлимыми только тогда, когда они точны с теоре-

тической точки зрения и объяснимы физически. Следовательно относительно надежности формул, определяющих величину стока наносов предъявляются такие же условия, которые требуются и для математической формулировки любого физического явления.

Теоретические зависимости

Пусть рассматриваются некоторые зависимости без стремления к полноте, которые считаются значительными с исторической или теоретической точки зрения.

Пионер теоретического развития наносного режима *Ду Боа* [1] предполагает, что влекаемые наносы перемещаются слоями таким образом, что скорость перемещения верхнего слоя и слоя толщиной, равной диаметру d частицы является наибольшей и ее величина уменьшается линейно до нижнего слоя, до нуля.

Эта зависимость напишется следующим образом:

$$q_B = c_B \tau_0 (\tau_0 - \tau_c) \quad (1)$$

где q_B (кг/сек.м) расход наносов, τ_0 фактическая, а τ_c (кг/м²) критическая влекущая сила, c_B (м²/кг. сек) коэффициент размерности. Данная зависимость физически не обоснована, так как наносы движутся не по слоям. Наносы перемещаются слоями или грядами только под действием некоторых местных или временных воздействий.

Согласно формуле (1) расход наносов является пропорциональным с т. н. *эффективной влекущей силой* ($\tau_0 - \tau_c$). Такое положение считается теоретически неправильным в том смысле, что критическая влекущая сила τ_c по существу является не существующей, фиктивной величиной при движении наносов согласно закону изменяющейся критической влекущей силы [2].

Подобно этому можно сказать, что критическая скорость v_c и критический расход воды q_c при движении наносов представляли бы собой соответственно не существующую фиктивную скорость или расход подобно критической влекущей силе [3].

То обстоятельство, что в данном случае открывается возможность для определения расхода наносов по величинам ($\tau_0 - \tau_c$) и ($v - v_c$) или по эффективным величинам ($q - q_c$) очевидно означает только, что гидравлические характеристики движения воды при отдельных сериях опытов являются такими, при которых изменением величины τ_c , v_c и q_c можно пренебречь.

Роль эффективной влекущей силы объясняется при определении q_B по нижеследующему.

Согласно закону изменяющихся критических влекущих сил [2] можно написать, что неназванный коэффициент сопротивления *Шильдса*

$$\tau_c = f_c(\gamma_1 - \gamma)d \quad (2)$$

в зависимости

$$f_c = \frac{\tau_c}{(\gamma_1 - \gamma)d} \quad (3)$$

не имеет постоянную величину при заданном диаметре d частиц и удельном весе γ_1 (кг/м³) наносов и при заданном удельном весе γ воды, а его величина зависит от других гидравлических характеристик движения воды. Если ν (м²/сек) будет кинематической вязкостью воды, а g (м/сек²) ускорением силы тяжести и D (м) гидравлический радиус или средняя глубина воды и S уклон линии энергии, тогда согласно закону изменяющихся критических влекущих сил неназванный коэффициент сопротивления f_c зависит кроме удельного веса γ_1 и γ , также диаметра частиц d и от безразмерной величины

$$\frac{d}{\nu^{2/3} g^{-1/3}} = \frac{d}{A} \quad (4)$$

или от относительной шероховатости D/d и от уклона S .

По фактической глубине воды и действительному уклону можно определить коэффициент

$$f_0 = \frac{\tau_0}{(\gamma_1 - \gamma)d} = \frac{\gamma DS}{(\gamma_1 - \gamma)d} \quad (5)$$

подобно коэффициенту f_c , имеющему место при критическом состоянии ак как

$$(\tau_0 - \tau_c) = (f_0 - f_c)[(\gamma_1 - \gamma)]d \quad (6)$$

не характеризует единогласно величину стока наносов при известном удельном весе γ_1 и γ и при диаметре частиц d , несмотря на то, что величина f_0 является постоянной, а величина f_c будет изменяться в зависимости от уменьшения глубины воды или уклона или обеих этих величин.

Изменение f_c и следовательно $(f_0 - f_c)$ хорошо показывается нижеследующим численным *примером*.

Пусть будет диаметр частицы наноса $d = 0,047$ см, а глубина воды $D = 9,4$ см, уклон $S = 0,000254$, а температура воды 20 С°. Согласно трехразмерной графической зависимости [рис. 5. из 2.] величина f_c будет следующей:

$$f_c = F \left(\frac{d}{\nu^{2/3} g^{-1/3}}, \frac{D}{d} \right) \quad (7)$$

так как $D/d = 200$ и $\frac{d}{\nu^{2/3} g^{-1/3}} = 10$ и таким образом получается $f_c = 0,0155$.

По формуле (5) величина f_0 будет постоянной, т. е.

$$f_0 = \frac{\gamma DS}{(\gamma_1 - \gamma)d} = \frac{1 \cdot 9,4 \cdot 0,000254}{(2,65 - 1) \cdot 0,047} = 0,031$$

следовательно

$$(f_0 - f_c) = 0,031 - 0,0155 = 0,0155$$

Однако если неназванный коэффициент сопротивления f_c определяется трех-размерной графической зависимостью [рис. 6. из 2.], т. е.

$$f_c = F\left(\frac{d}{\nu^{2/3} g^{-1/3}} \cdot S\right) \quad (8)$$

тогда величинам $S = 0,000254$ и $d/A = 10$ соответствует величина $f_c = 0,0255$.

Ввиду того, что величина f_0 будет неизменно $f_0 = 0,031$, по зависимости (8) получается $f_0 - f_c = 0,031 - 0,0255 = 0,0055$, т. е. значительно меньше по сравнению с величиной f_c , определенной по зависимости (7).

Расхождение при этом объясняется законом изменяющихся критических влекущих сил, так как величиной $f_c = 0,0155$, определенной по зависимости (7) критическое состояние характеризуется правильно только тогда, когда уклон по зависимости (8) стал бы $S = 0,000127$ согласно указанной величине. Однако величина фактического уклона $S = 0,000254$ два раза больше последней и поэтому происходит движение наносов.

Однако если по зависимости (8) рассматривается фактическая величина уклона, тогда по зависимости (7) относительная шероховатость $D/d = 77$ при критическом состоянии соответствовала бы $f_c = 0,0255$, т. е. глубина воды получилась бы только по величине $D = 77 \cdot 0,047 = 3,62$ см. Фактическая глубина воды однако больше этого, т. е. она будет $D = 9,4$ см и поэтому происходит движение наносов.

По вышесказанному очевидно, что величина f_c или τ_c , характеризующая начало движения, т. е. критическое состояние не может быть определена единогласно при транспорте наносов в случае известных d , γ_1 , γ , D и S .

На основании этого зависимость Du *Боа* нельзя считать приемлимой ни физически, ни теоретически и она имеет место только для узкого диапазона опытных серий, из-за учета эффективных транспортирующих сил.

Зависимость для определения стока наносов по *Калинке* А. А. [4] написана при предположении, что влекомые наносы совершают движение при неустановившемся перемещении, а это движение изменяется и колеблется во времени в соответствии с турбулентными пульсациями. На основании теоретических соображений выведена зависимость

$$\frac{q_B}{U_* d \gamma_1} = 2,5\theta \left(\frac{\tau_c}{\tau_0} \right) = F \left(\frac{\tau_c}{\tau_0} \right) \quad (9)$$

где $U_* = \sqrt{gDS}$ — скорость трогания, а θ обозначает функцию, которая аналитически не определяется. Теоретические основы этой зависимости считаются правильными и физически обоснованными. Зависимость дает безразмерную величину и считается одной из первых зависимостей, которая теоретически правильна.

Недостатком зависимости *Калинке* является то, что как уже упоминалось, функция $F(\tau_c/\tau_0)$ может быть определена только экспериментальным путем. Это очевидно означает то же самое, что уже было установлено по зависимости *Ду Боа*, т. е. что τ_c является величиной не существующей и фиктивной. Ввиду того однако, что при опытным определении устанавливается безразмерный параметр, которым измеряется сток наносов, этот недостаток дает пренебрегаемую ошибку, особенно при весьма близких условиях измерения.

При этом считается целесообразным ввести унифицированное обозначение, так как в нижеследующих рассматриваются несколько таких безразмерных параметров, которые определяют расход наносов, транспортируемых за единицу времени при единичной ширине, q_B (кг/сек.м).

В нижеследующих увидим, что параметр расхода наносов определяется через Φ *Эйнштейном Х.* Взаимствующим и принимающим такое обозначение в нижеследующих параметры различного расхода наносов обозначаются через Φ , с индексом, представляющим собой инициал фамилии исследователя, введившего данный параметр. Согласно этому параметр *Калинке* в нижеследующих обозначается через Φ_K , т. е. вводится выражение:

$$\Phi_K = \frac{q_B}{U_* d \gamma_1} \quad (10)$$

для подставления.

Сток наносов по *Леви И. И.* [5] определяется по нижеследующей зависимости, написанной на основании теоретических соображений при использовании средней v и критической скорости v_c , также при использовании относительной шероховатости d/D и числа Фруда $\frac{v}{\sqrt{gd}}$ для наносов:

$$q_B = 0,002 \left(\frac{v}{\sqrt{gd}} \right)^3 d(v - v_c) \left(\frac{d}{D} \right)^{0,25} \quad (11)$$

Зависимость, написанная *Леви* представляет собой переход между теоретическими и эмпирическими зависимостями. Расход наносов является зависимостью от числа Фруда и от величины относительной шероховатости,

что теоретически считается правильным. При этом однако можно возражать против того, что отдельно не указывается уледный вес наноса и воды, далее, что в зависимости используется не существующая фиктивная критическая скорость транспорта наносов.

Эйнштейн X. [6] написал зависимость для определения интенсивности транспортирования наносов по нижеследующему:

$$\Phi = \frac{q_B}{\gamma_1} \left(\frac{q}{q_1 - q} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{1}{gd^3} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

через параметр, а интенсивность движения воды через параметр Ψ' .

Расход наносов при этом определяется для наносов одинакового диаметра зерна по формуле

$$\Phi = F(\Psi) \quad (13)$$

где вероятность движения некоторой частицы определяется по нижеследующей зависимости:

$$p = 1 - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-B \cdot \Psi - 1/\eta_0}^{+B \cdot \Psi - 1/\eta_0} e^{-t^2} dt = \frac{A_*^4 \Phi_*^4}{1 + A_*^4 \Phi_*^4} \quad (14)$$

где $A_* = 43,5$, $B_* = 0,143$, $\eta_0 = 0,5$, а t коэффициент, учитываемый при интегрировании.

Если речь идет о наносах не одинакового диаметра зерна, тогда сток наносов определяется по следующей зависимости:

$$\Phi_* = \frac{i_G}{i_g} \Phi \quad (15)$$

и по

$$\Psi_* = \xi Y \frac{(\beta/\beta_x)^2}{\Theta} \quad (16)$$

т. е. можно написать, что сток наносов будет

$$\Psi_* = F(\Psi_*) \quad (17)$$

В вышенаписанных зависимостях через i_G/i_g обозначается относительная часть дна русла, которая покрывается наносами, имеющими некоторый определенный диаметр зерна. При этом через ζ , Y , $(\beta/\beta_x)^2$ и Θ обозначаются поправочные коэффициенты, при помощи которых выражается влияние различных диаметров зерен.

Теоретическая зависимость *Эйнштейна* является принципиально правильной и физически обоснованной. По этой зависимости можно убедиться в том, что параметр расхода наносов прежде всего зависит и в этом случае от величины ψ , т. е. от интенсивности водотока. Если наносы слагаются из зерен с различными диаметрами, тогда расход наносов следует определить для каждой фракции отдельно, что очень трудоемкая задача и для этого требуется много времени. При этом имеется возможность для некоторого приближения и Эйнштейн предлагает вести расчет при учете диаметра зерен, принадлежащего к 35%-у по весу если расхождения являются незначительными между диаметрами.

На основании результатов испытаний и натуральных измерений можно сказать, что в настоящее время зависимость, написанная *Эйнштейном* для определения расхода наносов является наиболее надежной среди всех остальных зависимостей.

Шильдс [7] получил следующую эмпирическую формулу на основании результатов испытаний:

$$\frac{q_B(\gamma_1 - \gamma)}{q\gamma S} = 10 \frac{\tau_0 - \tau_c}{(\gamma_1 - \gamma) d} \quad (18)$$

Согласно вышеуказанным обозначениям параметр на левой части формулы (18) пусть обозначается через Φ_S и таким образом параметр расхода наносов по *Шильдсу* можно определить по следующей зависимости:

$$\Phi_S = 10 \frac{(\tau_0 - \tau_c)}{(\gamma_1 - \gamma) d} \quad (19)$$

По существу зависимость *Шильдса* можно считать физически правильной. Однако введение $(\tau_0 - \tau_c)$ считается не правильным, так как величина τ_c не может быть установлена из-за фиктивной ее величины. Об этом уже убедились у зависимости *Ду Боа*. Параметр Φ_S имеет своеобразный характер в том смысле, что в нем присутствует соотношение двух таких первоначальных величин (q_B и q), каждая из которых зависит от одних и тех же независимых физических величин. Вводить такой коэффициент конечно допускается, однако величина q_B может быть определена только при знании величины q . К этому вопросу еще вернемся при рассмотрении параметров стока наносов.

Егизаров И. В. [8] ввел для определения расхода влекомых наносов параметр

$$p'' = \frac{q_B}{\gamma q} \quad (20)$$

т. е. соотношение между секундным расходом наносов единичной ширины, пересчитанным на объем при учете удельного веса воды и расходом воды q . После этого он использовал при исследованиях параметр расхода наносов

$$\Phi_E = \frac{p''}{S^{1/2}} = \frac{q_B}{qS^{1/2}} \quad (21)$$

при учете влияния уклона на основании различных соображений, т. е. соотношение между величиной p'' и квадратного корня уклона.

Егуазаров считал на основании собственных и других опытов, что Φ_E находится в тесной корреляции с $(\tau_0 - \tau_c)$, т. е. с соотношением между эффективной и критической τ_c влекущей силой наносов при полной турбуленции. Таким образом получается следующая зависимость:

$$\Phi_E = K \frac{(\tau_0 - \tau_c)}{\tau_c} = K \left(\frac{RS}{f_c q' d} - 1 \right) \quad (22)$$

так как $\tau_0 = \gamma RS$, $\tau_c = f_c (\gamma_1 - \gamma) d$ и $\frac{\gamma_1 - \gamma}{\gamma} = \frac{q_1 - q}{q} = q'$

Зависимость *Егуазарова* по существу базируется на понятии об эффективных энергиях, т. е. $(N_0 - N_c)$, как на это было указано при его исследованиях.

Ввод понятия об эффективной относительной энергии физически считается обоснованным, однако для практического его применения необходимо выполнить еще дальнейшие исследования, согласно мнению автора.

Параметры расхода наносов

Расход наносов определяется весом наносов, транспортируемых за единицу времени через единицу ширины водотока, т. е. расход наносов будет q_B (кг/сек. м). Иногда расход наносов можно выражать и через объем и в таком случае необходимо использовать обозначение Q_B (м³/сек).

Физически *расход наносов* q_B является *равнодействующей величиной*, которая зависит от независимых переменных, характерных для водотока, для воды и для наносов.

Целесообразно ввести вместо q_B некоторый безразмерный параметр, который просто называется *параметром расхода* наносов. С точки зрения процесса транспортирования наносов этот параметр математически и физически считается точным, если через него выражается только *единственная неизвестная равнодействующая величина* q_B , а все другие физические величины получаются из известных независимых переменных. Согласно такому опре-

делению параметр расхода наносов всегда будет иметь физическое истолкование.

Для доказательства этого прежде всего пусть рассматривается т. н. параметр *Калинке*, т. е. $\Phi_K = \frac{q_B}{U_* \gamma_1 d}$. При этом расход наносов получается в объемных единицах после разделения веса наносов q_B (кг/сек. м) на удельный вес наносов γ_1 . Если полученную таким образом величину еще разделим на величину диаметра зерна d , тогда соотношение $\frac{q_B}{\gamma_1 d}$ выражает вес наносов, транспортируемых за единицу времени через единичную ширину в объемных единицах относительно единичной величины диаметра зерен. Его размерность соответствует размерности скорости, т. е. будем иметь *такую равнодействующую скорость, которая выражает величину расхода наносов*. Если величина этой скорости разделяется на т. н. потенциальную динамическую скорость [9, 10], полученную из независимых физических величин, определяющих данное явление, получается искомый параметр расхода наносов, который является безразмерной величиной и математически и физически правильной. Эта потенциальная динамическая скорость представляет собой скорость трогания U_* при Φ_K согласно вышесказанным.

Параметром *Шильдса* (18) и (19) определяется соотношение между результирующим расходом наносов q_B и q расходом воды (так как по существу q считается результирующей величиной).

Введение двух результирующих величин, т. е. их соотношение математически считается правильным. Его недостатком однако считается то, что при определении q_B следует измерять и величину q . Тем самым объясняется между прочим то обстоятельство, что зависимость (18) *Шильдса* показывает тесную корреляцию, так как при введении q при неизменных условиях измеренная выражается всякое влияние независимых переменных, так как его величина установлена путем измерения, а не при помощи какой-либо неизвестной или малоточной зависимости.

Леви также принимает в качестве параметра расхода наносов соотношение q_B и q и таким образом при этом имеет место все вышесказанное относительно параметра *Шильдса*.

Егиазаров (21) дал правильный параметр расхода наносов с математической точки зрения, но так как помимо результирующей q_B величиной является и q , этот параметр может быть использован только тогда, когда величина расхода q заранее известна.

Как уже несколько раз упоминалось, ввести критическую транспортирующую силу τ_c принципиально не правильно, так как эта величина является фиктивной и единогласно не определима.

Можно ожидать, что такое противоречие устраняется путем введения понятия эффективных энергий. Именно поэтому мы считаем, что зависимость

Егнazarова значительно может быть улучшена путем введения понятия эффективных энергий и путем выяснения всех подробностей при помощи дальнейших исследований.

Параметр Φ , введенный Эйнштейном (12) может быть истолкован с физической точки зрения по нижеследующему: $\frac{q_B}{\gamma_1}$ выражает объем наносов, транспортируемых за единицу времени через единичную ширину. Если эта величина разделяется на величину d , тогда через соотношение $\frac{q}{\gamma_1 d}$ выражается результирующая скорость, измеряющая объем наносов, отнесенных на единичный диаметр зерна за единицу времени через единичную ширину. Если полученная таким образом величина сопоставляется с независимой потенциальной динамической скоростью $\sqrt{gd\sigma'}$, тогда уже получен параметр Φ .

Параметр Φ Эйнштейна считается математически правильным и физически истолкуемым.

Автор при своих исследованиях ввел подобные параметры, которые однако незначительно отличаются от вышеуказанных параметров, только подобными считаются математические и физические основы. Введенные параметры в различных формах служат для того, чтобы тем самым имелась возможность для определения транспортирования наносов при учете зависимостей самых различных форм.

Автор сперва ввел нижеследующий параметр:

$$\Phi_B = \frac{q_B}{(\gamma_1 - \gamma)} \cdot \frac{1}{D} \cdot \left(\frac{1}{gd}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\gamma}{\gamma_1 - \gamma}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (23)$$

Этот параметр физически истолковывается таким образом, что расход наносов, транспортируемых за единицу времени через единичную ширину определяется в объемных единицах, отнесенных к удельному весу воды. Это дается через соотношение $\frac{q_B}{(\gamma_1 - \gamma)}$. Если вместо единичной ширины учитывается площадь единичного живого сечения, т. е. если разделяется на глубину воды D , тогда соотношение $\frac{q_B}{(\gamma_1 - \gamma)D}$ представляет собой уже такую результирующую скорость, которой измеряется расход наносов. Ее соотношение с потенциальной динамической скоростью $\sqrt{gd\sigma'}$ дает выражение, указанное под номером (23).

Параметр Φ_{B_1} автора получается через выражение

$$\Phi_{B_1} = \frac{q_B}{(\gamma_1 - \gamma)^v} \quad (24)$$

если расход наносов, отнесенный на единицу площади живого сечения и выраженный в объемах при учете удельного веса воды, т. е. если $\frac{q_B}{(\gamma_1 - \gamma) D}$ результирующая скорость разделяется на потенциальную динамическую скорость v/D .

Наконец следует отметить, что очень часто применяется главным образом при новейших исследованиях соотношение G_t (кг/сек) или G_s (кг/сек) и расхода воды Q , т. е. G (кг/сек) в качестве параметра. Хербертсон Й. Г. [11] ввел также параметр расхода наносов G_t/G , но таким образом, что при этом Q представляет собой независимый переменный, так как при заданной ширине канала независимой физической величиной считается только одна из величин глубины воды и уклона.

Новейшие исследования по определению общих зависимостей для получения расхода наносов

Общей зависимостью очевидно считается только такая зависимость для определения расхода наносов, при помощи которой можно учитывать диаметр зерна, уклон, и глубину воды, удельный вес наносов, температуру воды, даже и ширину канала при различных значениях. Результаты исследований показывают, что чрезвычайно трудно выводить точную зависимость, которая удовлетворила бы всем указанным требованиям. Трудность этой задачи тем более выявляется, если учитывается то обстоятельство, что едва ли можно представлять себе такую комбинацию переменных, с которой исследователи не занимались бы до сих пор. Несмотря на это, дальнейшие исследования считаются полезными, так как можно ожидать при этом выяснения ряда подробностей, хотя при этом нельзя установить точную зависимость для определения расхода наносов.

Исследование начинается определением параметра расхода наносов $\frac{Q_t}{Q}$ характерный для полного расхода наносов. Этот параметр напишется следующим образом

$$Q_t [\text{м}^3/\text{сек}] = \frac{q_t [\text{кг}/\text{сек} \cdot \text{м}] B [\text{м}]}{(\gamma_1 - \gamma) [\text{кг}/\text{м}^3]} = \frac{G_t [\text{кг}/\text{сек}]}{(\gamma_1 - \gamma) [\text{кг}/\text{м}^3]}$$

т. е. учитывая удельный вес наносов, измеряемый в воде, определяется объем наносов, транспортируемых за единицу времени. Следует отметить, что практически меньше всех можно использовать параметры расходов $\frac{Q_t}{Q}$. Этот параметр не целесообразно применять, так как расход воды Q нельзя считать

чисто независимым переменным. Расход воды Q зависит и от глубины воды помимо уклона, а это означает, что к любой величине D и Q принадлежит определенная величина уклона S . Следовательно, величина Q заменяет величину S как независимую переменную при таком ограничении.

Пусть предполагается, что расход наносов определяется следующими физическими величинами:

$$g, D, B, d, Q, v, \varrho' \quad (25)$$

Одним из недостатков классификации независимых переменных под (25) является то, что среди них не находится уклон S , который играет большую роль при движении наносов. Если сохраняется полный расход воды Q и глубина воды всего канала, тогда уклон можно считать независимой переменной величиной только тогда, когда устраняется ширина канала B . Согласно этому предполагается, что расход наносов определяется при помощи нижеследующих независимых физических величин:

$$g, D, d, Q, v, S, \varrho' \quad (26)$$

Пусть выбирается нижеследующая шестичленная группа независимых потенциальных динамических скоростей, получаемых из основных величин под (26):

$$\sqrt{gD}, \sqrt{gd}, \sqrt[3]{gv}, v^2/Q, \sqrt{gDS}, \frac{v^2}{Q} \varrho' \quad (27)$$

при помощи которых можно производить следующих пять групп без размерности:

$$\frac{\sqrt{gD}}{\sqrt{gd}} = \sqrt{\frac{D}{d}} \quad (28a)$$

$$\frac{\sqrt{gd}}{\sqrt[3]{gv'}} = \frac{d}{v^{2/3} g^{-1/3}} \quad (28b)$$

$$\frac{\sqrt[3]{gv'}}{v^2/Q} = \frac{Qg^{1/3}}{v^{5/3}} \quad (28c)$$

$$\frac{\sqrt{gDS}}{\sqrt{gD}} = \sqrt{S} \quad (28d)$$

$$\frac{v^2}{Q} \varrho' = \varrho' \quad (28e)$$

Следовательно, расход наносов определяется при помощи нижеследующей зависимости

$$\frac{Q_t}{Q} = F \left(\frac{D}{d}, \frac{d}{v^{2/3} g^{-1/3}}, \frac{Q g^{1/3}}{v^{5/3}}, S, q' \right) \quad (29)$$

Теоретическая зависимость (29) также рассмотрена при помощи использования нескольких зависимостей с тремя переменными. Среди них заслуживает большой интерес, например, зависимость

$$\frac{Q_t}{Q} = F \left(\frac{D}{d}, S \right) \quad (30)$$

Написанная зависимость изображена на рисунке 1 без учета качества дна русла, а на рисунке 2 для гладкого дна русла и наконец на рисунке 3 для дюнного дна русла. По всем рисункам можно видеть, что величина параметра расхода наносов увеличивается при увеличении уклона для той же относительной шероховатости D/d , далее, что параметр также увеличивается при увеличении относительной шероховатости D/d при одинаковых уклонах. Линии $S = \text{конст.}$ приблизительно можно нарисовать несмотря на то, что данная зависимость является весьма слабой. Интересно, что линии $S = \text{конст.}$ расположены одинаково на всех трех рисунках, что говорит о том, что качество дна русла не играет значительную роль при определении расхода наносов с учетом относительной шероховатости и уклона, хотя бы для диапазона экспериментальных величин.

Таким образом открывалась возможность для определения зависимости с тремя параметрами так как линии $S = \text{конст.}$ оказались параллельными на всех трех рисунках по зависимости

$$\frac{Q_t}{Q} = a_1 \left(\frac{D}{d} \right)^{1,95} \quad (31)$$

и благодаря этому открывалась возможность для определения величины a_1 для величин $10\,000 S = \text{конст.}$ или изменение a_1 в зависимости от $10\,000 S$. При знании этого можно написать зависимость с тремя переменными по нижеследующим:

$$\frac{Q_t}{Q} = 5,21 \cdot 10^{-14} (10\,000 S)^{3,41} \left(\frac{D}{d} \right)^{1,95} \quad (32)$$

Полученная таким образом зависимость имеет место для рисунков 1, 2 и 3, во всяком случае в качестве приближения.

Связь на рисунках 1, 2 и 3 по-видимому не тесная, что объясняется прежде всего тем обстоятельством, что полный сток наносов учитывался на основа-

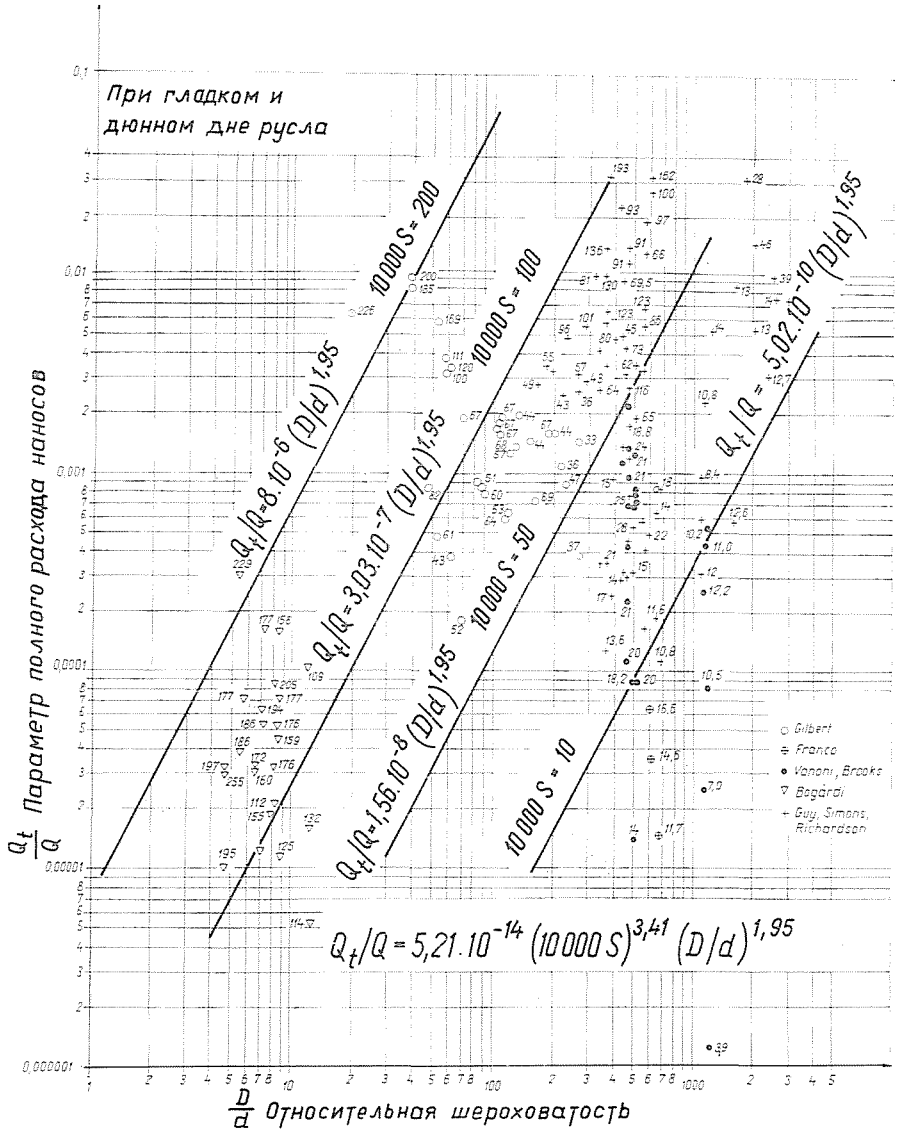


Рис. 1. Зависимость между параметром полного расхода наносов $\frac{Q_t}{Q}$ и уклоном S , также относительной шероховатостью D/d для гладкого и днунного дне русла

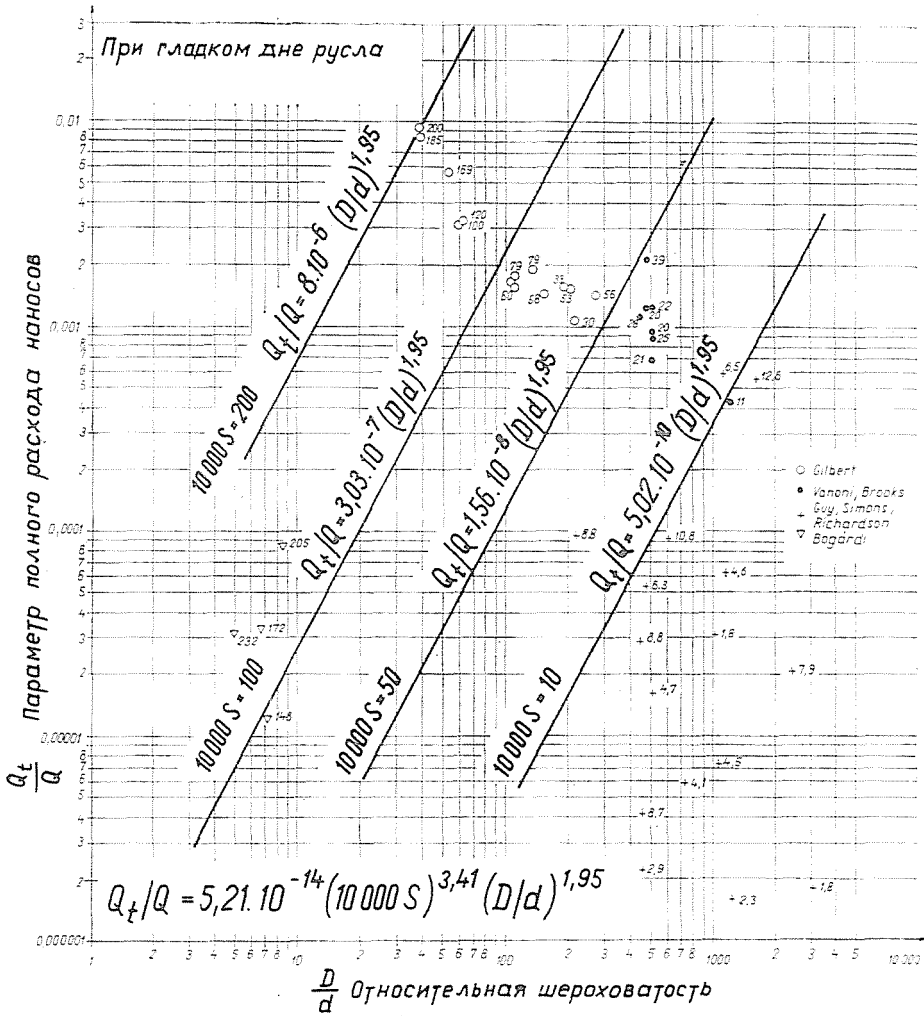


Рис. 2. Зависимость между параметром полного расхода наносов $\frac{Q_t}{Q}$ уклоном S и относительной шероховатостью D/d для гладкого дна русла

Таблица I

Предельные значения физических величин при экспериментах,

Характер дна русла	Расход воды Q м ³ /сек		Ширина канала B м		Глубина воды D м		Диаметр зерна d мм	
	макс	мин	макс	мин	макс	мин	макс	мин
Гладкое и дюнное	0,636	0,00482	2,4384	0,2011	0,589	0,0177	$15,49 \cdot 10^{-3}$	$0,137 \cdot 10^{-3}$
Гладкое	0,347	0,00516	2,4384	0,2011	0,589	0,0272	$10,56 \cdot 10^{-3}$	$0,137 \cdot 10^{-3}$
Дюнное	0,636	0,00482	2,4384	0,2011	0,5761	0,0177	$15,49 \cdot 10^{-3}$	$0,137 \cdot 10^{-3}$

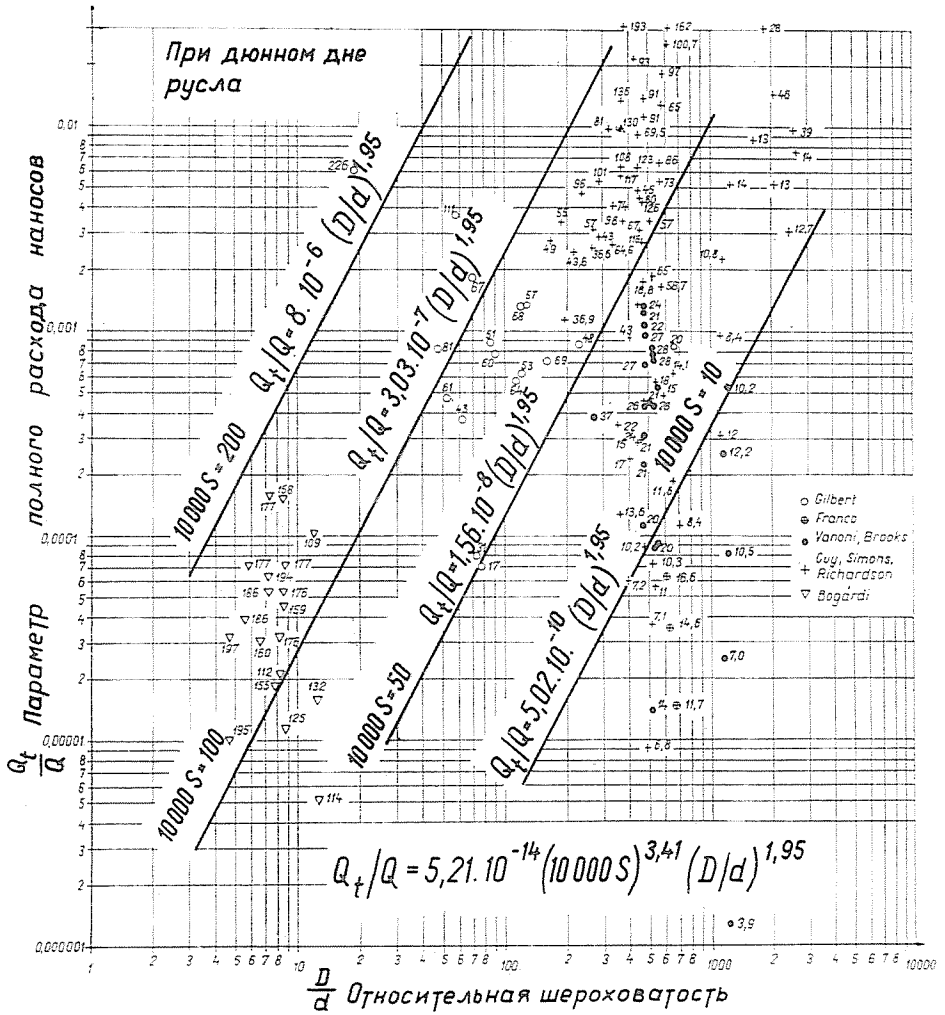


Рис. 3. Зависимость между параметром полного расхода наносов $\frac{Q_t}{Q}$, уклоном S и относительной шероховатостью D/d для донного дна русла

использованных для построения рисунков № 1, 2 и 3

Уклон S		Температура воды t °C		Удельный вес наносов γ_s кг/м³		Относительная шероховатость $D/1000 d$		Расход наносов Q_t м³/сек	
макс	мин	макс	мин	макс	мин	макс	мин	макс	мин
0,0232	0,00018	34,3	4,45	2670	2650	3,09	0,00467	0,0155	$3,29 \cdot 10^{-9}$
0,0232	0,00018	26,7	10,5	2650	2650	3,09	0,00495	0,0000974	$3,29 \cdot 10^{-9}$
0,0229	0,00039	34,3	4,45	2670	2650	2,69	0,00467	0,0155	$4,27 \cdot 10^{-9}$

нии нескольких весьма отличающихся экспериментальных данных. При этом можно указать также на расход воды Q , через который выражается, т. е. учитывается ширина канала при заданном уклоне и глубине воды, но несмотря на это, все-таки все характерные свойства экспериментальных каналов не выражаются. Очевидно, что рассеяние увеличивается и под действием диаметров зерна широкого диапазона, (от 15,49 мм до 0,137 мм), ведь диаметр зерна характеризуется параметром D/d только отчасти. Дальнейшим объяснением полученных расхождений можно указать на то, что при этом не учитывались расхождения удельных весов и температуры. Для построения рисунков 1, 2 и 3 использовалась область переменных экспериментов (предельные величины) по таблице I.

При дальнейших исследованиях попытались определить полный сток наносов при помощи параметров, введенных автором Φ_B и Φ_{B_1} , также параметра Эйнштейна Φ . Зависимости всегда написали для полного стока наносов, т. е. для суммарной величины влекомых и взвешенных наносов, что означает, что по существу в вышеуказанных параметрах Φ имеет место q_i вместо q_B .

Очевидно, что зависимости, служащие для определения параметров, расхода наносов и указанные в этой главе имеют место и для такого случая, когда ставится цель определить только расход влекомых наносов. В таком случае, конечно, в параметрах расхода наносов должно находиться q_B вместо q_i .

Указанные исследования ведутся в настоящее время. Ожидается, что как параметр Φ_B так и расходный параметр Φ можно выражать через параметр $j_0 = \frac{\tau_0}{(\gamma_1 - \gamma)d}$, даже открывается возможность для учета влияния, оказываемого изменением удельного веса.

Резюме

В статье рассматриваются зависимости по определению расхода наносов с точки зрения их физического истолкования. Против нескольких зависимостей среди них имеются теоретические возражения. В статье подробно рассматриваются т. н. параметры расхода наносов при изложении их физического истолкования. В заключительной части приводятся новейшие исследования, при помощи которых можно получить общие зависимости для определения расхода наносов. Расходный параметр полного стока наносов рассматривается в зависимости от относительной шероховатости и от уклона графически и нумерически.

Литература

1. DU BOYS: Etude du régime du Rhône et de l'action exercée par les eaux sur un lit à fond de graviers indéfiniment affouillable. Annales des Ponts et Chaussées, 5, Paris 1879.
2. БОГАРДИ, Я.: Bestimmung der Grenzzustände bei der Geschiebebewegung. — Die Wasserwirtschaft, 57. Jahrgang, Heft 7, Juli 1968., pp. 205—212.
3. БОГАРДИ, Я.: Incipient sediment motion in terms of the critical mean velocity. — Acta Technica Ac. Sc. Hung., 62, 1—24 (1968).
4. KALINSKE, A.: Movements of sediment as bed-load in rivers, Trans. American Geophysical Union, 1947. Nr. 4. pp. 615—620.
5. ЛЕВИ, И. И.: Динамика русловых потоков. Ленинград—Москва 1948.
6. EINSTEIN, H. A.: The bed-load function for sediment transportation in open channel flows. U.S. Dept. of Agric. Tech. Bull No. 1026, Washington 1950.
7. SHIELDS, A.: Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. Mittl. der Preussischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, H. 26. Berlin 1936.
8. EGIAZAROFF, I. V.: Large range mixture sediment movement and discharge shadowing and self parent effect. Izvestiya Akademii Nauk Armyanskoy SSR, 17, (1964).
9. Богарди, Я.: Некоторые теоретические положения транспорта наносов водных потоков.* ЕКМЕ Tud. Közl. 13, 363
10. Богарди, Я.: Теоретическое исследование связей при транспорте наносов водными потоками.* — Hidrológiai Közlöny, 215—226 (1967).
11. HERBERTSON, J. G.: Data correlations for sediment transport in flumes. Bulletin of the I.A.S.H., XIII^e Année. 2, 5—19 (1968).

* По- венгерски.

Prof. Dr. János BOGÁRDI, Budapest XI., Műegyetem rkp. 3. Hungary