

ГИДРАВЛИКА

В. Г. САНОЯН

К ПРОГНОЗУ ПРОЦЕССА ЗАИЛЕНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩ

В основе расчета процесса заиления подпертых бьефов и водохранилищ наряду с основными уравнениями гидродинамики лежит уравнение транспортирующей способности потока [1], для определения которой существуют много зависимостей, большинство из которых носит эмпирический характер и могут быть применены только для тех условий, при которых они получены. Наиболее обоснованной из существующих работ по определению транспортирующей способности потока можно считать [2], где впервые рассмотрено влияние взвешенных частиц на динамику потока и вычислена работа, которую затрачивает поток на поддержание этих частиц. Однако, эта работа в [2] включена в энергобаланс осредненного движения, что вызвало критику со стороны других исследователей.

В отличие от [2] нами рассмотрен энергетический баланс двухфазного потока в полном его виде [3]. Написав эти уравнения для простейшего случая плоскопараллельного квазистационарного движения, после оценок отдельных слагаемых получим:

$$\gamma_c g i u_{cp} h = \lambda_0 \gamma_c u_{cp}^2 + A_{у,ср} \quad (1)$$

где $A_{у,ср}$ — средняя по сечению работа взвешивания; λ_0 — коэффициент сопротивления чистой жидкости. Остальные обозначения общеприняты.

Обработка опытов, проведенных в АрмНИИВПиГ, показала, что в широком диапазоне изменения параметров потока и наносов справедливо равенство

$$\gamma_c g i u_{cp} h = \lambda_{np} \gamma_c u_{cp}^2 \quad (2)$$

где λ_{np} — коэффициент сопротивления потока при его предельном насыщении наносами.

Если разделить (1) на (2), то из постоянства отношения λ_0/λ_{np} следует, что

$$\frac{A_{у,ср}}{\gamma_c g i u_{cp} h} = \text{const.} \quad (3)$$

Входящее в (3) значение работы взвешивания $A_{у,ср}$ можно определять по [2] или [3]. Согласно [3]

$$A_{\text{ср}} = \frac{1}{2} [(v_1 - v_2) gws(1-s) - v_2 gws]. \quad (4)$$

Подставляя (4) в (3), получим уравнение транспортирующей способности потока в случае равномерного движения:

$$\frac{ws(1-s)}{(1+as)ui} = \frac{ies}{ui} = \text{const.} \quad (5)$$

Зависимость (5) ранее проверена опытными данными по напорному гидротранспорту Блетча, Палчевского, Кнороза, которые приведены на рисунке. Там же нанесены точки, полученные в результате обра-

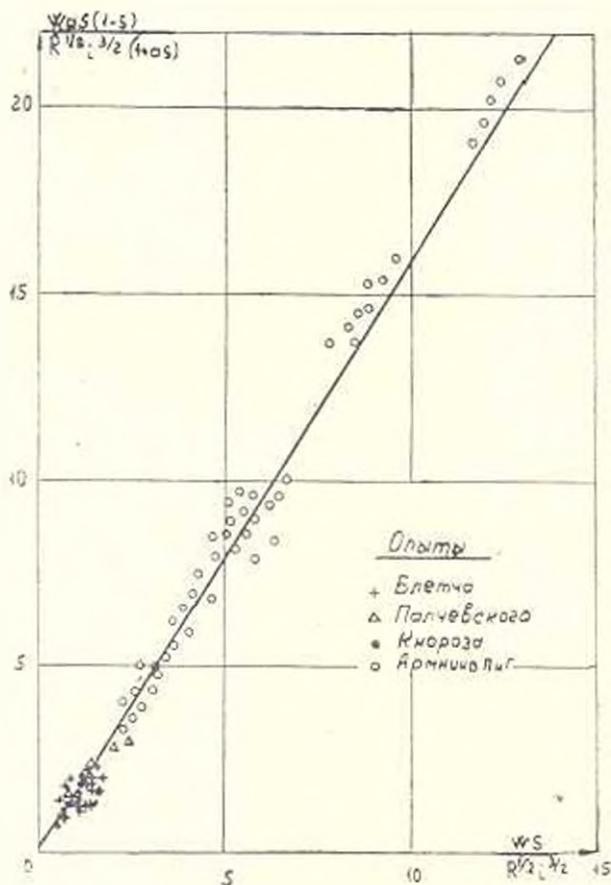


Рис.

ботки экспериментов, проведенных в АрмНИВПиГ. Эксперименты проводились в прямоугольном лотке длиной 11 м, поперечными размерами $0,37 \times 0,25$ см². Уклон лотка изменялся от 0,01 до 0,08, а расход воды — от 4 л/с до 60 л/с. Твердый расход всегда соответствовал транспортирующей способности потока и изменялся в пределах от 0,05 кг/с до 10 кг/с. В экспериментах использовалось семь различных составов наносов со средневзвешенными диаметрами от 0,90 мм до 13,8 мм и удельным весом 2,65 т/м³.

Из графика видно, что опытные точки АрмНИИВШиг удовлетворительно ложатся вокруг прямой, проведенной по зависимости (5), что является повторным подтверждением выражения (3).

При малой мутности ($1-s \approx 1$; $1+as \approx 1$) из уравнения (5) получим

$$s = \text{const} \frac{af}{\omega a} = \text{const} \frac{a^3}{\omega a l} \quad (6)$$

Структура формулы (6) соответствует многочисленным эмпирическим и полуэмпирическим зависимостям, общим недостатком которых является то, что они относятся к равномерному потоку.

Перейдем к выводу уравнения транспортирующей способности потока в случае стационарного неравномерного движения.

Рассматривая гидравлическую постановку задачи, движение будем принимать одномерным. Основное движение происходит по одному, в общем случае, криволинейному направлению. В поперечных направлениях движение принимается малым. Тогда, принимая во внимание малость плотности турбулентной энергии по сравнению с плотностью осредненной энергии [4] и учитывая, что продольные скорости жидких и твердых частиц по величине практически равные, пренебрегая малыми величинами, получим:

$$\begin{aligned} \gamma_s \sum_{i=1}^3 u_i \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{v^2}{2} = - \frac{\partial}{\partial x_2} u_1 (\Pi_{12} + \Pi_{12'}) - \frac{\partial}{\partial x_3} u_1 (\Pi_{13} + \Pi_{13'}) - \\ - \frac{\partial k_1}{\partial x_2} - \frac{\partial k_1}{\partial x_3} - \frac{\partial k_{12}}{\partial x_2} - \frac{\partial k_{13}}{\partial x_3} - \sum_{i=1}^3 u_i \frac{\partial p}{\partial x_i} + A + A' + \gamma_s \sum_{i=1}^3 u_i x_i \quad (7) \end{aligned}$$

где Π_{ik} и $\Pi_{ik'}$ — тензоры турбулентных напряжений, соответственно, жидких и твердых частиц; k_i и k_{ik} — турбулентная теплопроводность жидкости и твердых частиц; A — работа турбулентных напряжений жидких частиц:

$$\begin{aligned} A = - \sum_{i,k=1}^3 (1-s) u_i \frac{\partial p_{ik}}{\partial x_k} = - \frac{\partial}{\partial x_2} \overline{(1-s) u_2 p'} - \frac{\partial}{\partial x_3} \overline{(1-s) u_3 p'} - \\ - \sum_{i,k=1}^3 \overline{(1-s) u_i \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u'_k}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_k}} + \sum_{i,k=1}^3 (1-s) u_i \frac{\partial}{\partial x_k} u_i \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u'_i}{\partial x_i} \right) \quad (8) \end{aligned}$$

Вводя функцию давления $\frac{dP}{\gamma_s} = dP$, потенциальную функцию — $\frac{\partial \pi}{\partial x_i} = x_i$ (для силы тяжести $\pi = gz$) и имея в виду, что $\sum_{k=1}^3 u_k \frac{\partial x}{\partial x_k} = v \frac{\partial x}{\partial l}$, где l — направление к касательной линии тока, уравнение (7) приведем к виду:

$$\gamma_s v \frac{d}{dl} \left(\frac{v^2}{2} + P + \pi \right) = \left| \frac{\partial}{\partial x_2} u_1 (\Pi_{12} + \Pi_{12'}) + \frac{\partial}{\partial x_3} u_1 (\Pi_{13} + \Pi_{13'}) \right| + A s \quad (9)$$

Если проинтегрировать уравнение (9) по живому сечению потока, принимая во внимание, что интеграл от члена в квадратных скобках правой части представляет работу сил сопротивлений, которая в квадратичной зоне сопротивления равна $k\gamma_e/v_{cp}^2 r$, получим:

$$g\gamma_e v_{cp} \frac{d}{dl} \left(\frac{v_{cp}^2}{2g} + \frac{p}{g} + \frac{\pi}{g} \right) = -k\gamma_e \frac{v_{cp}^3}{r} + A, \text{ ср.} \quad (10)$$

Это уравнение отличается от (1) тем, что в его левой части взамен изменения потенциальной энергии участвует конвективная производная, отнесенная к единице веса смеси полной энергии $E = \frac{\pi}{g} + \frac{p}{g} + \frac{v_{cp}^2}{2g}$.

Выполняя рассуждения, аналогичные при получении формулы (6), будем иметь:

$$s = \frac{\text{const}}{\omega a} v \left| \frac{d}{dl} \left(z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} \right) \right|. \quad (11)$$

Согласно (11) транспортирующая способность в данном створе стационарного потока пропорциональна скорости и градиенту полной энергии, отнесенной к единице веса.

Очевидно, что для открытого потока в уравнении (11) z будет представлять отметку дна русла, а p/γ заменяется глубиной потока h . Тогда воспользуясь Эйлеровым представлением для конвективного изменения от полной энергии в объеме, ограниченном поверхностью σ и состоящей из боковых поверхностей русла, свободной поверхностью в двумя сечениями, перпендикулярными направлению движения, получим:

$$s = \frac{\text{const}}{\omega a} \frac{Q \left[\left(z_1 + h_1 + \frac{v_1^2}{2g} \right) - \left(z_2 + h_2 + \frac{v_2^2}{2g} \right) \right]}{\int_1^2 z dx} \quad (12)$$

В уравнении (11), заменяя конвективную производную от полной энергии правой частью уравнения энергобаланса — работой сопротивлений, получим:

$$s = \frac{\text{const}}{\omega a} \left(\frac{v^2}{c^2 r} + \sum N_{\omega} \right) \quad (13)$$

или

$$s_{1-2} = \frac{\text{const}}{\omega a} \left(\frac{\int_1^2 \frac{v^2}{c^2 r} z dx}{\int_1^2 z dx} + \sum N_{\omega} \right). \quad (14)$$

где ΣN_{mi} — работа местных сопротивлений, отнесенная к единице веса жидкости.

Итак, в случае нестационарного движения, перенеся в правую часть уравнения энергобаланса локальную производную от интенсивности кинетической энергии, получим:

$$s = \frac{\text{const}}{\omega a} \left(\frac{\partial^3}{\partial^2 r} + N_{\Sigma} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial t} \right) \quad (15)$$

или

$$s_{1-2} = \frac{\text{const}}{\omega a} \left(\frac{\int \frac{v^3}{\partial^2 r} \partial dx + \int \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial t} \partial dx}{\int \partial dx} + \Sigma N_{mi} \right). \quad (16)$$

В нестационарном потоке транспортирующая способность пропорциональна сумме работ сопротивлений и инерционных сил.

Полученные зависимости наряду с разнообразными задачами, связанными с движением наносонесущего потока, можно применить также для предварительных оценок при прогнозировании заиления водохранилищ и подпертых бьефов, не производя детальных расчетов, т. к. величиной транспортирующей способности потока в водохранилище определяется степень его заиления.

На основании полученных зависимостей можно сделать следующие выводы и заключения.

1. При прочих равных условиях транспортирующая способность в расширяющемся русле больше, а в сужающемся меньше, чем в призматическом. Это означает, что уменьшение скоростей вдоль течения может привести к увеличению транспортирующей способности и, наоборот.

Из уравнения (12) видно также, что наибольшей транспортирующей способностью обладает поток в расширяющемся русле со свободной поверхностью в виде кривой спада; в этом случае все члены в круглых скобках с индексом «2» меньше соответствующих членов индексом «1».

Это, на первый взгляд, парадоксальное заключение явилось предметом тщательных экспериментальных проверок в гидравлической лаборатории АрмНИИВШГ, в результате чего оно полностью подтвердилось [5]. Как следствие предложена новая конструкция селегазонирующего сооружения, на которое получено авторское свидетельство [6].

Из вышеупомянутого заключения следует, что водохранилище, осуществляемое на сужающемся русле, будет значительно интенсивнее заиляться, чем на призматическом или расширяющемся руслах. Для одной и той же скорости потока могут соответствовать разные мутности в зависимости от того, подходя к данному створу поток сужается или расширяется.

2. При течении волны пусека по сухому руслу количество наносов в ее головной части значительно больше, чем на хвосте. Основная часть песка содержится вблизи фронта приближающейся к берегу вол-

ны. Указанные явления согласно уравнению (11) объясняются большим градиентом полной энергии вблизи фронта волны.

3. Транспортирующая способность потока зависит от гидравлических сопротивлений. Из уравнения (14) следует, что при одной и той же скорости шероховатость русла и транспортирующая способность потока прямо пропорциональны.

Это относится также к местным сопротивлениям. Опытами доказано, что встречая гидравлический прыжок, в его пределах наносы свободно перемещаются, несмотря на резкое уменьшение скоростей в этом участке. Это явление повторяется, когда взамен гидравлического прыжка в качестве местного сопротивления и поток встает перед скальной конструкцией большой сопротивляемости (при условии, чтобы скорость конструкции была больше максимального диаметра частиц).

4. Транспортирующая способность потока при прочих равных условиях больше при подъеме гидрографа и меньше при его спаде. Это объясняется тем, что в уравнениях (15) или (16) при подъеме (гидрографа $\frac{\partial v}{\partial t} > 0$, а при спаде — $\frac{\partial v}{\partial t} < 0$. Следовательно, интенсивность

затления водохранилища в период подъема гидрографа меньше, чем при спаде.

Селепроводящие сооружения под Каракумским каналом, как правило, закрываются и выходят из строя при спаде гидрографа, в то время, как при подъеме гидрографа они работают нормально. Кроме того, вносонетущие реки, например, Аму-Дарья, склонные к изменению своего русла (явление дефлыва), это совершают во время спада гидрографа [7].

5. Полученными зависимостями можно объяснить явление дельты образования при приближении рек к морям или водохранилищам. Продоольный уклон рек в соответствии с естественными условиями уменьшается по течению (вблизи моря), на этих участках река не может транспортировать то количество наносов, которое поступает из верхних участков с большим уклоном без изменения своих поперечных размеров. Поэтому для сохранения транспортирующей способности в местах малых уклонов она должна расширяться. Это расширение происходит до такого расстояния, где угол расширения не станет больше допустимого с точки зрения отрыва от берега, а так как дальнейшее расширение невозможно, в этом створе основной поток распадается на два самостоятельных потока. Далее описанное явление повторяется для каждого из этих потоков и в совокупности получается дельтообразование.

6. Приведенные заключения полезны также с гидрометрической точки зрения; при измерениях наносного режима водохранилищ и рек следует обратить особое внимание на характер потока вышеизмеряемого створа, поскольку одной и той же скорости могут соответствовать разные мутности и зависимости как от локального, так и конвективного изменения скорости потока в данном створе.

Полученные результаты позволяют решать обратную задачу — подобрать боковые конфигурации и форму дна различных сооружений, связанных с движением наносов, таким образом, чтобы в них либо вообще не происходило интенсивнее (наносоудерживающие, наносорегулирующие, отстойные сооружения), либо не происходило (наносоудаляющие, наносотранспортирующие сооружения, мостовые переходы и др.).

ИНВИСТ

Поступило 11.XII.1979

Վ. Գ. ՍԱՆՅԱՆ

ՋՐԱՄԵՐԱՆԵՐԻ ՏՂՈՒԿԱԿԱՐԿԱՆ ԳՐՈՑԽՈՂ ԿՈՆՍՏՐՈՒՇԱԿՆԵՐԻ ՀԱՐՑԻ ԻՐԱՌԿ

Ա մ փ ո փ ո ս մ

Ջրամբարների տղմակայման պրոցեսը մաթեմատիկորեն նկարագրվում է մի քանի հավասարումներով, որոնցից կարևորագույն նշանակություն ունի հոսանքի տարողականության բանաձևեր: Սակայն վերջինիս համար գոյություն ունեցող բանաձևերը վերաբերվում են միայն հավասարաչափ շարժմանը: Որք շարժումն անհավասարաչափ է և շխտունացված, հոսանքի տարողականության հաշվարկման համար ներկայումս պոյություն չունի դիտակառուցիկ հիմնավորված որևէ մի արտահայտություն, իսկ տղմակայման պրոցեսը կատարվում է լինց աչդպիսի շարժման ժամանակ:

Հիմնվելով տեսական ու փորձնական նյութերի վրա, հոգվածում արվում են բանաձևեր, որոնցով կարելի է հաշվել հոսանքի տարողականությունը շարժման ընդհանուր դեպքում: Այդ բանաձևերի օգնությամբ կարելի է որոշել հեղուկի տարողականությունը անել ջրամբարների տղմակայման պրոցեսի վերաբերյալ, երբ հայտնի են ջրամբարի հունի երկրաչափական բնութագրերը:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Sanjayan V. G. Calculation of process of sedimentation and hydraulic washout of river reservoir. 14-th J.A.H.R., v. 5, Paris, 1971.
2. Величкин М. А. Динамика русловых потоков Т II, М. ГИИТЛ, 1955.
3. Санжян В. Г. Определение транспортирующей способности потока, «Тр. хопрд. веш. по гидротех.», вып. 57, Л., «Энергия», 1971.
4. Ландс Н. О Турбулентность. М. ГИФМЛ, 1963.
5. Санжян В. Г. Новая конструкция селетранспортирующего сооружения. Сб. «Экологические и селевые процессы», вып. 6, изд. ГрузИИТТМ, Тбилиси.
6. Санжян В. Г., Балджян П. О. Селетранспортирующее сооружение. Анг. спид. № 604897, 1978.
7. Миллисеов А. М. Основные направления исследований по русловым процессам в Аму-Дарья, Сб. докладов Всесоюзного совещания по водозаборным сооружениям и русловым процессам, изд. САНИРИ, Ташкент, 1971.