

## ГИДРОЛОГИЯ

*Н.Б. Барышников, А.О. Пагин, Т.С. Селина, А.В. Твердохлебов*

### ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ ПОЙМЕННЫХ РУСЕЛ

*N.B. Baryshnikov, A.O. Pugin, T.S. Selina, A.V. Tverdokhlebov*

### CAPACITY OF FLOODPLAIN RIVERBEDS

*Анализом методов расчёта пропускной способности пойменных русел установлено, что наиболее перспективной, хотя и недостаточно разработанной, является методика, основанная на системе уравнений движения потока с переменной по длине массой. На основе экспериментальных данных установлена зависимость инерционных членов этого уравнения от глубины потока и угла между динамическими расходящимися осями взаимодействующих потоков. Их наибольшие значения составляют соответственно 80,1 и 24,2 %, т.е. являются вполне значимыми.*

*Ключевые слова: пойма, русло, эксперименты, глубина, угол, динамические и геометрические оси, объём.*

*By the analysis of the methods of calculation of capacity of floodplain riverbeds it was established that the most promising, but not developed enough, methods are those that are based on the system of equations of motion of stream with the mass varying with the length. On the basis of the experimental data the dependence of the terms of this system of equation was determined to depend on the depth of the stream and the angle between the dynamical and moving apart axes of the interacting streams. Their maximal values are 80.1 and 24.2 % respectively, i.e. they are meaningful enough.*

*Key words: floodplain, riverbeds, experimental data, depth, angle, the dynamical and moving apart axes, capacity.*

Значительное снижение качества натурной информации в период перестройки, обусловленное как объективными, так и субъективными причинами, сопровождаемое увеличением числа, а главное, мощности катастрофических паводков, приводят к необходимости совершенствования методов расчёта пропускной способности пойменных русел. Это в первую очередь обусловлено важностью данной информации для гидротехнического строительства и водохозяйственных мероприятий. Действительно, если на больших реках имеются данные стационарных наблюдений за длительный период времени, что позволяет с достаточной для практики точностью оценить максимальные расходы воды, то на большинстве средних и особенно малых рек такая информация, как правило, отсутствует. К тому же наметившееся потепление климата приводит к усилению мощности катастрофических паводков в ряде регионов юга и востока России.

Особенно остро стоит вопрос расчёта пропускной способности пойменных русел на равнинных реках, которых в России большинство. Известно [Барышников, 1984], что практически все равнинные реки – пойменные. Измерения же на них затруднены из-за большой ширины разлива и скоротечности паводков и половодий. Действительно, на пойменных створах, как правило, в русловой части шириной 50–70 м, имеется 5–7 скоростных вертикалей, а на пойме шириной 700–10 м ограничиваются одной-тремя вертикалями. И это несмотря на то что рельеф поймы значительно сложнее рельефа русла.

Наставление по изысканию и проектированию железнодорожных и автодорожных мостовых переходов через водотоки (НИМП-72) [Наставление..., 1972] рекомендует расчёт пропускной способности пойменных русел осуществлять на основе формулы Шези посредством деления сечения на русловую и пойменную составляющие, т.е.:

$$Q = Q_p + Q_n = F_p v_p + F_n v_n = F_p C_p \sqrt{h_p I_p} + F_n C_n \sqrt{h_n I_n} . \quad (1)$$

Анализ этой формулы и контрольные расчёты по ней на основе формул Павловского и Маннинга показали, что средние погрешности расчётов составляют 30–36 % (в зависимости от используемой таблицы для определения коэффициента шероховатости  $n$ ) при максимальных погрешностях, превышающих 300 %. Помимо этого следует учитывать, что уклон водной поверхности пойменного потока  $I_n$  не измеряется. Более того, даже методика его измерения не разработана. Определённые трудности из-за сложного рельефа и различия шероховатости по ширине поймы возникают и при расчётах средних глубин, что часто приводит к необходимости деления поймы на отдельные отсеки.

В конце сороковых – начале пятидесятих годов прошлого столетия трудами в основном отечественных исследователей [Гончаров, 1962; Железняков, 1981] был вскрыт эффект взаимодействия руслового и пойменного потоков. Суть этого эффекта заключается в значительной трансформации скоростного поля руслового потока под воздействием пойменного и пойменного потока под воздействием руслового. Теоретическое обоснование этого эффекта при параллельных динамических осях взаимодействующих потоков сделано В.Н. Гончаровым, а при непараллельных осях – Н.Б. Барышниковым и др. Влияние этого эффекта особенно велико при непараллельных динамических осях потоков и может привести как к значительному увеличению пропускной способности русла (при расходящихся динамических осях потоков), так и к её уменьшению (при сходящихся осях) [Барышников, 2007]. К сожалению, этот эффект в методике, основанной на формуле Шези (1), никак не учитывается. Поэтому в конце пятидесятих–шестидесятих годов прошлого столетия широкое распространение получило введение корректирующих коэффициентов  $k$  русловой  $k_p$  и пойменной  $k_n$  составляющих потоков для условий параллельности их осей в виде:

$$Q = k_p Q_p + k_n Q_n = k_p F_p C_p \sqrt{h_p I_p} + k_n F_n C_n \sqrt{h_n I_n} \quad (2)$$

или

$$Q = k(Q_p + Q_n). \quad (3)$$

При этом было рекомендовано принимать значения поправочных коэффициентов в виде:  $k_p < 1$ ;  $k_n > 1$  и  $k < 1$ .

Многочисленные формулы для расчёта этих коэффициентов [Барышников 2007; Карасёв, 1980], как правило, были основаны на данных лабораторных измерений и практической ценности не имели. Тем более что изменение пропускной способности русла с поймой в этом случае не превышало 10–15 %, т.е. находилось в пределах точности измерений.

Более важными, имеющими большое практическое значение, были натурные исследования ГГИ на реках Луге у пос. Толмачёво и Пьяне у деревни Камкино и частично на р. Хопёр у хутора Беспимяновский, выполненные под руководством Д.Е. Скородумова [Скородумов, 1965], а также исследования Н.Б. Барышникова по данным наблюдений более чем на 50 станциях на сети Росгидромета [Барышников, 1958; 2007].

Анализ данных этих измерений позволил Д.Е. Скородумову установить, что движение воды в руслах с поймами является неравномерным, неустановившимся и, более того, с переменным по длине расходом воды. Поэтому для расчётов им вместо уравнения (1) было рекомендовано использовать уравнение движения потока с переменным по длине расходом воды в виде:

$$I = \frac{vV^2}{C^2h} + \frac{\alpha_{Кн} V_n^2 - \alpha_{Кв} V_b^2}{2gL} + \frac{V - V_g}{gF} \frac{Q_n - Q_b}{L} + \frac{\alpha_B}{g} \frac{\Delta V}{\Delta t}, \quad (4)$$

где  $\alpha_K$  и  $\alpha_B$  – соответственно коэффициенты Кориолиса и Буссинеска;  $v_g$  – проекция скоростей притекающих или оттекающих вод на направление движения руслового потока; индексы «н» и «в» обозначают, что параметры соответственно относятся к нижнему или верхнему створам;  $L$  – расстояние между этими створами.

Д.Е. Скородумовым [Скородумов, 1965] и Н.Б. Барышниковым [Барышников, 1984; 2007] выполнена оценка членов уравнения (4). С этой целью обозначим члены его правой части через

$$\varepsilon_1 = \frac{\alpha_{Кн} V_n^2 - \alpha_{Кв} V_b^2}{2gL}; \quad \varepsilon_2 = \frac{V - V_g}{gF} \frac{Q_n - Q_b}{L} \quad \text{и} \quad \varepsilon_3 = \frac{\alpha_B}{g} \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

( $\varepsilon_1$  характеризует затраты энергии потока за счет неравномерности режима его движения). Введя допущения о постоянстве расхода и равенстве коэффициента Кориолиса на верхнем и нижнем створах, получим приближенное выражение

для расчета  $\varepsilon_1 \approx \frac{\alpha_K Q}{2gL} \left( \frac{1}{F_\varphi^2} - \frac{1}{F_\square^2} \right)$ . Практически величина этого члена уравнения

определяется характером изменения площадей сечения по длине реки. По данным расчетов на примере рек Луги и Пьяны значения  $\varepsilon_1/I$  могут достигать 55 %. Величина  $\varepsilon_2/I$ , характеризующая затраты энергии на массообмен между русловыми и пойменными потоками, на этих же реках достигает 20 %. Однако анализ данных специальных исследований показывает, что при больших углах пересечения динамических осей потоков в русле возникает водоворотная область, размеры которой определяются мощностью пересекающихся потоков. Она может занимать все русло, и течение в нем останавливается или даже изменяется на обратное. Следовательно, значение  $\varepsilon_2/I$  может достигать 100 %.

Несколько сложнее оценка значения  $\varepsilon_3/I$ , характеризующего нестационарность режима. По данным Н.Б. Барышникова [Барышников, 1958], его величина мала и на равнинных реках не превышает 5 %. Однако, как показывают исследования последних лет, влияние нестационарности процесса значительно больше. Действительно, при затоплении поймы свободного меандрирования наблюдается неоднократная смена направлений течений на ней. Таким образом, нестационарность процесса косвенно учитывается и другими членами уравнения. Решив уравнение (4) относительно  $v$ , получим:

$$V = C \sqrt{hI \left( 1 - \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3}{I} \right)}. \quad (5)$$

Эту формулу можно применять для расчетов скоростей течения руслового или пойменного потоков при их взаимодействии.

Данная методика является перспективной, но в ней имеются существенные недостатки. Основным из них является замена сложного пространственного потока одномерным с целью применения уравнения одномерной идеализации к решению поставленной задачи.

Рассмотрим возможные пути решения проблемы расчета пропускной способности русел с поймами с учетом эффекта взаимодействия потоков в них. Учитывая, что уравнения (4) и (5) применялись для расчетов только русловой части потока, а уравнение неразрывности не использовалось, целесообразно разработать аналогичные (4) уравнения для пойменных составляющих потока. Такая система уравнений для потоков в руслах с двусторонними поймами имеет вид:

$$I_p = \left( \frac{V^2}{C^2 h} \right)_p + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\alpha_q V^2}{2g} \right)_p + \left( \frac{q_* V'}{g F'} \right)_p + \left( \frac{\alpha_p \partial V}{g \partial t} \right)_p; \quad (6)$$

$$I_{пл} = \left( \frac{V^2}{C^2 h} \right)_{\text{пл}} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\alpha_q V^2}{2g} \right)_{\text{пл}} + \left( \frac{(q + q_1) V'}{g F'} \right)_{\text{пл}} + \left( \frac{\alpha_p \partial V}{g \partial t} \right)_{\text{пл}}; \quad (7)$$

$$I_{\text{пн}} = \left( \frac{V^2}{C^2 h} \right)_{\text{с.с.}} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\alpha_q V^2}{2g} \right)_{\text{с.с.}} + \left( \frac{(q + q_2)V'}{gF'} \right)_{\text{с.с.}} + \left( \frac{\alpha_0 \partial V}{g \partial t} \right)_{\text{с.с.}} ; \quad (8)$$

$$\frac{\partial(Q_p + Q_{\text{пл}} + Q_{\text{пн}})}{\partial x} + \frac{\partial(F_p + F_{\text{пл}} + F_{\text{пн}})}{\partial t} = q_1 + q_2, \quad (9)$$

где  $q_* = q_{\text{пл}} + q_{\text{пн}}$  – расход воды на единицу длины потока за счет массообмена между русловой левой (пл) и правой (пп) пойменными составляющими потока;  $q_1$  и  $q_2$  – соответственно расходы воды на единицу длины потока, учитывающие приток воды со склонов на левую и правую поймы, а также потери на испарение и фильтрацию;  $V'$  и  $F'$  – соответственно средняя скорость массообмена между русловым и пойменными потоками  $V'$  и площадь продольного сечения, на которой происходит этот массообмен  $F'$ .

Данное направление является перспективным, но для его реализации необходимо выполнить большие по объёму натурные и лабораторные исследования с целью получения зависимостей инерционных членов уравнений (4) или (6)–(8) от определяющих морфометрических характеристик расчётного участка.

Н.Б. Барышниковым на основе анализа натурной информации, полученной на сети Росгидромета [Барышников, 1984; 2007], была разработана эмпирическая методика расчёта средних скоростей руслового потока, основанная на графической зависимости:

$$V_p / V_{p,б} = f(h_p / h_{p,б}, \alpha), \quad (10),$$

приведённой на рис. 1:

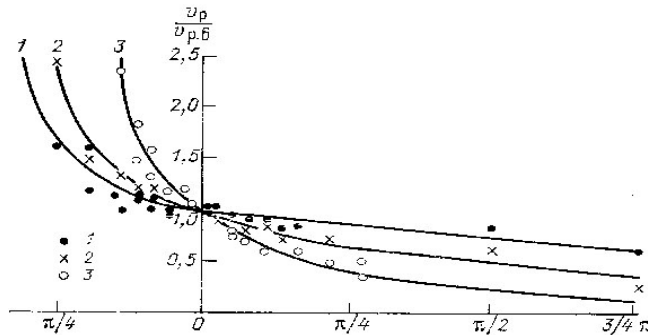


Рис. 1. Кривые  $V_p / V_{p,б} = f(h_p / h_{p,б}, \alpha)$ : 1 –  $h_p / h_{p,б} = 1,10$ ; 2 –  $h_p / h_{p,б} = 1,25$ ; 3 –  $h_p / h_{p,б} = 1,50$

Здесь  $V_{p,б}$  – средняя скорость руслового потока при уровнях, предшествующих уровням затопления бровок прирусловых валов. Её рекомендуется определять по формуле Шези;  $V_p$  – средняя скорость руслового потока при его взаимодействии с пойменным потоком.

Контрольные расчёты, выполненные на основе независимой информации, показали высокую эффективность методики. Погрешности расчётов были примерно в два раза меньше, чем по методике, основанной на формуле Шези (2). Однако дальнейший анализ и расчёты на основе дополнительной информации, в частности, выполненные Е.В. Польциной, показал, что зависимость (10) необходимо уточнить, особенно при углах  $\alpha$ , близких к  $0^0$ . Действительно, как вытекает из анализа формулы Шези с учётом формулы Маннинга

$$V \approx \alpha h^{2/3},$$

т.е. с увеличением глубин скорости руслового потока должны возрастать. В то же время из-за уменьшения градиента скоростей между русловым и пойменным потоками при увеличении глубин сопротивление движению потока уменьшается, а это, в свою очередь, должно привести к ослаблению воздействия эффекта взаимодействия потоков. Всё это привело к необходимости корректировки расчётных зависимостей (рис. 1).

Более сложной является проблема разработки методики расчётов пропускной способности пойм. Это обусловлено как сложным их рельефом и низкой точностью исходной информации о пойменных потоках, так и отсутствием сведений об уклонах их водной поверхности. Другим осложняющим фактором является отсутствие методики расчётов ширины части поймы, на которой наблюдается ускоряющее воздействие руслового потока на пойменный. По данным Г.В. Железнякова [Железняков, 1981], полученным в результате лабораторных экспериментов на установке с гладкой поймой, эта величина равна пяти-шести ширинам руслового потока. По нашим данным, основанным на результатах натуральных измерений, ширина этого участка поймы значительно меньше и зависит от шероховатости последней. Установлено [Барышников, 1958; 2007], что в натуральных условиях она может изменяться от 1,5 до 4 ширины русла, находясь в обратной зависимости от шероховатости поймы.

Учитывая эти соображения, на кафедре гидрометрии была разработана эмпирическая методика расчётов пропускной способности пойм (рис. 2), основанная на графических зависимостях вида:

$$\frac{Q_n}{Q_n + Q_p} = f\left(\frac{F_n}{F_n + F_p}, \frac{n_n}{n_p}\right). \quad (11)$$

При таком положении с методикой расчётов пропускной способности русел с поймами на кафедре гидрометрии в течение 2006–2008 гг. был выполнен цикл экспериментальных исследований, основной задачей которых являлась оценка веса инерционных членов уравнений (4) или (6) и выявление их зависимости от морфометрических характеристик расчётного участка.

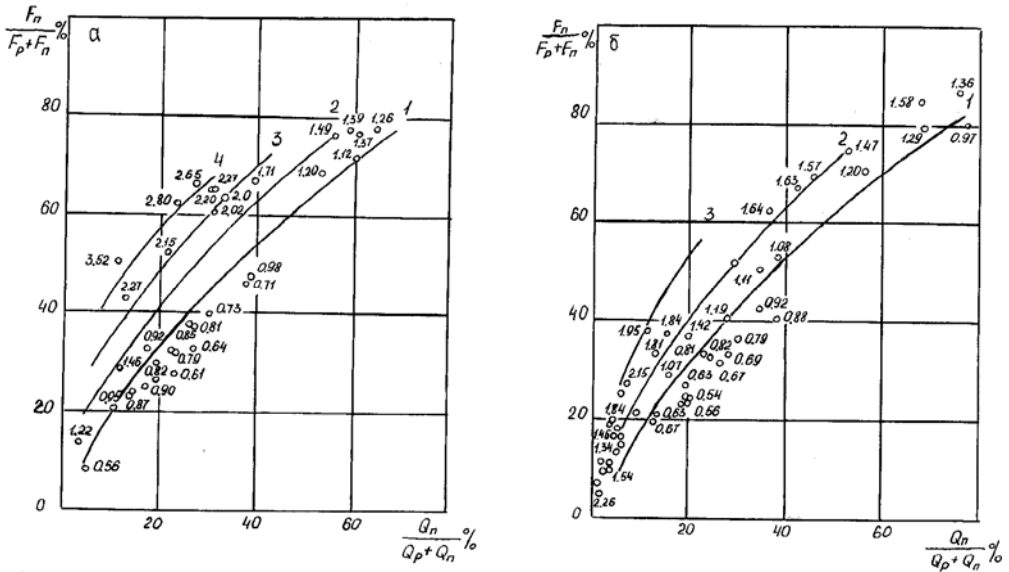


Рис. 2. Кривые  $Q_n / (Q_p + Q_n) = f(F_n / (F_p + F_n), n_n / n_p)$

1-4 значения  $\frac{np}{pr}$  : 1-  $\frac{np}{pr} = 1$ ; 2-  $\frac{np}{pr} = 2$ ; 3-  $\frac{np}{pr} = 3$ ; 4-  $\frac{np}{pr} = 4$

Как вытекает из анализа данных, приведённых в таблице, при расходящихся осях взаимодействующих русловых и пойменных потоков значения первого инерционного члена уже при  $\alpha = 20^0$  достигает  $-56,6\%$ , а второго  $-16,8\%$ . Более того, наблюдается довольно чёткая зависимость вида  $\varepsilon_1 / I = f(\alpha, h)$  и  $\varepsilon_2 / I = f(\alpha, h)$ , приведённая на рис. 3 и 4 (при постоянных значениях глубин руслового потока).

Результаты расчётов инерционных членов  $\varepsilon_1 / I$  и  $\varepsilon_2 / I$

h, см	$\frac{h}{h_{p,б}}$	$\varepsilon_1 / I$			$\varepsilon_2 / I$		
		Угол расхождения, $\alpha^0$					
		5	10	20	5	10	20
5,1	1,02	-1,02	-1,36	-1,37	-0,000245	-1,2	-1,3
6,0	1,2	-5,21	-8,54	-1,68	-0,1	-2,1	-2,79
7,0	1,4	-9,84	-16,4	-1,80	-0,3	-2,9	-4,82
8,0	1,6	-16,8	-22,0	-25,8	-2,4	-5	-8,7
9,0	1,8	-21,4	-30,3	-34,4	-4,9	-7,4	-12,01
10,0	2,0	-30,1	-41,2	-56,6	-7,4	-10,2	-16,8

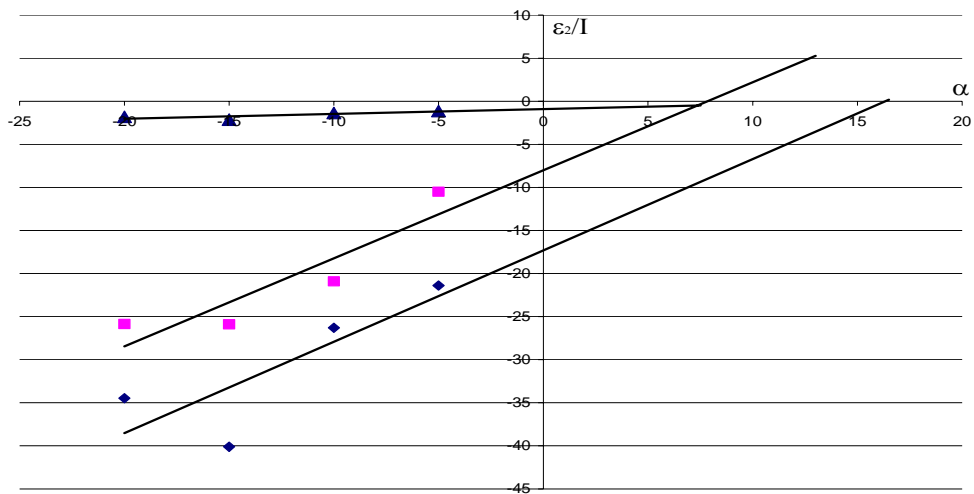


Рис. 3. Зависимость  $\epsilon_1/I = f(\alpha, h)$

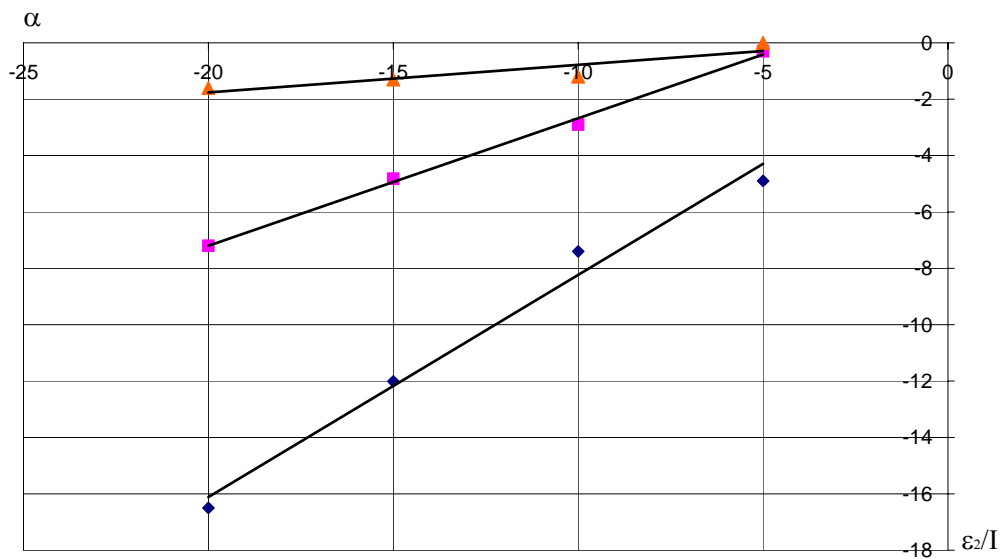


Рис. 4. Зависимость  $\epsilon_1/I = f(\alpha, h)$



**Заключение**

Проведённый анализ и расчёты позволяют сделать следующие выводы:

- наилучшие результаты контрольных расчётов получаются по методике, основанной на графических зависимостях (10) и (11), приведённых на рис. 1 и 2;
- наиболее перспективным, но требующим глубоких проработок, сопровождаемых детальными полевыми и лабораторными исследованиями, является направление, основанное на использовании системы уравнений движения потока с переменным по длине расходом воды;
- при использовании для расчётов методики, рекомендуемой Наставлением по изысканию и проектированию железнодорожных и автодорожных мостовых переходов через водотоки [НИМП-1972], погрешности расчётов могут значительно превышать допустимые пределы.

**Литература**

1. Барышников Н.Б. Речные поймы. – Л.: Гидрометеиздат, 1958. – 152 с.
2. Барышников Н.Б. Морфология, гидрология и гидравлика пойм. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 280 с.
3. Барышников Н.Б. Динамика русловых потоков. – СПб.: изд. РГГМУ, 2007. – 345 с.
4. Гончаров В.Н. Динамика русловых потоков. – Л.: Гидрометеиздат, 1962. – 374 с.
5. Железняков Г.В. Пропускная способность русел каналов и рек. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 311 с.
6. Карасёв И.Ф. Речная гидрометрия и учёт водных ресурсов. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 310 с.
7. Наставление по изысканию и проектированию железнодорожных и автодорожных мостовых переходов через водотоки [НИМП-72]. – М.: Транспорт, 1972. – 280 с.
8. Скородумов Д.Е. Вопросы гидравлики пойменных русел в связи с задачами построения и эксплуатации кривых расходов воды // Труды ГГИ, 1965, вып. 128, с. 3–96.