

T.V. Vekshina

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ РУСЕЛ РЕК, ЗАРАСТАЮЩИХ РАСТИТЕЛЬНОСТЬЮ

T.V. Vekshina

HYDRAULIC RESISTANCE OF RIVER CHANNELS GROWING OVER WITH VEGETATION

Выявлены критериальные комплексы, необходимые для обобщенной количественной характеристики гидравлических сопротивлений зарастающих речных русел. На их основе рассчитана шкала характерных значений коэффициента шероховатости для русел рек ЕТР, зарастающих водной растительностью.

Ключевые слова: гидравлические сопротивления, зарастание русла, коэффициент шероховатости.

The criteria complexes necessary for a generalized quantity indicator of hydraulic resistance of river channels growing over with vegetation are revealed. Based on them, a scale of the reference values of the roughness coefficient is calculated for river channels in the European part of Russia growing over with vegetation.

Keywords: hydraulic resistance, overgrowth of a channel, roughness coefficient.

Ощутимому влиянию зарастания на движение потока подвержены малые и средние реки, которые составляют важнейшие элементы природных ландшафтов. Зарастание относится к процессам, протекающим в ландшафтной сфере, а они, как известно, развиваются под влиянием комплекса климатических, геоморфологических, гидрологических и гидродинамических факторов. Развитие водных растений играет вполне определенную роль в состоянии и эволюции речных экосистем [Баркович..., 2001]. Ни теория, ни лабораторные эксперименты пока не могут решить возникающий при этом комплекс задач: необходимы детальные гидравлические, русловые и гидрботанические полевые исследования.

Зарастание как фактор гидравлических сопротивлений (n_3), в отличие от шероховатости русла, отличает изменчивость во времени и зависимость от ландшафтно-климатических условий.

Величина n_3 зависит от фазы развития водных растений. С одной стороны, n_3 увеличивается по мере увеличения массы растений, а с другой – уменьшается из-за их старения, полегания и срыва. Эти процессы происходят хронологически закономерно, так что изменение n_3 может быть представлено в виде некоторой функции времени. Такая функция имеет однотипную аналитическую структуру в разные годы и для различных рек, если время от начала вегетации T выражено в долях от общей продолжительности зарастания русла T_3 : $\tau = T/T_3$.

Учитывая, что вид этой функции устанавливается так, что $n_3 = n_0$ при $\tau = 0$ и отличается от n_0 на величину второго порядка малости при $\tau = 1$, можно предварительно записать:

$$n_3 = n_0 / (1 - \kappa_1 \tau + \kappa_2 \tau^2), \quad (1)$$

где κ_1 и κ_2 – коэффициенты пропорциональности.

В этом случае для расхода воды формула Шези–Маннинга будет иметь вид:

$$Q = \frac{\omega^{5/3} \sqrt{I}}{B^{2/3} n_0} (1 - \kappa_1 \tau + \kappa_2 \tau^{4/3}). \quad (2)$$

На постах гидрологической сети измеряются уровни, расходы и температура воды, но, как правило, не выполняются измерения уклонов и тем более не оцениваются коэффициенты шероховатости. Что касается зарастания русла, то в изданиях водного кадастра (гидрологических ежегодниках) указывается только наличие растительности непосредственно в русле, без каких-либо сведений о степени её развития и распространения в поперечном сечении потока. В связи с этим в дальнейшем для характеристики гидрологических сопротивлений целесообразно рассматривать параметр Великанова $m = \sqrt{I/n}$ [Карасев..., 2001; Карасев, 1975]. Его особая ценность состоит в том, что он может быть определен по гидрометрическим данным, даже при отсутствии измерений уклона свободной поверхности. Так, из уравнения (2) с учетом (1) для зарастающего русла будем иметь:

$$m_3 = \frac{QB^{2/3}}{\omega^{5/3}} = \frac{\sqrt{I}}{n_0} (1 - \kappa_1 \tau + \kappa_2 \tau^{4/3}). \quad (3)$$

Для определения m_3 по гидрометрическим данным как функции времени формуле (3) поставим в соответствие уравнение множественной линейной регрессии:

$$m_3 = a_0 - a_1 \tau + a_2 \tau^{4/3}, \quad (4)$$

в котором $m_3 = \frac{QB^{2/3}}{\omega^{5/3}}$; $x_1 = \tau$; $x_2 = \tau^{4/3}$.

Параметры уравнения (4) устанавливаются по совокупности измерений расходов воды и их элементов за время зарастания русла методом наименьших квадратов. Соответствующие расчеты выполнены нами для более чем 50 гидрометрических створов малых и средних рек, расположенных в северной, центральной и южной зонах Европейской территории России, выделенных Е.А. Леоновым [Леонов И.А., 1960; Голосов В.Н., 2001].

Некоторые результаты расчетов m_3 приведены в табл. 1, а на рис. 1 представлена часть хронологических графиков изменения m_3 .

Достаточно высокие значения сводных коэффициентов корреляции свидетельствуют об адекватности выбора принятой аналитической структуры (4).

В результате анализа полученных данных установлено, что в естественных условиях зарастание русла, как правило, вызывает существенное увеличение гидравлических сопротивлений. В то же время наблюдается и незначительное изменение (менее 10 %), в этом случае зарастание можно считать гидравлически не значимым. Прослеживается зависимость экстремумов m_3 от средней за вегетационный период температуры воды: чем она выше, тем меньше m_3 .

Таблица 1

Результаты расчетов параметра m_3 для характерных рек Европейской территории России

Река-Пост	Зона	Год	$A, \text{км}^2$	a_0	a_1	a_2	m_3	R	$\delta, \%$
Вьюн Запорожское	1	1958	54	0,44	-1,98	1,66	0,07	0,99	7,70
Вага Глуборецкая		1971	1410	0,69	-4,68	4,57	0,18	0,95	16,5
Сясь Яхново		1959	6230	0,23	-0,19	0,39	0,20	0,97	6,10
Вента Абава		1959	11 000	0,65	-0,77	0,70	0,43	0,56	9,48
Вятка Красноглине	2	1974	1212	0,54	-3,22	2,93	0,09	0,98	13,7
Барда Сенюшата		1974	1910	0,30	-0,68	0,51	0,12	0,82	18,4
Утроя Бол.Губа		1958	2900	0,28	-1,24	1,24	0,13	0,91	10,9
Сороть Осинкино		1958	3170	0,30	-1,76	2,00	0,14	0,91	19,0
Угра Мокрое		1971	10 800	0,31	-0,73	0,66	0,19	0,77	15,0
Луга Кингисепп		1958	12 500	0,46	-1,42	1,33	0,28	0,83	10,5
Елань Колено	3	1961	3230	0,47	-1,94	1,88	0,23	0,95	7,81
Иловля Александров		1960	6520	0,51	-2,58	2,67	0,20	0,88	14,5
Хопер Балашов		1960	14 300	0,25	-0,22	0,25	0,23	0,64	10,6

Таким образом, для отдельно взятого гидрологического поста приведенная методика интерпретации гидрометрических данных позволяет получить характеристики режима и количественные оценки гидравлических сопротивлений зарастающих русел. При этом объективно устанавливается сложность и неоднозначность проявлений зарастания.

Большое научно-практическое значение имеет обобщение полученных результатов и обоснование допустимости их распространения на неизученные объекты. Такую возможность открывает использование закономерностей изме-

нения гидроморфологических характеристик речных систем. В их структуре каждая отдельно взятая река рассматривается как звено – поток фиксированного порядка N . Оказалось целесообразным принять систему этих порядков, предложенную Н.А. Ржаницыным [Ржаницын, 1960], так как она разработана, главным образом, применительно к гидрографической сети Европейской территории России, являющейся объектом наших исследований.

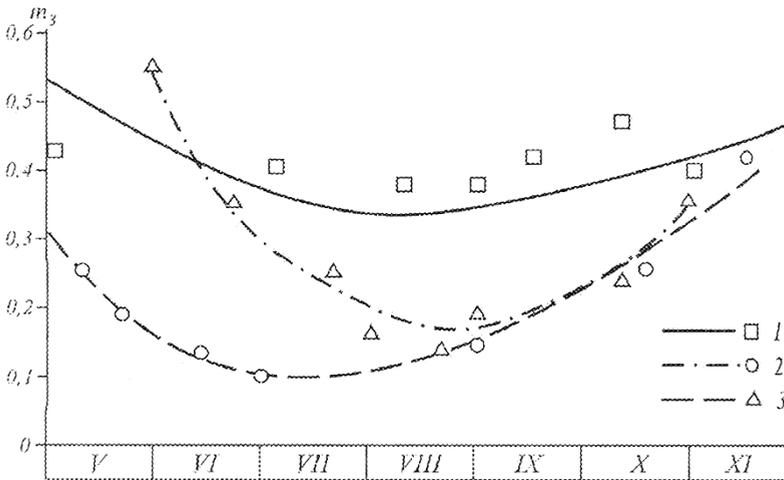


Рис. 1. Хронологический график изменения m_3 : 1 – р. Воронеж г. Воронеж, 1960 г., 2 – р. Ловать-д. Сельцо, 1958 г., 3 – р. Вятка-с. Красноглинье, 1971 г.

В структуре речных систем устанавливается зависимость морфометрических характеристик от порядков потока N с нарастанием их от истоков к устью, а сами порядки определяются водностью реки. Если сток не изучен, эти характеристики, в конечном счете, могут быть поставлены в соответствие площади водосбора A (км²).

Следует подчеркнуть особую роль уклона свободной поверхности, он равен осредненному уклону дна, если рассматривается равномерное движение на достаточно протяженном участке. В системном аспекте этот уклон не только служит мерой потерь энергии на движение потока, но также отражает геоморфологические условия речного бассейна, характер грунтов, из которых сложено русло, а следовательно, и его шероховатость. Более того, этот элемент теснейшим образом связан с порядком потоков и, в конечном счете, с гидрологическими и гидрографическими характеристиками речных систем.

Анализ результатов расчета параметров уравнения (3), приведенных в табл. 1, а также опубликованные данные других исследователей, приводит к следующим выводам:

В качестве определяющего фактора зарастания следует рассматривать площадь водосбора реки [Чалов, 1992; Кондратьев, 1982] как звена речной системы. Как установлено, на сравнительно больших реках с площадью водосборов

более $A_0 = 25\ 000\ \text{км}^2$ зарастание русла не происходит, а прибрежная растительность не влияет на его пропускную способность. Чем меньше площадь водосбора, тем значительно увеличивается гидравлических сопротивлений в зарастающих руслах. Оно особенно велико на малых реках ($A < 2000\ \text{км}^2$). Пороговое значение A_0 согласуется с зависимостью, установленной В.Н. Голосовым [Глосов, 2001] для коэффициентов доставки наносов с поверхности водосбора: их основная масса осаждается выше створа, замыкающего площадь $A_0 \approx 25\ 000\ \text{км}^2$. Но именно мелкофракционные илосодержащие отложения создают питательную базу для водных растений.

Повышение температуры воды сверх её порогового значения ($8\ ^\circ\text{C}$) является условием начала зарастания. Видовой состав водных растений мало изменяется по географической широте. И в северных, и в южных зонах ЕТР встречаются практически одни и те же растительные сообщества, отличаясь лишь интенсивностью своего развития в руслах [Антроповский, 1999; Барышников, 1990].

Таким образом, при обобщенной количественной оценке гидравлических сопротивлений зарастающих речных русел необходимо учитывать, по крайней мере, два критериальных комплекса:

– гидролого-гидрографический, который оказалось целесообразным представить как разность относительных значений линейных эквивалентов площадей водосборов:

$$P_1 = 1 - (A/25\ 000)^{0.5}; \quad (5)$$

– зонально-климатический, представлен в виде относительной разности средней за вегетационный период температуры воды и её порогового значения $8\ ^\circ\text{C}$:

$$P_2 = (t_B/8) - 1. \quad (6)$$

Оценке подлежат экстремальные значения относительных коэффициентов шероховатости

$$S_{\max} = \frac{(n_3)_{\max}}{n_0} = \frac{m_0}{(m_3)_{\min}}, \quad (7)$$

где m_0 и m_3 – параметры Великанова соответственно для свободного и заросшего русла. В качестве адекватной аппроксимации функции $S(P_1, P_2)$ принимается экспонента:

$$S_{\max} = \exp(a_1 P_1 - a_2 P_1^2) P_2, \quad (8)$$

которая удовлетворяет естественным физическим условиям: $S_{\max} = 1$ при $P_1 = 0$ и $P_2 = 0$. Для определения параметров a_1 и a_2 представим (8) в логарифмическом виде:

$$y = \frac{\ln S_{\max}}{P_2} = a_1 P_1 - a_2 P_1^2. \quad (9)$$

Поле точек, рассчитанных по уравнению (9), представлено на рис. 2. По совокупности гидрометрических данных более чем для 30 створов на реках Европейской территории России методом наименьших квадратов получены следующие значения параметров уравнения (9): $a_1 = 3,61$; $a_2 = 2,40$.

Функция (9) образует максимум $y = 1,36$, он соответствует максимуму-максимуму при $P_1 = 0,75$, чему соответствует площадь водосбора $A = 1560 \text{ км}^2$.

При дальнейшем уменьшении A , хотя и наблюдается снижение S_{max} , но оно остается несущественным, что объясняется значительным увеличением коэффициента шероховатости самого русла n_0 , снижающим эффект относительного влияния зарастания на результирующее значение S_{max} .

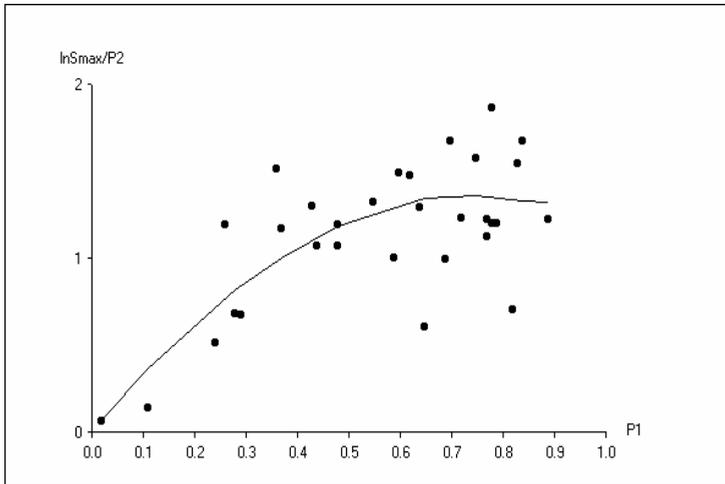


Рис. 2. Системно-зональная зависимость относительных коэффициентов шероховатости от гидролого-гидрографических и климатических факторов

После выполнения вычислительных операций и преобразований получаем следующую зависимость, позволяющую рассчитать параметр Великанова для неизученной реки с площадью водосбора A в любой момент относительного времени τ от начала вегетации водных растений:

$$m_3 = 2,16 \left[1 - 9,2(\tau - 0,99\tau^{4/3}) \left(1 - \frac{1,04}{S_{\text{max}}} \right) \right] / A^{0,15}. \quad (10)$$

S_{max} определяется по формуле, вытекающей из выражения (9):

$$S_{\text{max}} = \exp(3,61P_1 - 2,40P_1^2)P_2. \quad (11)$$

Преобразуя формулу (10) с использованием установленных выше соотношений, получаем уравнение, описывающее изменение коэффициента шероховатости зарастающего русла в течение вегетационного периода:

$$n_3 = 0,051/A^{0,067} \left[1 - 9,2(\tau - 0,99\tau^{4/3}) \left(1 - \frac{1,04}{S_{\text{max}}} \right) \right]. \quad (12)$$

Формулы (11) и (12) являются обобщенными системно-зональными зависимостями, так как они опираются на гидроморфологические характеристики речных систем и климатические параметры – соотношения начальной и средней за вегетационный период температур воды, т.е. на самые общие сведения, которые содержатся в изданиях водного кадастра и банках данных современных геофизических информационных систем. В результате становится возможной расчетная оценка пропускной способности русла неизученных рек. Естественно, для каждого конкретного створа величины коэффициентов шероховатости рассчитываются с той или иной степенью приближения. Но в сравнении с соответствующими описательными шкалами шероховатости зарастающих русел количественная определенность полученных зависимостей дает все основания для их предпочтения.

На этой основе нами рассчитана шкала характерных значений максимальных и осредненных коэффициентов шероховатости в зависимости от порядка реки и средней за период вегетации температуры воды t_v . Результаты расчетов представлены в табл. 2. В наших расчетах приняты следующие значения t_v : 12; 14 и 16 °С соответственно для Севера, Центра и Юга ЕТР.

Табл. 2 в полной мере отражает широкий диапазон изменений коэффициентов шероховатости зарастающих русел как по зонам ЕТР, так и по порядкам рек. Чем меньше порядок реки, тем больше зональная изменчивость коэффициента шероховатости. Гидравлические сопротивления русел больших рек менее чувствительны к зарастанию и, соответственно, отличаются меньшим диапазоном изменения коэффициентов шероховатости.

Таблица 2

Зонально-сезонные значения коэффициентов шероховатости зарастающих русел рек ЕТР

A, км ²	Зоны ЕТР								
	Север			Центр			Юг		
	n_{max}		n_{cp}	n_{max}		n_{cp}	n_{max}		n_{cp}
Порядок потока	$n_{вл.}$	$n_{л.}$	$n_{лю.}$	$n_{вл.}$	$n_{л.}$	$n_{лю.}$	$n_{вл.}$	$n_{л.}$	$n_{лю.}$
300	0,065		0,049	0,097		0,061	0,130		0,069
VII	0,048	0,059	0,045	0,057	0,084	0,052	0,064	0,107	0,057
1000	0,062		0,046	0,093		0,057	0,124		0,064
VIII	0,045	0,056	0,042	0,054	0,080	0,049	0,059	0,101	0,053
3500	0,056		0,042	0,084		0,052	0,112		0,058
IX	0,041	0,050	0,038	0,048	0,071	0,044	0,054	0,090	0,048
8000	0,043		0,035	0,064		0,044	0,085		0,050
X	0,034	0,039	0,033	0,042	0,056	0,039	0,047	0,072	0,043
22 500	0,016		0,017	0,024		0,023	0,031		0,028
XI	0,017	0,018	0,015	0,023	0,024	0,022	0,028	0,029	0,027

Несомненно, полученные системно-зональные зависимости подлежат дальнейшему уточнению, но уже и в первом приближении они обеспечивают объективность и единство подхода к оценке гидравлических сопротивлений зарастающих речных русел.

Литература

1. Беркович К.М., Чалов Р.С., Чернов А.В. Экологическое русловедение. – М: ГЕОС, 2000.
2. Карасев И.Ф., Сунцова Е.Б. Пропускная способность русла и учет стока зарастающих рек // Гидротехническое строительство, 2001, № 1.
3. Карасев И.Ф. Руслые процессы при переброске стока. – Л.: Гидрометеиздат, 1975.
4. Леонов Е.А. Некоторые характеристики зарастающего русла в связи с методикой учета стока воды // Труды ГГИ, 1960, вып. 77, с. 74–86.
5. Голосов В.Н. Перераспределение наносов в верхних звеньях флювиальной сети земледельческих регионах: теория вопроса и опыт регионального анализа (на примере равнин умеренного пояса) // Эрозия почв и руслые процессы, 2001, вып. 13, с. 94–119.
6. Ржанецын Н.А. Морфологические и гидрологические закономерности речной сети. – Л.: Гидрометеиздат, 1960.
7. Чалов Р.С. Общее географическое и инженерное русловедение: предмет исследований и положение в системе наук // Вестн. Моск. ун-та, сер. 5, География, 1992, № 6, с. 10–16.
8. Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Сниценко Б.Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса. – Л.: Гидрометеиздат, 1982.
9. Антроповский В.И. Морфология долин и деформации русел рек в карстовых районах Европейской части России // Труды V конф. «Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей». – М.: ИВП РАН, 1999.
10. Гришанин К.В. Гидравлические сопротивления естественных русел. – Л.: Гидрометеиздат, 1992.
11. Барышников Н.Б. Антропогенное воздействие на руслые процессы. – Л.: изд. ЛГМИ, 1990.