

А.С. Головатюк, канд. географ. н., **Ю.Н. Соколов***, д-р техн. н.

Одесский национальный политехнический университет

**Одесский государственный экологический университет*

ВЛИЯНИЕ ТРЕНИЯ ДНА НА СУММАРНОЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ В ЗАРОСШИХ ВОДОТОКАХ

По материалам исследований Ю.Коморы рассмотрен вклад в суммарное гидравлическое сопротивление сопротивления за счет растительности и рельефа дна. Рассмотрены особенности формирования кинематической структуры речного потока при наличии водной растительности и неровностей дна, разработаны рекомендации относительно определения гидравлического сопротивления в зависимости от гидравлических и морфологических параметров.

Ключевые слова: *водная растительность, неровности дна, коэффициент шероховатости, гидравлическое сопротивление*

Вступление.

Исследование, которое приводится в данной статье, направлено на решение одной из актуальных научно-технических проблем – углубить проработку вопросов, связанных с региональным перераспределением водных ресурсов. Цель предложенной работы заключается в исследовании особенностей формирования кинематической структуры водного потока и разработке рекомендаций по определению скорости течения рек и каналов при наличии водной растительности.

Материалы и методы исследований.

Работа выполнена по материалам наблюдений на естественных поймах и по результатам экспериментов Ю. Коморы.

В монографии П.Ф. Горбачева все формулы для расчета параметра C (скоростного коэффициента Шези) подразделяются на две группы. К первой из них относятся формулы, учитывающие коэффициенты шероховатости, а ко второй группе относятся формулы, основанные на учете уклонов свободной поверхности и крупности донных наносов [1]. Использование формул второй группы затруднено, так как отсутствуют достаточно обширные и надежные данные об уклонах и крупности донных наносов, на которых они основаны.

Если на участке поймы длиной L имеют место потери напора, связанные с одновременным влиянием рельефа и растительности, такие потери напора ($\Delta h / L$) определяются как арифметическая сумма потерь напора [3, 5], связанных с рельефом $\Delta h_n / L$ и растительностью $\Delta h_p / L$. Значит,

$$\Delta h / L = \Delta h_n / L + \Delta h_p / L, \quad (1)$$

где L – длина участка реки;

Δh -- напор.

Тогда, согласно (1), для рассматриваемого участка поймы получаем

$$n = \sqrt{n_n^2 + n_p^2}, \quad (2)$$

где n – коэффициент шероховатости;

n_n -- коэффициент шероховатости, обусловленный неровностями дна;

n_p -- коэффициент шероховатости, обусловленный растительностью.

При $n_n / n_p \geq 3$ или $n_n / n_p \leq 1/3$ $n = n_n = n_p$ с ошибкой, не превышающей 30%.

При $n_n / n_p \geq 10$ или $n_n / n_p \leq 1/10$ $n = n_n = n_p$ с ошибкой, не превышающей 10% [4].

Зависимость (2) получена в предположении отсутствия интерференции, то есть – взаимного влияния сопротивлений. Возможное влияние различных видов растений учтено при определении коэффициентов шероховатости, обусловленных растительностью. Интерференцию сопротивлений рельефа и растительности дополнительно не учитываем, так как отметки рельефа снимались с карты с шагом 20-50 м, то есть оценивались только мезонеровности. Влияние микрорельефа специально не учитывалось.

В принципе, недоучет интерференции может только завышать коэффициент шероховатости. То есть недоучет взаимовлияния сопротивлений может работать в «запас» проектируемых сооружений или мероприятий на пойме. При суммировании коэффициентов шероховатости, обусловленных рельефом и растительностью, необходимо иметь в виду, что минимальный коэффициент шероховатости, обусловленный рельефом, включает влияние микрорельефа поймы и выкошенной или слабовыраженной травы, и равен 0,025. Зависимости, аналогичные уравнению (2), давно и широко используются для вычисления приведенного коэффициента шероховатости при разнородной шероховатости смоченного периметра русел рек и каналов [1, 3].

По материалам наблюдений на естественных поймах и по результатам натуральных гидравлических исследований без проведения в широких масштабах культуртехнических мелиораций невозможно экспериментально подтвердить или опровергнуть правомерность использования зависимости (2), так как на заросшей пойме нельзя вычленить раздельное влияние рельефа и растительности, обуславливающих значение коэффициента шероховатости. Поэтому такая попытка предпринята с использованием достаточно надежных лабораторных данных из работы [5]. В лотке длиной 20 м и шириной 0,6 м были проведены серии опытов при «гладком» дне и при дне лотка, покрытом плотно уложенной галькой с высотой выступов (Δ) 3-15 мм и 12-30 мм. И те же опыты, но с растительностью, имитируемой цилиндрами диаметром (D) 3, 6, 12 и 24 мм, установленными в узлах квадратной сетки с шагом 0,12 м. Значения коэффициентов шероховатости были пересчитаны по формуле Павловского (табл.1).

С увеличением глубины потока в лотке от $h = 10$ см до $h = 30$ см отношение коэффициентов шероховатости, обусловленных влиянием рельефа (n_n) и одновременным действием рельефа и растительности (n_{pn}), уменьшается во всех сериях опытов в 1,5-2 раза и составляет $n_n / n_{pn} = 0,25 \div 0,75$.

Отношение коэффициента шероховатости n_p к n_{pn} зависит от глубины существенно слабее и изменяется в пределах $n_p / n_{pn} = 0,60 \div 0,98$.

При $l / D = 5$ (где l – расстояние между элементами шероховатости, имитирующих растительность, D – их диаметр) при всех глубинах и выступах шероховатости дна $n_p / n_{pn} \leq 0,85$, а при $h = 0,30$ -- $n_p / n_{pn} \leq 0,95$. Тогда, при значительной густоте растительности и глубине, вклад шероховатости, обусловленной рельефом, практически можно не учитывать. Главной особенностью экспериментов Ю. Коморы [2] является то, что в одних и тех же условиях опыты проводились при

«гладком» дне и величине выступов 3-15мм и 12-30мм, сначала без, а затем и при наличии элементов шероховатости, имитирующих растительность. Причем диаметр этих элементов составлял 3,6,12 и 24мм.

Таблица 1 – Определение коэффициентов шероховатости по формуле Н.Н.Павловского

№ п.п.	Характеристика рельефа	Глубина H , м	Скорость/уклон v / \sqrt{I} , $\frac{\text{м/с}}{\text{‰}}$	Коэффициент шероховатости n
1	Гладкое дно	0,05	10	0,014
2		0,09	15	0,014
3		0,14	20	0,014
4		0,20	25	0,014
5		0,25	30	0,014
6	Фракции 3-15 мм	0,04	5	0,021
7		0,11	10	0,021
8		0,21	15	0,021
9		0,26	18	0,021
10	Фракции 12-30 мм	0,05	5	0,025
11		0,16	10	0,025
12		0,26	15	0,025

Результаты исследований.

Благодаря полноте данных появилась возможность сопоставить коэффициенты шероховатости, обусловленные рельефом и растительностью (n_{pn}), которые были измерены непосредственно в опытах, с аналогичными ($n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6$), но определенными по следующим формулам:

$$n_1 = \sqrt{n_n''^2 + n_p'{}^2}, \quad (3)$$

$$n_2 = n_n'' + (n_{pn}'' - n_n'), \quad (4)$$

$$n_3 = n_n'' + \sqrt{n_{pn}''^2 - n_n'{}^2}, \quad (5)$$

$$n_4 = n_n'' + n_p', \quad (6)$$

$$n_5 = \sqrt{n_n''^2 + (n_{pn}'' - n_n')^2}, \quad (7)$$

$$n_6 = \sqrt{n_n''^2 + \sqrt{n_p'{}^2 - n_n'{}^2}} = \sqrt{n_n''^2 + n_p'{}^2 - n_n'{}^2}. \quad (8)$$

В зависимостях (3-8) индексы при коэффициенте шероховатости n следующие:

n_p' - гладкое дно с растительностью;

$n''_{рн}$ - дно с выступами шероховатости и растительностью;

$n'_н$ - гладкое дно без растительности;

$n''_н$ - дно с выступами шероховатости, но без растительности.

Нетрудно заметить, что зависимости (3), (5), (7) и (8) соответствуют выражению (2), а (4) и (6) – уравнению (1). Коэффициенты шероховатости n_1 и n_4 , n_2 и n_3 составляют пары, вычисленные по зависимостям (1) и (2).

Сопоставление коэффициентов шероховатости n_1 и n_4 , а также n_2 и n_3 с измеренным $n''_{рн}$ (табл.2) и составляет суть выбора между зависимостями (1) и (2), n_1 и n_4 - коэффициенты шероховатости, вычисленные как сумма, соответственно, алгебраическая и среднеквадратическая коэффициентов шероховатости, обусловленных рельефом с выступами шероховатости ($n''_н$) и растительностью при «гладком» дне ($n'_п$). То есть, при вычислении по зависимостям (3) и (6) значения n_1 и n_4 завышены на величину $n'_н$, которая прибавлена к $n''_н$ вместе с $n'_п$. Поэтому неудивительно, что во всех опытах $n_4 \gg n_1 > n'_п$. В зависимостях (4) и (5) из $n''_{рн}$ вычитается коэффициент шероховатости, обусловленный сопротивлением «гладкого» дна без растительности ($n'_н$). Поэтому $n_2 < n_4$ и $n_3 < n_4$ (табл.2).

Таблица 2 – Сопоставление расчета коэффициента шероховатости по формулам (3– 8), данные [5]

№ п.п.	$n''_н$	D, м	l/D	$n'_{рн}$	$n_p + \Delta$	n_1	n_2	n_3	n_4	n_5	n_6
1	0,021	3-15	20	0,027	0,030	0,034	0,034	0,044	0,048	0,025	0,031
2	0,021	3-15	20	0,038	0,040	0,043	0,045	0,056	0,059	0,032	0,041
3	0,021	3-15	20	0,050	0,054	0,054	0,057	0,069	0,071	0,042	0,052
4	0,021	12-30	20	0,022	0,027	0,030	0,029	0,038	0,043	0,022	0,027
5	0,021	12-30	20	0,032	0,035	0,038	0,039	0,050	0,053	0,028	0,036
6	0,025	12-30	20	0,041	0,043	0,046	0,048	0,059	0,062	0,034	0,044
7	0,025	3-15	40	0,027	0,032	0,037	0,038	0,048	0,052	0,028	0,034
8	0,025	3-15	40	0,038	0,042	0,045	0,049	0,060	0,087	0,035	0,043
9	0,025	3-15	40	0,050	0,055	0,056	0,067	0,073	0,075	0,049	0,054
10	0,025	12-30	40	0,022	0,034	0,033	0,044	0,042	0,047	0,031	0,030
11	0,025	12-30	40	0,032	0,037	0,041	0,052	0,054	0,057	0,037	0,038
12	0,025	12-30	40	0,044	0,045	0,048	0,059	0,064	0,066	0,042	0,046

Казалось бы, следовало ожидать и соотношений $n_2 < n_1$ и $n_3 < n_1$, однако по экспериментальным данным во всех опытах $n_1 < n_2$ и $n_1 < n_3$, что объясняется тем, что в зависимостях (4-6) вычисление производится по образцу (1) и только (3) соответствует выражению (2). По этой же причине $n_2 < n_3$. При сравнении результатов расчетов с измеренными значениями, ближе других -- значения n_1 , затем - n_2 , n_3 , а n_4 дает наименее сходимые с $n''_{рн}$ результаты. Коэффициент шероховатости

n_5 несколько приближается к измеренному значению $n'_{рн}$. Но только величина n_6 поразительно точно совпадает с $n'_{рн}$, и зависимость $n'_{рн} = f(n_6)$ проходит через начало координат под углом в 45° . Относительная ошибка при вычислении по зависимости (8) -- минимальная, а по зависимости (3) - максимальная.

Выводы.

Таким образом, формула (8) для вычисления коэффициента шероховатости n_6 , учитывающего одновременное влияние выступов шероховатости и растительности за вычетом влияния «гладкого» дна, дает наилучшее совпадение со значениями $n'_{рн}$, измеренными в опыте (табл.2), что является безусловным экспериментальным подтверждением преимущества зависимости (2) перед (1).

Для «гладкого» дна коэффициент шероховатости, определяемый растительностью, предлагается рассчитывать по формуле Н.Н. Павловского. Для русел, характеризующихся неровным рельефом дна в виде гряд, рифелей и т.д., методически обоснованнее применять формулу (8).

Предметом дальнейших исследований является уточнение расчета коэффициента шероховатости для зарастаемых русел, что представляет интерес не только при гидравлических расчетах, но и при конструировании механизмов для проведения культуртехнических мелиораций.

Список литературы

1. *Карасев И.Ф.* Русловые процессы при переброске стока. – Л.: ГИМИЗ, 1975. - 288с.
2. *Komora Z.* Uplyv stromových porastov odvodzanie povodni Vinundovaných ťzemiach riek // Vodohospodársky časapis 29. – 1981. – č.5. – S. 514-537.
3. *Павловский Н.Н.* Гидравлический справочник. – М. : ОИТИ, 1987. – 892с.
4. *Соколов Ю.Н.* Гидравлическое сопротивление пойм // Водные ресурсы. – 1980. - №6. – с.16-26.
5. *Чугаев Р.Р.* Гидравлика. – Л.: Энергия, 1985. – 589с.

Вплив тертя дна на сумарний гідравлічний опір в зарослих водотоках.

Головатюк А.С., Соколов Ю.Н.

По материалам исследований Ю.Коморы рассмотрен вклад в суммарное гидравлическое сопротивление сопротивления за счет растительности и рельефа дна. Рассмотрены особенности формирования кинематической структуры речного потока при наличии водной растительности и неровностей дна, разработаны рекомендации относительно определения гидравлического сопротивления в зависимости от гидравлических и морфологических параметров.

Ключові слова: водна рослинність, нерівності дна, коефіцієнт шорсткості, гідравлічний опір

Influence of bottom friction on total hydraulic resistance in copsy water streams.

Golovatyuk A.S., Sokolov Yu.N.

По материалам исследований Ю.Коморы рассмотрен вклад в суммарное гидравлическое сопротивление сопротивления за счет растительности и рельефа дна. Рассмотрены особенности формирования кинематической структуры речного потока при наличии водной растительности и неровностей дна, разработаны рекомендации относительно определения гидравлического сопротивления в зависимости от гидравлических и морфологических параметров.

Keywords: water vegetation, bottom unevennesses, coefficient of roughness, hydraulic resistance.