



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра гидрометрии

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
(бакалаврская работа)

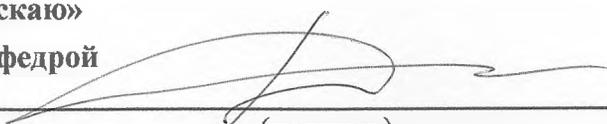
На тему: Взаимодействие руслового и пойменного потоков на примере р. Горынь

Исполнитель Ахмадуллин Максим Алексеевич  
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель д.г.н., профессор, заслуженный деятель науки РФ  
(ученая степень, ученое звание)  
Барышников Николай Борисович  
(фамилия, имя, отчество)

«Благодарю за помощь в защите допускаю»

Заведующий кафедрой

  
(подпись)

к.г.н.,

(ученая степень, ученое звание)

Исаев Дмитрий Игоревич

(фамилия, имя, отчество)

«20» 06 2016 г.

Санкт-Петербург

2016



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра гидрометрии

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
(бакалаврская работа)

На тему Взаимодействие руслового и пойменного потоков на примере р. Горынь

**Исполнитель** Ахмадуллин Максим Алексеевич  
(фамилия, имя, отчество)

**Руководитель** д.г.н., профессор, заслуженный деятель науки РФ  
(ученая степень, ученое звание)  
Барышников Николай Борисович  
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»  
Заведующий кафедрой

---

(подпись)

к.г.н.,  
(ученая степень, ученое звание)  
Исаев Дмитрий Игоревич  
(фамилия, имя, отчество)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Санкт–Петербург  
2016

## СОДЕРЖАНИЕ

	ВВЕДЕНИЕ	3
1	Проблема взаимодействия руслового и пойменного потоков	5
2	Анализ методов построения кривых на реках с поймами	18
3	Анализ исходных данных и оценка полученных результатов	36
3.1	Анализ и оценка исходных данных	36
3.2	Расчет коэффициентов Шези и шероховатости и их анализ	45
3.3	Расчет коэффициентов Буссинеска и Кориолиса и анализ зависимостей $\alpha_B = f(H)$ , $\alpha = f(H)$	48
3.4	Анализ трансформации полей скоростей	58
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	65
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	67

## ВВЕДЕНИЕ

Поймы рек с древнейших времен являлись предметом интенсивного хозяйственного использования человеком. В настоящее время в связи с все большим размахом гидротехнического строительства и хозяйственного использования пойменных земель требования к расчетам пропускной особенности пойменных русел постоянно возрастают.

Однако точность этих расчетов является ниже современных требований. В основных руководствах по инженерной гидравлике и СНиПах господствует простейший подход к расчету пропускной особенности пойменного русла. Поперечное сечение расчленяется на отсеки-главное русло и поймы, потоки в которых рассматриваются как не связанные между собой, разделенные условными, лишенными сопротивления вертикальными плоскостями. После этого для расчета пропускной способности отсеков применяются обычные уравнения гидравлики в зависимости от режима движения, свойственного всему потоку. Гидравлическое сопротивление при этом учитывается обычным способом.

Кроме того, измерение расходов воды в условиях затопления поймы представляют значительные трудности, чем измерение в беспойменном русле. Эти трудности приводят к тому, что в ряде случаев при выходе воды на пойму расходы вовсе не измеряются. К тому же очень часто паводочные работы в пунктах учета стока сети УГМС проводятся не ежегодно. Поймы в свою очередь затопляются не ежегодно.

Цель работы: улучшить точность расчета максимального расхода воды на реках с поймами.

Задачи:

1. По данным УГМС построить профили сечения по гидростворам и определить отметки затопления пойм
2. Выделить фазы затопления пойм
3. Построить и проанализировать кривые зависимости
4. Вычислить коэффициенты шероховатости при различных уровнях воды и сравнить их с табличными
5. Исследовать коэффициенты Буссинеска и Кориолиса с изменением уровня воды

Расходы воды, измеряемые на поймах при малых их наполнениях, как правило, отличаются очень низкой точностью вследствие ряда обстоятельств (большая косоструйность и обратные течения, малые скорости течения воды).

В последнее время работами ученых, было раскрыто интересное научное и важное в практическом плане явление взаимодействия руслового и пойменного потоков, суть которого заключалась в дополнительных затратах энергии на массообмен между ними.

Учет этого явления при расчетах максимальных расходов может повысить точность их расчетов. Также следует отметить, что для повышения паводочных измерений выдвигается вопрос о замене измерений расходов при высоких уровнях наблюдениями над уклонами водной поверхности.

Трудоемкие и не всегда надежные паводочные работы по измерению расходов воды заменяются значительно более простыми и поддающимися автоматизации наблюдениями на уровнях. Исходя из выше сказанного, нетрудно понять, почему в последнее время интерес к поймам, в частности, к расчетам их пропускной способности и гидравлических сопротивлений значительно возрос.

## 1 Проблемы взаимодействия руслового и пойменного потоков

Суть проблемы взаимодействия руслового и пойменного потоков состоит в уменьшении пропускной способности сложно-составленных русел, частным случаем которых являются русла с поймой, за счет дополнительных сопротивлений, возникающих при движении отсеков потока с различными скоростями.

На протяжении длительного времени в гидравлике и в гидрометрии движение воды в руслах с поймами рассматривались так, как будто движение в русловой и пойменной частях происходило независимо, то есть выход воды на пойму не влияет на русловой поток. Эта неправильная точка зрения повлияла на некоторые методы в гидрометрии и в гидравлике. Например, при расчете воды в руслах со сложной формой допускали часто формальное деление потока вертикальными продольными плоскостями на части. Для каждой части в целях подсчета расхода воды применялись обычные уравнения движения, а общий расход получался путем простого суммирования частных расходов воды [1].

В 1947 году Г.В.Железняков предложил при анализе движения воды в русле с поймами исходить из того, что движение воды при выходе на пойму происходит в условиях взаимодействия основного и руслового потоков.

Это явление обуславливает существенное изменение кинематической структуры потока в основном русле в пределах его живого сечения, оказывая влияние и на движение воды в пойме вблизи русла. Перестройка поля скоростей, сопровождающаяся образованием вихрей, объясняется различиями в гидравлических сопротивлениях русла и поймы [1].

По характеру взаимодействия можно выделить 5 типов взаимодействия потоков.

К первому типу взаимодействия относятся потоки, динамические и геометрические оси которых параллельны. Хотя в природе они встречаются довольно редко, они изучены значительно лучше других типов.

Большинство работ, посвященных разработке методики расчета пропускной способности русел при этом типе основаны введении поправочных коэффициентов, учитывающих эффект взаимодействия руслового ( $K_p$ ) и пойменного ( $K_n$ ) потоков к составляющим расхода воды в виде [1]:

$$Q = K_p \times Q_p + K_n \times Q_n \quad (1.1)$$

где  $Q_p$  – расход воды в русле, м<sup>3</sup>/с;

$Q_n$  – расход воды в пойме, м<sup>3</sup>/с.

Для расчета значений  $K$  предложено большое количество формул, которые учитывают уменьшение расхода в русле под влиянием потока поймы.

Так И.Ф. Красев на основе уравнения количества движения, получил следующее значение коэффициентов, которые представлены в формулах 1.2 и 1.3:

$$K_p = \left( \frac{g \times B \times p}{g \times B \times p + 2 \times \varphi \times C_p^2 \times K_v \times H_p \cdot b} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1.2)$$

$$K_n = \frac{g \times B \times n}{g \times B \times n - 2 \times \varphi \times \alpha_v \times C_n^2 \times K_v \times H_{p,6}}, \quad (1.3)$$

- где  $g$  – ускорение свободного падения,  $m/c^2$ ;
- $B_p B_n$  – коэффициенты, учитывающие долю площади русла и поймы от всей площади сечения потока;
- $\varphi$  – коэффициент, учитывающий отношение сохранившейся продольной скорости обменивающихся масс к средней скорости потока;
- $K_v$  –  $\frac{V_p - V_n}{V_p}$ , коэффициент взаимодействия скоростей;
- $H_{p,6}$  – уровень русла до бровки, см;
- $C_n$  – коэффициент Шези.

$$\alpha_v = \frac{V_p}{V_n}, \quad (1.4)$$

- где  $V_p$  – скорость в русле, м/с;
- $V_n$  – скорость в пойме, м/с.

И.П. Спицин предложил расчет средней скорости всего потока ( $V'$ ) выполнять по формуле:  $V' = kV = K(B_p V_p + B_n V_n)$ .

$$K = \frac{R_p}{R_{p,6}} \left[ 1 - 0.56 \sqrt{\frac{\Delta V}{V} \frac{h_n}{R_{p,6}} \left( \frac{B_p}{B_n} \right)^{1/4}} \right], \quad (1.5)$$

- где  $R_{p,6}$  – гидравлический радиус русла при условиях его бровки,  $m^2$ ;
- $\Delta V$  – разность скоростей русла и поймы, м/с

Г.В. Железняков предложил значения коэффициентов  $K_p$  и  $K_n$  рассчитывать по формуле 1.6 [1]:

$$\begin{aligned} K_p &= K'_p + K_{\text{к.э.р.и}}, \\ K_n &= K'_n + K_{\text{к.э.п}}, \end{aligned} \quad (1.6)$$

где  $K'_p, K'_n$  – коэффициенты, которые учитывают влияние формы сечения русла на его пропускную способность;  
 $K_{\text{к.э.р.и}}, K_{\text{к.э.п}}$  – кинематический эффект взаимодействия руслового и пойменного потоков.

Г.В. Железняков предложил формулу для расчета пропускной способности русла с поймой в виде [1]:

$$Q = \left( 1 - \frac{B_{*p} C_{*p}}{\sqrt{g}} \sqrt{\frac{I}{F_{\text{Гр}}}} + K_{\text{к.э.р}} \right) Q_{\text{рф}} + \left( 1 - \frac{B_{*п} C_{*п}}{\sqrt{g}} \sqrt{\frac{I}{F_{\text{Гп}}}} + K_{\text{к.э.п}} \right) Q_{\text{пф}}, \quad (1.7)$$

где  $B_{*п}$  – параметр, учитывающий неравномерность изменения глубин;  
 $C_*$  – коэффициент Шези, в который введена поправка, учитывающая форму сечения;  
 $F_{\text{Г}}$  –  $\frac{V_{\text{пов}}}{gn}$ , число Фруда;  
 $V_{\text{пов}}$  – средняя поверхностная скорость, м/с;  
 $K_{\text{к.э}}$  – [0.04-0.08], коэффициент учитывающий выравнивание скоростей.

Индексы «р» и «п» соответствуют руслу и пойме. Им же была предложена методика расчета пропускной способности с различной шероховатостью по ширине, которая может быть применена и для расчета пропускной способности русел с поймами [1].

$$Q = Q'_п + Q'_р - (K'_р - K'_п)Q_{р.б}, \quad (1.8)$$

где  $K'_р, K'_п$  – параметры кинематического эффекта соответственно в русле и пойме;

$Q_{р.б}$  – расход воды в русле при затоплении его до бровки, м<sup>3</sup>/с.

Методика Г.В. Железнякова является дальнейшим развитием методики, основанной на уравнении (1.1) ее преимуществом является разработка рекомендаций для определения коэффициентов  $Kр$  и  $Kп$  в зависимости от глубины руслового и пойменных потоков. Однако она также нуждается в проверке и уточнении по натурным наблюдениям [1].

Можно привести предложения и других авторов, но все они, как правило, имеют ограниченное применение, что обусловлено слабой изученностью проблемы, сложностью процессов и существенным их отличием в натуральных условиях от лабораторных, из-за влияния морфологического строения русла и поймы. Поэтому, как отметил Г.В. Железняков: «Желательны исследования  $K_{к.э}$  в зависимости от  $(\frac{n_п}{n_р}; \frac{B_п}{B_р}; \frac{h_р}{h_{р.б}})$  и других параметров.

По мнению Н.Б Барышникова, в число основных параметров предложенных Г.В. Железняковым, необходимо включать угол ( $\alpha$ ) и уклон свободной поверхности  $(\frac{l}{l_{р.б}})$ .

Второй путь решения проблемы расчета скоростей руслового и пойменного потоков в условиях их взаимодействия основан на анализе системы дифференциальных уравнений движения и неразрывности с целью получения хотя бы приближенных решений.

Одним из первых явилось предложение Д.Е. Скородумова, который на основании решения системы уравнений движения потока с переменной массой и неразрывности получил уравнение[2]:

$$I = \frac{\bar{V}^2}{c^2 \times h} + \frac{\alpha_H \times V_H^2 - \alpha_B \times V_B^2}{2 \times g \times L} + \frac{V - V_g}{g \times \omega} \times \frac{Q_H - Q_B}{L} + i_{B3} + \frac{1}{g} \times \frac{\Delta V}{\Delta t}, \quad (1.8)$$

где  $i_{B3}$  – член, который учитывает потери напора, обусловленные взаимодействием, приходящиеся на единицу длины

$$\varepsilon_2 = \frac{V - V_g}{g \times \omega} \times \frac{Q_H - Q_B}{L} \quad (1.9)$$

Терминология Д.Е. Скородумова также частично учитывает эффект взаимодействия руслового и пойменных потоков.

По-видимому, инерционный член  $\varepsilon_4$  учитывает влияние первого типа взаимодействия; т.е. добавочный уклон, возникающий при вихревом движении между руслом и поймой. Однако четкого разграничения роли инерционных членов в учете типа взаимодействия автором не приводится, поэтому в дальнейшем при оценке влияния эффекта взаимодействия будем рассматривать его суммарную величину, обозначая ее  $i_{B3}$ .

Решая уравнение (1.8) относительно  $V$ , с учетом  $i_{B3} = \varepsilon_4$  получаем уравнение 1.9:

$$V = c \times \sqrt{h \times (I - \varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3 - \varepsilon_4)} \quad (1.9)$$

В 1969 году Г.В. Железняков предпринял попытку преобразования системы дифференциальных уравнений движения и неразрывности для расчета параметров потока в русле с поймой. Полученные им уравнения, как отмечает сам автор, не доведены до расчетных [1].

$$\int_0^{B-B_{кэ}} \alpha_{б} \times V \times \frac{\partial V}{\partial l} \times \partial b + \int_0^{B_{кэ}} \alpha_{Б.кэ} \times \frac{\partial V_{кэ}}{\partial l} \times \partial b + \int_0^B \alpha_{к} \times \frac{\partial V}{\partial t} \times \partial b + g \times \int_0^B \frac{\partial h}{\partial l} \times \partial b = g \times I \times B - \int_0^{B-B_{кэ}} \frac{V^2}{c^2 \times h} \times \partial b - \int_0^{B_{кэ}} \frac{V_{кэ}^2}{c_{кэ}^2 \times h} \times \partial b, \quad (1.10)$$

$$\int_0^B \frac{\partial V}{\partial t} \times \partial b + \int_0^{B-B_{кэ}} V \times \frac{\partial h}{\partial l} \times \partial b + \int_0^{B_{кэ}} V_{кэ} \times \frac{\partial h}{\partial l} \times \partial b + \int_0^B h \times \frac{\partial V}{\partial l} \times \partial b = 0,$$

- где  $B_{кэ}$  – часть ширины потока, на которой наблюдается кинематический эффект, м;
- $\alpha_{к}, \alpha_{б}$  – коэффициенты Кориолиса и Буссинеска на вертикали;
- $l, b$  – элементы длины и ширины потока, м;
- $V$  – средняя скорость потока на вертикали, м/с;
- $K_{э}$  – индекс обозначающий, что расчет параметра выполняется с учетом кинематического эффекта.

Решение Г.В. Железнякова весьма интересно и оригинально, но до доведения его уравнений до расчетных необходимы глубокие проработки, в частности по определению значений  $B_{кэ}$ ,  $C_{кэ}$  и других характеристик потока в зоне действия кинематического эффекта.

Н.Б. Барышников констатирует, что методика аналитического расчета параметров потока сложносоставного сечения разработана недостаточно, а

эмпирические, приближенные методы, как правило, основаны на лабораторных данных и расчеты по ним дают результаты существенно отличные от натуральных [1].

Это отличие обусловлено двумя основными причинами. Первая – резкое различие морфометрии русел и пойм, как в поперечном сечении, так и в особенности по длине естественных водотоков от моделей. Практически во всех экспериментальных работах исследовались потоки на моделях с постоянными по длине и ширине характеристиками русла и поймы, причем их суммарная ширина, как правило, была неизменной по длине.

Уклоны свободной поверхности поддерживались одинаковыми как в русле, так и на пойме, и неизменными по длине, практически не менялись при изменении уровней [3].

Вторая – в сложности процесса изменения уклонов свободной поверхности по ширине и длине потоков в руслах с поймами при увеличении уровней воды. Изменение уклонов, в свою очередь определяет характер изменения коэффициентов шероховатости.

Все предыдущие расчеты основаны для первого типа взаимодействия руслового и пойменных потоков. Расчет дополнительных сопротивлений можно выполнить по формуле 1.11 [3]:

$$\varepsilon = A_b \times \frac{\partial V}{\partial b} \quad (1.11)$$

где  $\frac{\partial V}{\partial b}$  – градиент скорости в зоне взаимодействия потоков, м/с;  
 $A_b$  – коэффициент турбулентности (по ширине потока).

Однако анализ материалов экспериментальных исследований по этой проблеме показывают, что уменьшение пропускной способности руслового отсека, да и потока в целом невелико, в пределе достигает 8-10%.

Ко второму типу – относятся потоки, в которых происходит перемещение масс жидкости из русла на пойму, то есть рассекание руслового потока на пойму(или поймы). Этот тип взаимодействия потоков довольно часто наблюдается в природных условиях, особенно в период подъема половодий и паводков, когда воды русла затопляют пойму.

Геометрические оси руслового и пойменного потоков могут быть в этом случае параллельными и непараллельными. Процесс перетекания масс жидкости из русла на пойму обусловлен рядом причин, в частности различием скоростей движения воды в русле и на пойме, отличием сроков снеготаяния в отдельных частях бассейна, особенно на реках, текущих на север, и другими.

Дополнительные сопротивления, возникающие при взаимодействии таких потоков, обусловлены резким увеличением сопротивлений массам руслового потока, имеющим высокие скорости и поступающим на пойму, шероховатость которой, как правило, больше чем в русле.

Однако анализ опубликованных данных, полученных в РГГМУ, позволяет сделать вывод о том, что увеличение сопротивлений при данном типе взаимодействия мало. Так экспериментами РГГМУ установлено, что расходы воды в русловом отсеке были не значительно меньше, чем в условиях его изоляции от пойменного стеклянными продольными стенками. В то же время расходы воды пойменного отсека больше, чем в условиях изоляции. Таким образом, расход воды, в целом через сечение несколько превышал соответствующий суммарный расход воды в русловом и пойменном отсеках потока в условиях их изоляции. Однако это увеличение расходов невелико. Оно обусловлено значительным сопротивлением в

изолированных потоках и небольшим уменьшением площади их сечения за счет стеклянной разделительной стенки [3].

Обязательным условием возникновения данного типа взаимодействия руслового и пойменного потоков являются поперечные уклоны свободной поверхности воды, направленные из русла в пойму.

Следует отметить, что при данном типе взаимодействия потоков наблюдается весьма интенсивный обмен масс между руслом и поймой, поэтому к расчету таких потоков можно применять лишь уравнения потоков с переменной массой. Третий тип характеризуется перемещением масс жидкости из поймы в русло [1].

Дополнительные сопротивления возникают за счет торможения руслового потока, вторгающегося в него массами пойменного потока, имеющий значительно меньшие скорости течения. Это приводит к существенным уменьшениям пропускной способности русел, достигающим по экспериментальным и натурным данным 40% и более по сравнению с аналогичным потоком, но в условиях его изоляции от пойменного. Уменьшение пропускной способности зафиксировано также и для потока в целом, по сравнению с суммарным для изолированных отсеков потока при тех же глубинах и других характеристиках [1].

Существенные деформации терпит скоростное поле потока. Динамическая ось руслового отсека потока, так же как и при втором типе взаимодействия, смещается в сторону, противоположную пойме с наибольшей шероховатостью [4].

Данный тип взаимодействия, так же как и предыдущий, довольно часто наблюдается в природе, особенно при параллельности геометрических осей в период спада половодий и паводков, когда воды поймы, как правило, из их низовий поступают в русло.

В натуральных условиях, особенно при наличии транзитного потока поймы, на отдельных участках водотока, в зависимости от изменения морфометрии его русла и поймы по длине реки, возможно чередование различных типов взаимодействия руслового и пойменного потоков. Как правило, зонам расширения должен соответствовать второй тип взаимодействия потоков русла и поймы, а сужению – третий [4].

Четвертый тип взаимодействия наиболее сложный, и характеризуется пересечением динамических осей руслового и пойменного потоков. Он является типичным для потоков в меандрирующих руслах и руслах с фуркацией (пойменная многорукавность) при пропуске расходов, близких к катастрофическим, когда возникает транзитный пойменный поток.

Процесс взаимодействия таких потоков изучен не достаточно. Наиболее детальные и полные экспериментальные данные приведены в работе Г.В. Иванова и Н.Б. Барышникова [5] применивших оригинальную методику измерения векторов скоростей и других характеристик руслового и пойменного потоков как при их взаимодействии (при углах пересечения динамических осей потоков  $\alpha = 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ ) так и в условии их изоляции.

Н.Б. Барышников [6] отмечает большое влияние глубин наполнения поймы и угла пересечения динамических осей руслового и пойменного потоков на поле скоростей в русле и пойме и их пропускную способность. Им были проведены исследования на основе анализа натуральных материалов по 27 рекам, бассейны которых расположены в различных физико-географических зонах России [6]. По планово-высотным материалам участков постов были определены углы пересечения геометрических осей руслового и пойменного потоков, которые в дальнейшем приравнивались к углам пересечения динамических осей ( $\alpha$ ).

Такой способ определения углов ( $\alpha$ ) приближенный, его точность около  $5^\circ$ . Практически он не дает возможности оценить изменение угла при изменении глубин.

В результате проведенных работ автор приходит к выводу, что зависимость должна иметь вид:  $\frac{V_p}{V_{p.б}} = f\left(\frac{h_p}{h_{p.б}}; \alpha; \frac{I}{I_{p.б}}; \frac{n_{п}}{n_p}; \frac{B_{п}}{B_p}\right)$ .

Основными факторами этой зависимости, определяющими значения скоростей в русле, являются : относительная глубина, угол пересечения динамических осей( $\alpha$ ), а при его равенстве нулю – значение уклонов свободной поверхности ( $\frac{I}{I_{p.б}}$ ).

Резкое уменьшение скоростей руслового потока под влиянием пойменного, пересекающего его под значительными углами ( $\alpha > 30^\circ$ ), обусловлено тем, что верховая бровка русла как бы выполняет роль водослива, около которого в основном русле возникает водоворотная зона [4].

Ее размеры пропорциональны углу пересечения осей потоков, разнице их скоростей, а при больших углах – скорости, глубине и ширине пойменного потока, а также зависит от разности их шероховатостей и других факторов. С увеличением угла  $\alpha$  до  $90^\circ$  и больше, а также скоростей пойменного потока, водоворотная зона может занять все русло и в нем возникают обратные течения.

Таким образом, четвертый тип взаимодействия руслового и пойменного потоков является наиболее распространенным, но и наиболее сложным.

Первые три типа взаимодействия можно рассматривать как частные случаи четвертого.

Особым случаем является пятый тип взаимодействия потоков, протекающих в руслах с двумя разновысотными поймами, а также с одно или

двухсторонний одинаковой высоты поймой, у которой с ростом уровней ее расширение по длине сменяется сужением или наоборот, сужение – расширением [4].

## 2 Анализ методов построения кривых на реках с поймами

На большинстве опорных постов сети гидрометслужбы выполняются наблюдения над уровнями, расходами воды, скоростями течения, глубинами, уклонами свободной поверхности, являющиеся основой для построения кривых зависимостей:  $Q=f(H)$ ,  $\omega=f(H)$ ,  $V=f(H)$ ,  $h=f(H)$ ,  $I=f(H)$ . По этим же данным рассчитываем коэффициент Шези:  $C = \frac{V}{\sqrt{I \times H}}$

По формуле Павловского или Манинга рассчитываем коэффициент шероховатости «n» и строим кривые зависимостей  $c=f(H)$  и  $n=f(H)$ .

Для вычисления максимальных расходов выполняют экстраполяцию указанных кривых ( $Q=f(H)$ ;  $\omega=f(H)$ ;  $V=f(H)$  и др.) [3].

Однако на ряде постов отсутствуют измерения расходов воды при затопленной пойме, хотя глубины затопления последней весьма значительны, что приводит к невозможности расчета как максимального, так и годового стока.

Еще хуже обстоит дело с подсчетом максимальных расходов воды на малых водотоках, где ряд наблюдений отсутствует, а имеющиеся расчетные методы не всегда дают удовлетворительные результаты и при массовых расчетах нуждаются в сравнении с данными натурных наблюдений или расчетов, основанных на натурных данных.

Н.Н. Павловским была предложена методика определения расходов воды составных русел путем разбивки их на отсеки в местах резкого изменения поперечного профиля или шероховатости, то есть с учетом формулы Шези, ограничиваясь  $i=2$  [3].

$$Q = \sum Q_i = Q_p + \sum Q_n \quad (2.1)$$

$$Q = \omega_p \times c_p \times \sqrt{h_p} \times I_p + \omega_{n1} \times c_{n1} \times \sqrt{h_{n1}} \times I_{n1} + \omega_{n2} \times c_{n2} \times \sqrt{h_{n2}} \times I_{n2}, \quad (2.2)$$

где  $\omega$  – площадь живого сечения, м<sup>2</sup>;  
 $c$  – коэффициент Шези

Индексы «р» и «п» соответствуют руслу и пойме. Остальные обозначения общепринятые.

В указанной методике сделан ряд допущений, основными из которых являются: формула Шези разработана для расчетов скоростей потоков равномерного, установившегося режима. Близкий к ним, так называемый, квазиравномерный и квазиустановившийся режим наблюдается в меженьный период. В период прохождения высоких паводков, когда пойма затапливается, режим потока весьма существенно отличается от равномерного и установившегося. Поэтому применение формулы Шези в этот период является определенным допущением [3].

В 1965 году Д.С. Скородумовым был выполнен весьма тщательный анализ этого допущения на основе данных специальных натурных наблюдений дифференциальных уравнений движения и неразрывности потока в открытом русле с переменным расходом.

$$I = \frac{V^2}{c^2 \times h} + \frac{\partial}{\partial l} \left( \frac{\alpha \times V^2}{2 \times g} \right) + \frac{1}{g} \times \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{Q \times V}{L \times g \times \omega}, \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial l} = \frac{Q}{L} \quad (2.4)$$

Подставив первое из системы этих уравнений в конечных разностях в виде:

$$I = \frac{V^2}{c^2 \times h} + \frac{\alpha_H \times V_H^2 - \alpha_B \times V_B^2}{2 \times g \times L} + \frac{V - V_g}{g \times \omega} \times \frac{Q_H - Q_B}{L} + \frac{1}{g} \times \frac{\Delta V}{\Delta t}, \quad (2.5)$$

где  $I$  – уклон водной поверхности, град;  
 $l$  – продольная координата, м;  
 $t$  – время, с;  
 $\alpha$  – корректив скорости;  
 $V_g$  – проекция скорости притекающих или оттекающих масс воды на направление средней скорости рассматриваемого потока

Используя данные специальных натуральных наблюдений в паводочный период, он оценил вес каждого члена уравнения. Индексом «н» и «в» обозначают соответственно нижний и верхний створы;

Анализируя это уравнение, Д.С. Скородумов для одного объекта получил значение:  $\frac{1}{g} \times \frac{\Delta V}{\Delta I} = 0.00000012$ .

Как отмечает автор, что составляет доли процента от уклона в паводочный период на равнинных реках. Значительно сложнее оценка членов уравнения, учитывающих неравномерность движения и изменение расхода воды по длине водотока, и для этого необходимы данные об измерениях, по крайней мере, на двух створах, расположенных на небольшом расстоянии друг от друга, и сведения о притоке и оттоке [3].

Анализируя важность этих членов, названных инерционными, также был выполнен Д.С. Скородумовым. Обозначив их соответственно через формулу 2.6:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{\alpha_n \times V_n^2 - \alpha_v \times V_v^2}{2 \times g \times L} \\ \varepsilon_2 &= \frac{V - V_d}{g \times \omega} \times \frac{Q_n - Q_v}{L} \end{aligned} \quad (2.6)$$

Он по данным наблюдений на нескольких створах рек Луги и Пьяны определил значение инерционных членов, а по реке Дон, лишь приблизительно оценил их величины.

Не смотря на то, что абсолютные значения параметров  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  являются приближенными, ибо на них оказывают существенное влияние, как ошибки измерений, так и допущения, принятые в методике их вычисления, они дают нам возможность судить о порядке величин этих инерционных членов и о величине ошибок, которая допускается при использовании формулы Шези для расчетов по данным лишь одного створа.

По данным Д.С. Скородумова значения  $\varepsilon$ , достигают 0.000023 на реке Луге и 0.000030 на реке Пьяна, что составляет 25-28% ( на р. Луга ) и 55%(на р. Пьяна) от составляющего значения уклона свободной поверхности. Однако значение  $\varepsilon_2$ , хотя по абсолютной величине и значительно меньше  $\varepsilon$ , но, как правило, для указанных рек имеет знак противоположный  $\varepsilon_1$ .

Максимальное значение  $\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{I}$  соответствует 36%.

На кафедре ЛГМИ были выполнены расчеты величин на реке Дон у х. Хованский. Для расчетов использовались сведения об измеренных расходах воды по одному створу и данные промеров по второму, расположенному в 1515 км от первого.

Расчеты результатов показывают, что значение  $\varepsilon$ , весьма близко к значению  $I$  на данном участке. В то же время в процессе проработок были использованы данные промеров по третьему створу, который находился на расстоянии 51.4 км от расходного.

При введении в формулу 2.6 значения  $L = 51.4$  км расчетная величина  $\varepsilon$ , получена равной 0.000000002, что составляет ничтожную долю процента от уклона свободной поверхности.

Таким образом, при переходе от дифференцирования к конечным разностям возникает дополнительная погрешность, связанная с выбором расчетного значения «L». Как вытекает из условий неразрывности, при постоянном по длине расходе воды величина инерционного члена будет определяться характером изменения площадей поперечного сечения по длине реки.

$$\varepsilon_1 = \frac{\alpha_H \times V_H^2 - \alpha_B \times V_B^2}{2 \times g \times L} = \bar{\alpha} \times \frac{V_H^2 - V_B^2}{2 \times g \times L} \quad (2.7)$$

Допуская в первом приближении  $\alpha_H = \alpha_B = \bar{\alpha}$  и учитывая, что  $V = \frac{Q}{\omega}$  получим следующее:

$$\varepsilon_1 = \bar{\alpha} \times \frac{Q^2}{2 \times g \times L} \times \left( \frac{1}{\omega_H^2} - \frac{1}{\omega_B^2} \right) = \frac{\bar{\alpha} \times Q^2}{2 \times g \times L} \times \left( \frac{\omega_H^2 - \omega_B^2}{\omega_H^2 \times \omega_B^2} \right) \quad (2.8)$$

Изменение же площадей поперечных сечений пойм по длине реки. Однако и здесь, как считает Н.Б. Барышников, наблюдается четкая зависимость вида кривой  $\omega_{п} = f(L)$  от типа поймы и в конечном счете от типа руслового процесса[3].

Н.Б. Барышниковым [2], были установлены наибольшие ошибки, ожидаемые при расчете скоростей, если не учитывать инерционных членов (по наибольшему числу объектов). Им получено, что наибольшие значения отношений расчетных скоростей, а, следовательно, и расходов воды весьма существенны и достигают 37% и подчеркивается, что произведенные расчеты являются ориентировочными, и реальная величина ошибки, при пренебрежении инерционными членами, может быть существенно выше приведенной. Вопрос этот нуждается в дальнейшей более углубленной

проработке с привлечением более обширного материала натурных исследований [4].

Другим существенным недостатком расчетов  $Q_{max}$  по формуле Шези является допущение о равенстве уклонов свободной поверхности в русле и на пойме. Это допущение связано с отсутствием методики, а следовательно, и надежных данных измерений уклонов на пойме.

В последнее время вопросу несоответствия уклонов свободной поверхности в русле и на пойме при затоплении последней уделяется большое внимание и посвящено ряд работ.

Так в работе А.В. Гордикова и Н.В. Россомахина [5] указывается на несоответствие уровней и продольных уклонов в русле и на пойме реки. Характер связи уровней потоков в русле весьма сложный и свидетельствует о запаздывании хода уровней поймы от хода уровней русла. Далее констатируют наличие однонаправленного в сторону поймы от русла поперечного уклона свободной поверхности. При этом авторы подчеркивают, что уровень поймы во все фазы паводка был меньше уровней в русле. Это явление они объясняют в первую очередь поперечными уклонами поверхности поймы.

Этот вывод несколько противоречит общепринятому представлению о том, что при опорожнении поймы на спаде половодья уклоны свободной поверхности обычно направлены в сторону русла. По-видимому, данные наблюдений только по одному пойменному массиву, относящемуся к меандрирующему типу (свободное), не дают возможности обобщения и нуждаются в проверке.

Несоответствие продольных уклонов свободной поверхности руслового и пойменного потоков, а также наличие поперечных уклонов подтверждается

и в других работах. Эти расхождения находятся в прямой зависимости от типа поймы и ее аккумуляющей емкости.

Еще одна сложность расчетов по формуле Шези состоит в неопределенности коэффициента Шези «с» как для русловой, так и для пойменной части потока.

В настоящее время известно свыше 300 формул для расчета коэффициента «с», правильный выбор расчетной формулы, поэтому является важной задачей. Анализ формул для расчета коэффициента Шези производился разными авторами в разные годы. Наиболее детальный и полный анализ формул выполнен в монографии П.Ф. Горбачева и диссертации В.А. Соколовой. Ими отмечается, что значительное число формул для расчета коэффициента «с» носит частный характер или получено на ограниченном опытном материале и поэтому не представляют в настоящее время интереса [3].

Приведем несколько распространенных формул для расчета коэффициента Шези «с». Гангилье-Кутгера (1869 год) – 2.9, Базена (1897 год) – 2.10, Маннинга (1890 год) – 2.11, Форхгеймера (1923 год) – 2.12, Павловского (1925 год) – 2.13 [3].

$$C = \frac{23 + \frac{1}{n}}{1 + 23 \times \frac{n}{\sqrt{R}}}, \quad (2.9)$$

$$C = \frac{87}{1 + \frac{y}{\sqrt{R}}}, \quad (2.10)$$

$$C = \frac{1}{n} \times R^{1/6}, \quad (2.11)$$

$$C = \frac{1}{n} \times R^{1/5}, \quad (2.12)$$

$$C = \frac{1}{n} \times R^y, \quad (2.13)$$

$$y = 2.5 \times \sqrt{n} - 0.13 - 0.75 \times \sqrt{R} \times (\sqrt{n} - 0.10) \quad (2.14)$$

Во всех формулах «n» и «у» коэффициенты шероховатости. Широкое распространение за рубежом из эмпирических формул имеет формула Штриклера 2.15 [3]:

$$C = 21.1 \times \sqrt[6]{\frac{R}{d}}, \quad (2.15)$$

где  $d$  – величина неровностей русла

А.В. Караушевым эта формула приведена к виду:

$$C = 33 \times \left(\frac{H_{\text{cp}}}{d}\right) \quad (2.16)$$

где  $H_{\text{cp}}$  – средняя глубина в потоке;

$d$  – средний диаметр частиц донных отложений, который он связывает с гидравлической шероховатостью соотношением, м.

$$n = 0.03 \times d^{1/6} \quad (2.17)$$

Из полученных формул для расчета коэффициента «С» приведем формулу И.И. Агроскина, предложенную им в 1949 году [5]:

$$C = \frac{1}{n} + 17.72 \times \lg R \quad (2.18)$$

Впоследствии, эта формула неоднократно подвергалась уточнениям в 1965 году В.Ф. Толмаза 2.19:

$$C = \frac{1}{n} + (21 - 100 \times n) \times lgh_{\text{cp}} \quad (2.19)$$

В 1965 году И.И. Агроскин и Д.В. Штенлихом была предложена следующая формула:

$$C = \frac{1}{n} + (27.5 - 300 \times n) \times \lg R \quad (2.20)$$

В связи с трудностью определения гидравлической шероховатости « $n$ » по таблицам, о чем будет сказано ниже, были выполнены попытки замены коэффициента « $n$ » в формуле И.И. Агроскина реальными размерами выступов шероховатости.

М.А. Мостков в 1949 году предложил полуэмпирическую формулу для определения « $c$ » в открытых руслах:

$$C = \lg \frac{R}{\Delta} + 9.5 \times \frac{\Delta}{R} + 1.5 \quad (2.21)$$

где  $\Delta$  – высота влияния выступов шероховатости, которая выбирается по шкале им разработанной.

Список формул для расчета коэффициентов Шези можно было бы продолжить, но остановимся на формуле Н.Н. Павловского, которая является обобщающей для формул степенного вида.

Но она имеет ограниченное применение (для  $R \leq 3$  м), однако ее автор считал возможным экстраполяцию формулы за пределами использованного экспериментального материала, т.е. до  $R = 5$  м [3].

Выражение (2.14) для определения показателя « $u$ » дает принципиально разный характер его изменения в зависимости от  $R$ . Так при коэффициенте шероховатости  $n = 0.01$  оказывается, что « $u$ » не зависит от гидравлического радиуса и, следовательно, коэффициент « $c$ » зависит от  $R$  в степени 0.12. При больших значениях  $R$  величина « $u$ » может иметь отрицательные значения.

Структура формулы (2.14) обуславливает пересечение всех кривых  $y(R)$  в одной точке, координаты которой равны  $R=11.1$  м. и  $y=0.12$ , поэтому вблизи этой точки показатель « $y$ » практически не зависит от коэффициента шероховатости « $n$ », однако при  $y=0R^y = 1$  и коэффициент « $c$ » не зависит от « $n$ ».

Все это свидетельствует о том, что формулу (2.13) нельзя распространять на большие значения  $n$  и  $R$ .

Г.В. Железняков получил формулу для показателя « $y$ » свободную от указанных выше недостатков.

$$y = \frac{1}{lgR} \times lg \left\{ \left[ \frac{1}{2} - \frac{n \times \sqrt{g}}{0.26} \times (1 - lgR) \right] + n \right. \\ \left. \times \sqrt{\frac{1}{4} \times \left[ \frac{1}{n} - \frac{\sqrt{g}}{0.13} \times (1 - lgR) \right]^2 + \frac{\sqrt{g}}{0.13} \times \left( \frac{1}{n} + \sqrt{g} \times lgR \right)} \right\} \quad (2.22)$$

И утверждает, что это выражение позволяет рассчитывать величины « $y$ », а следовательно, и « $c$ » по формуле (2.13) при любых значениях  $n$  и  $R$ .

Для упрощения расчетов величины « $y$ » им составлена таблица для ее расчета, причем  $R(h)$  изменяется от 0.1 до 20.0 м, а  $n$  от 0.01 до 0.20.

Г.В. Железняковым предложена формула для расчета коэффициента « $c$ » с учетом последних исследований в различных областях науки [3]:

$$c = \frac{1}{2} \times \left[ \frac{1}{n} - \frac{\sqrt{g}}{0.13} \times (1 - lgR) \right] \\ + \sqrt{\frac{1}{4} \times \left[ \frac{1}{n} - \frac{\sqrt{g}}{0.13} \times (1 - lgR) \right]^2 + \frac{\sqrt{g}}{0.13} \times \left( \frac{1}{n} + \sqrt{g} \times lgR \right)} \quad (2.23)$$

Достоинство формулы (2.23) состоит в том, что она может применяться при любых значениях  $n$  и  $R$ . Формула справедлива и для речных потоков, при этом можно применять  $R \approx h_{\text{ср}}$ .

Таким образом для расчета коэффициента Шези А.М. Латышенкова, Н.Б. Барышников, М.С. Знаменская рекомендуют пользоваться формулами Н.Н. Павловского (2.13 и 2.14) или (2.22 и 2.23).

Однако в эти формулы входит величина гидравлической шероховатости « $n$ », которая является условной и неопределенной. Для ее определения составлены таблицы, по которым по описанным характеристикам естественных русел, подбирается величина « $n$ » [6].

Первым является шкала Гангилье-Куттера. В дальнейшем были разработаны таблицы « $n$ » Срибновым – для равнинных и горных рек, в которой коэффициент « $n$ » является функцией шероховатости русла и уклонов; Б.В. Поляковым – для равнинных рек; А.А. Васильевой – для определения значений « $n$ » для пойм больших рек; П.В. Покровским – для селевых паводков; И.И. Агроскиным – для каналов.

В этих таблицах коэффициент шероховатости « $n$ » характеризуется зависимостью от характеристик водотока, в которую включается описание грунтов русла, наличие растительности, омутов, отмелей, извилистости русла и другие.

Л.Л. Лиштваном была составлена таблица значений « $n$ » как функция характеристики водотока и глубины.

Сопротивление не столько зависит от размеров частиц, слагающих русло, сколько от размеров и формы русла и донных гряд, режима потока, местных сопротивлений взаимодействия руслового и пойменного потоков и других факторов. Особенно велико сопротивление донных гряд [6].

Перечисленные выше таблицы для определения «n» не учитывают всего многообразия факторов, влияющих на сопротивление потока русла и поймы, диапазон колебаний «n» при одинаковых условиях велик. Все это затрудняет правильный выбор значения шероховатости для расчетов, как на пойме, так и в русле. Расчеты затрудняются и тем, что авторами таблиц не указано, какими формулами они пользовались при составлении их [6].

Таким образом, вопрос, связанный с определением расчетного значения «n» представляется нерешенным. Также нерешен вопрос и о том, от чего зависит его величина. Н.Б. Барышников предлагает представить зависимость «n» от следующих факторов:

$$n = f(k, r, l, m, t \text{ и др.}) \quad (2.24)$$

- где
- k – крупность донных отложений, м;
  - r – коэффициент, учитывающий форму сечения;
  - l – параметр, учитывающий влияние донных гряд;
  - m – учет взаимодействия руслового и пойменного потоков;
  - t – учет режима перемещения потока.

Особенно сложным является определение значений «n» в потоках с поймами. Это обуславливается тем, что помимо характеристик русла надо учитывать характер перемещения донных наносов (грядная или безгрядная фаза) затраты энергии на транспорт взвешенных наносов, на косоструйность в створе измерения, на взаимодействие руслового и пойменного потоков и ряд других факторов. Особенно велики эти затраты на косоструйность течения при заполнении и опорожнении пойм в период работы прорыв, а также при взаимодействии руслового и пойменного потоков при пересечении их осей под большими углами ( $\alpha \geq 90^\circ$ ) [6].

Н.Б. Барышников преобразует зависимость (2.24) и получает:

$$n = n_0 + \sum_{i=1}^{i=m} \Delta n_i \quad (2.25)$$

где  $n_0$  – минимальное значение « $n$ » для каналов в хороших условиях

$$\sum_{i=1}^{i=m} \Delta n_i = \Delta n_1 + \Delta n_2 + \Delta n_3 + \dots + \Delta n_m \quad (2.26)$$

где  $\Delta n_1$  – учитывает увеличение сопротивлений естественных русел по сравнению с каналами ( в хороших условиях );

$\Delta n_2$  – учитывает неравномерность движения;

$\Delta n_3$  – неустановившийся режим;

$\Delta n_4$  – растительность ( на берегах и в русле );

$\Delta n_5$  – искривление руслового потока;

$\Delta n_6$  – взаимодействие руслового и пойменного потока;

$\Delta n_7$  – наличие водоворотных зон.

Этот список значений  $\Delta n_7$  можно продолжить, учитывая различные особенности сопротивления движения потока в естественных условиях.

Наибольшая трудность состоит в невозможности непосредственных измерений  $\Delta n$  в натуральных условиях. Однако использование опубликованных данных в частности табличных значений параметра « $n$ » позволяет ориентировочно подсчитать некоторые значения  $\Delta n_i$ .

На кафедре ЛГМИ [5] был выполнен анализ значений « $n$ » приведенных в таблицах М.Ф. Срибнова, Дж. Бредли и В.Г. Чоу, а также данные

вычислений параметра «n» по 600 измеренным расходам воды (около 200 из них на пойме) на 27 реках, расположенных в различных районах территории Советского союза.

Анализ данных [2, табл.20] позволяет сделать вывод о том, что ряд рекомендаций дает довольно близкое соотношение параметров  $n_0$  и  $n_p$  по данным всех трех авторов. Однако наблюдаются и существенные расхождения, вызванные как неточностью формулировок, так и некоторым отличием результатов, полученных при обработке исходной информации. Эти различия возрастают при больших значениях «n», а значения  $\Delta n$  могут отличаться в 1.5 – 2.5 раза.

Вторым недостатком является большой диапазон значений  $n(\Delta n)$ , приведенных в таблицах М.Ф. Срибного, Дж.Бредли и В.Т. Чоу, что может привести к ошибкам в расчетах расходов воды до 170%.

На кафедре ЛГМИ были обобщены [2] данные наблюдений и расчетов значений параметров «n» (по формулам Павловского и Маннинга) и построены кривые их зависимостей от уровней воды как для русловой, так и для пойменных частей потока (рисунок 2.1-2.3).

Автор подразделяет кривые  $\frac{n_p}{n_{p.б}} = f(H')$  (рисунок 2.1) на 3 группы. К первой относятся у которых наблюдаются увеличение  $\frac{n_p}{n_{p.б}}$  при слиянии руслового и пойменного потоков, продолжающиеся с ростом уровней, а затем снова уменьшающиеся. Ко второй – кривые, которые с ростом уровней либо отклоняются влево ( $< 1.0$ ) от значения 1.0 либо их значение не изменяются (равны 1.0). И наконец третья группа – кривые  $\frac{n_p}{n_{p.б}} = f(H')$  с ростом уровней отклоняются вправо от значения кривые  $\frac{n_p}{n_{p.б}}=1.0$  и несмотря на значительные глубины заложения пойм, перегиба кривых не наблюдается (рисунок 2.1 кривая на графике 24).

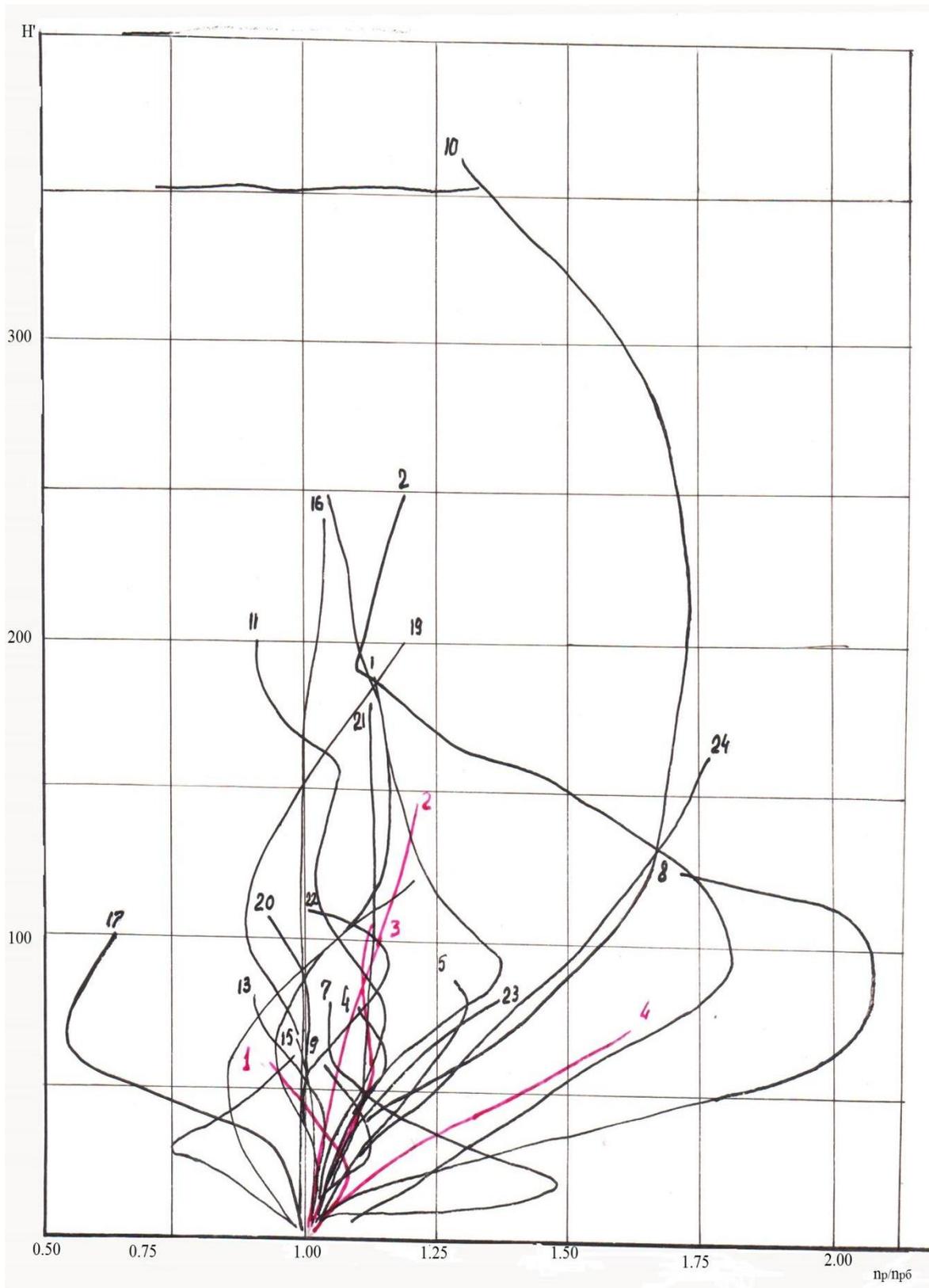
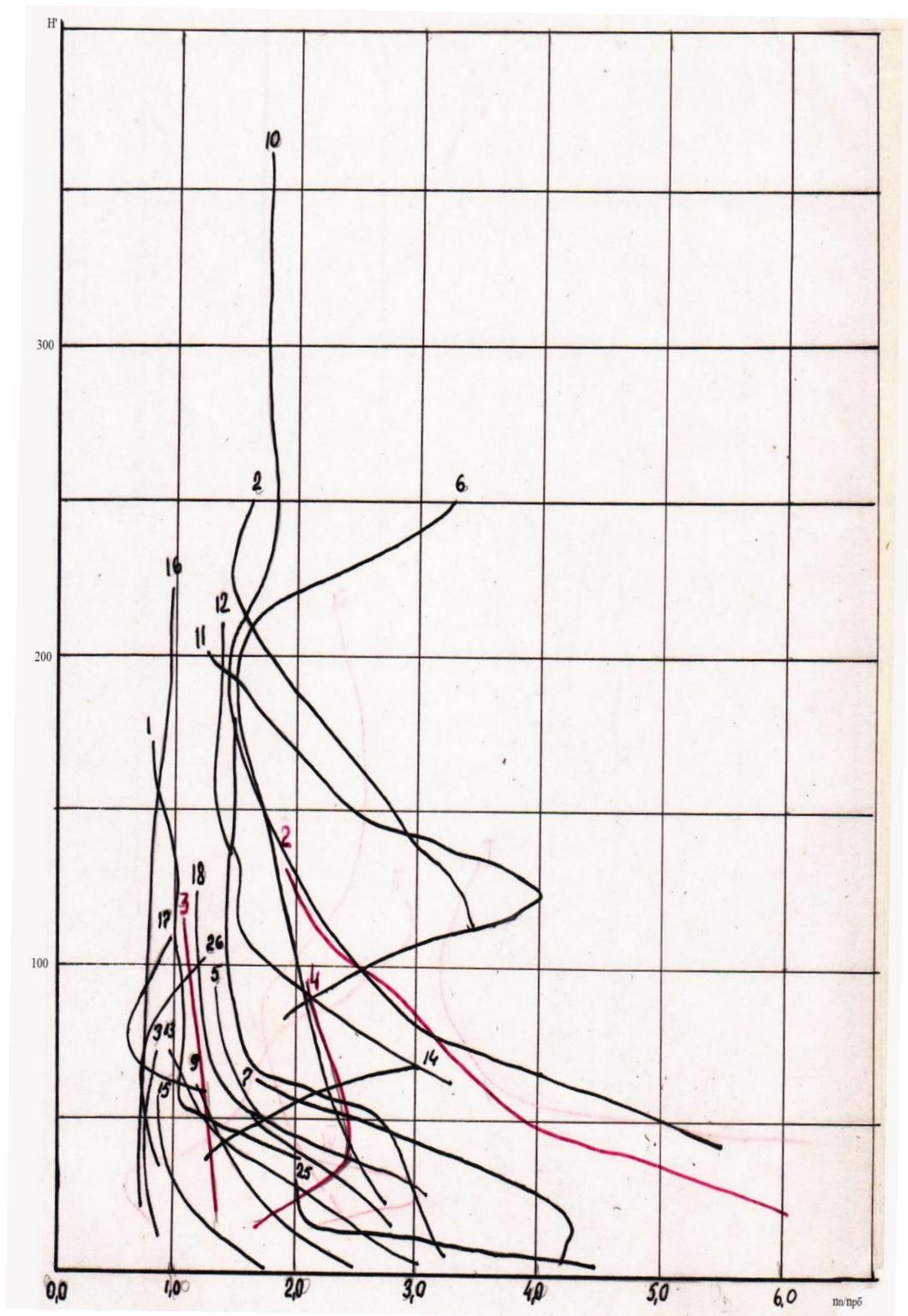


Рисунок 2.1 – Кривая зависимости  $\frac{n_p}{n_{pб}} = f(H')$



Рисунка 2.2 – Кривая зависимости  $\frac{n_n}{n_{пб}} = f(H')$

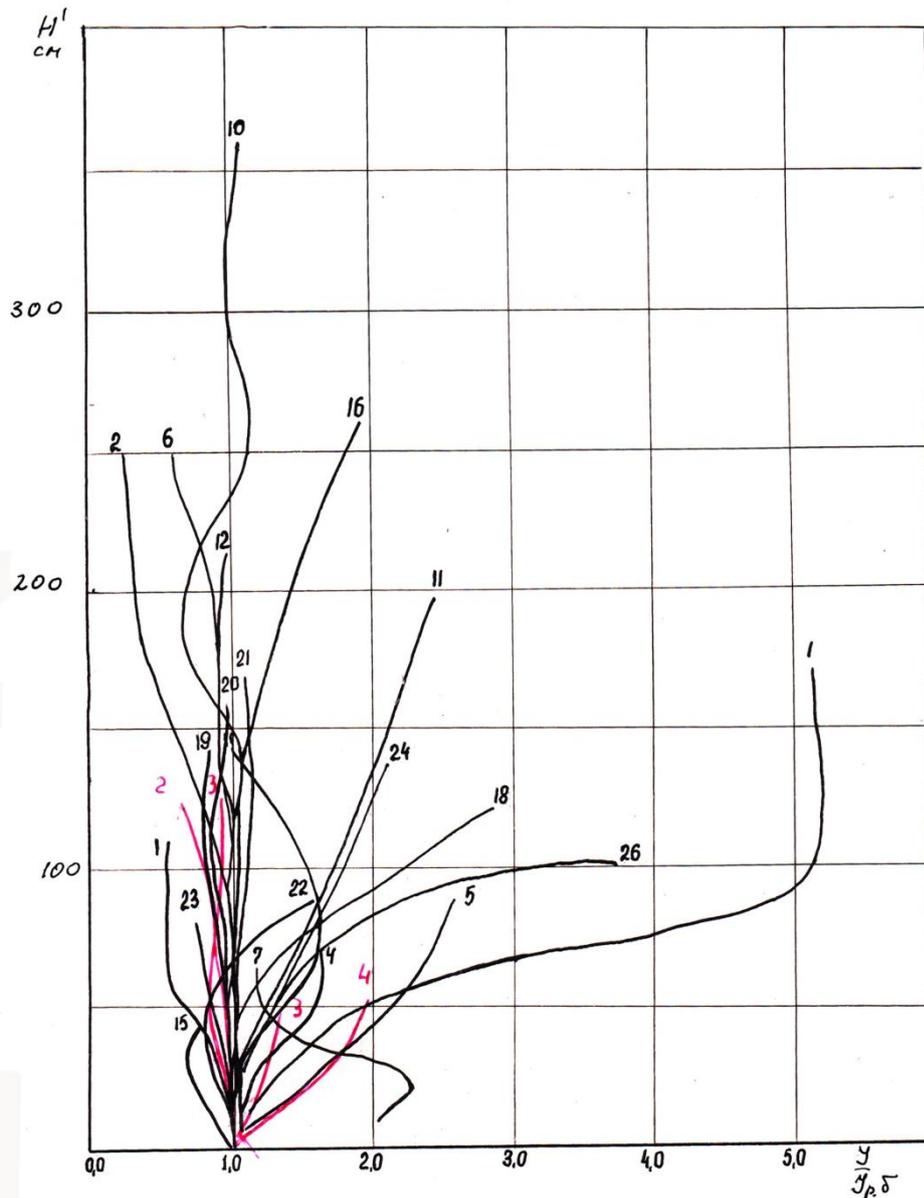


Рисунок 2.3 – Кривая зависимости  $\frac{I}{I_{p.б}}$

Каждая кривая в какой-то мере индивидуальна, ее вид зависит от шероховатости, морфометрии русла и поймы и изменчивости их характеристик по длине потока[6].

Вторым фактором, зависящим от первого, является характер изменения уклонов свободной поверхности по мере изменения уровней, особенно при выходе воды на пойму. Преобразуя выражение 2.26, получим 2.27:

$$n_p = n_{p.б} \times \left(1 + \frac{\Delta n_{p.б}}{n_{p.б}}\right) \quad (2.27)$$

Таким образом, задача определения  $n_p$  для русловой части потока сводится к расчету  $n_{p.б}$  и коэффициента учитывающего влияние потока поймы на русловую и сопротивление берегов [7].

По кривым  $\frac{n_p}{n_{p.б}} = f(H')$  (рисунок 2.1) Н.Б. Барышников [2] определил максимальные значения  $\frac{\Delta n_{p.б}}{n_{p.б}}$ .

Для первого типа кривых они соответствуют значению  $\frac{n_p}{n_{p.б}}$  в точках их перегиба, а для остальных – максимальным отклонением от единицы.

Анализ вида кривых, приведенных на рисунке 2.1 и данных, приведенных Н.Б. Барышниковым [2, табл.21] показывает, что изменение значений  $\frac{n_p}{n_{p.б}}$ , главным образом определяется сопротивлением, в том числе, за счет взаимодействия потоков и морфометрии русел и пойм, а также характером изменения ширин пойм и долины по длине участка, расположенного ниже гидроствора [5].

Действительно кривые  $\frac{n_p}{n_{p.б}} = f(H')$  первого и третьего типов (последний можно считать частным случаем первого) соответствуют, как правило, расширению долины ниже створа наблюдений или постоянной ее ширины, а второму типу сужающиеся долины. При этом условия изменения ширины долины (поймы) по длине реки также определяют и характер изменения уклонов свободной поверхности с ростом уровней воды при затопленной пойме.

### 3 Анализ исходных данных и оценка полученных результатов

#### 3.1 Исходные данные и их анализ

В результате тщательного просмотра фондовых материалов по Украинскому УГМС установлено, что большинство рек, протекающих в пределах региона имеют русла с поймами. В то же время производство наблюдений и измерений на сети следует признать неудовлетворительным, что подтверждается отсутствием измерений расходов воды на большинстве объектов в период затопления пойм, в течение продолжительного периода или отсутствовали измерения уклонов свободной поверхности.

Были использованы исходные данные по двум поймам на р. Горынь (таблица 3.1). В качестве исходной информации были использованы данные об измеренных расходах, площадях, скоростях течения, уклонах и других характеристиках потока.

Таблица 3.1 – Исходные данные

Река-пункт	Год	Количество створов	Количество измерений I	Количество измерений Q		Наличие планов	Профиля	H свыше бровки, см
				Всего	Поймы			
р. Горынь-с. Деражко	19	1	32/5	35	5	+	+	401
	19		30/3	44	3			
р. Горынь-с. Оженин	19	1	25/4	32	5	+	+	220

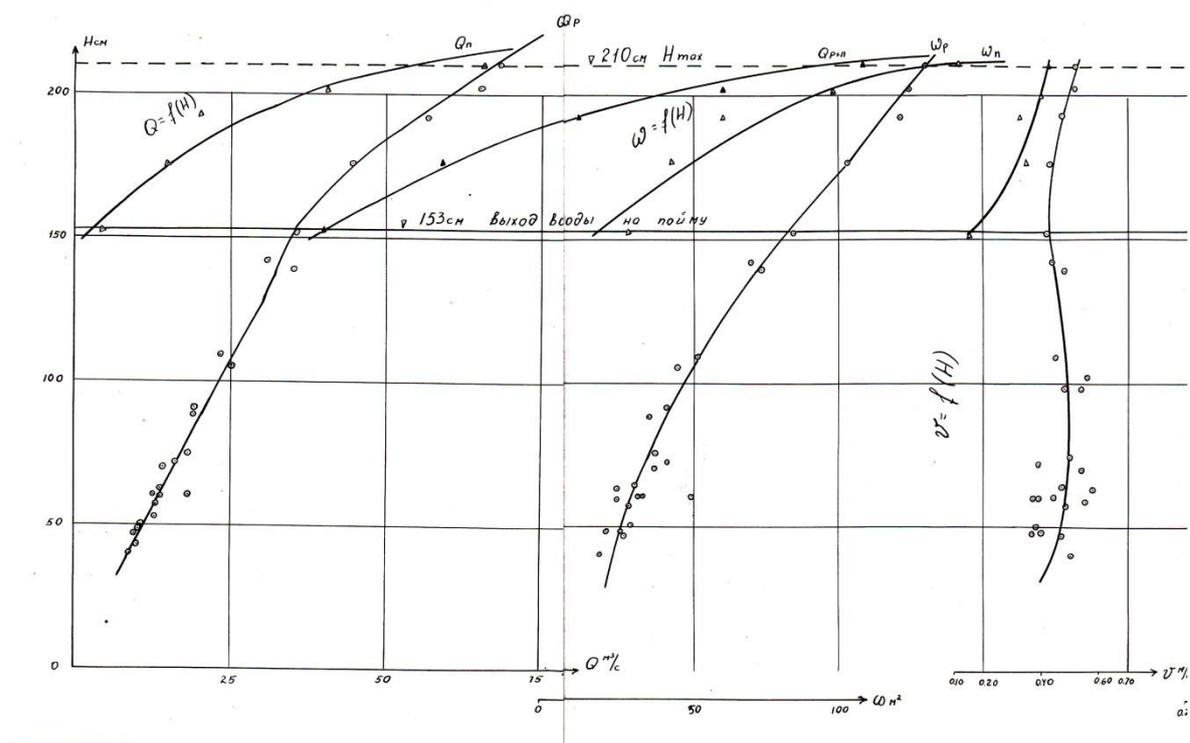
Для построения кривых  $Q = f(H)$ ;  $\omega = f(H)$ ;  $V = f(H)$ ;  $h_{cp} = f(H)$ ;  $I = f(H)$ ; были использованы данные о 32 расходах воды (таблица 3.1), при этом 5 из них при затопленной пойме. Выход воды на пойму в створе наблюдается при уровне 152 см над «0» графика.

Пойменный поток в пределах амплитуды уровней, освещенный измерениями не сливается с русловым (отметка бровки русла 220 см).

Измерения на пойме выполнены тщательно. Расстояние между скоростными вертикалями 20 м при ширине поймы около 300 м.

Расходы измерялись вертикалями. Для построения кривых зависимостей  $Q = f(H)$ ;  $\omega = f(H)$ ;  $V = f(H)$ ;  $h = f(H)$ ;  $I = f(H)$ ; сечение потока подразделялось на русловую (от 6.4 м до 110 м от П.Н) и пойменную составляющую (от 383 м до 669 м).

Пойма правосторонняя, широкая  $\frac{B_n}{B_p} = 10.9$ , поросшая травой. Как видно из рисунка 3.1, при выходе воды на пойму ( $H = 153$  см) отмечается небольшой перегиб кривых для русловой части потока. От  $H = 140$  см до  $H = 153$  см наблюдается задержка роста скоростей и даже небольшое уменьшение от 0.45 до 0.42 м/с, а, следовательно, и расхода воды. Затем (от  $H = 153$  см до  $H = 210$  см) происходит резкое увеличение скоростей и расходов воды, обусловленные растеканием руслового потока по пойме.



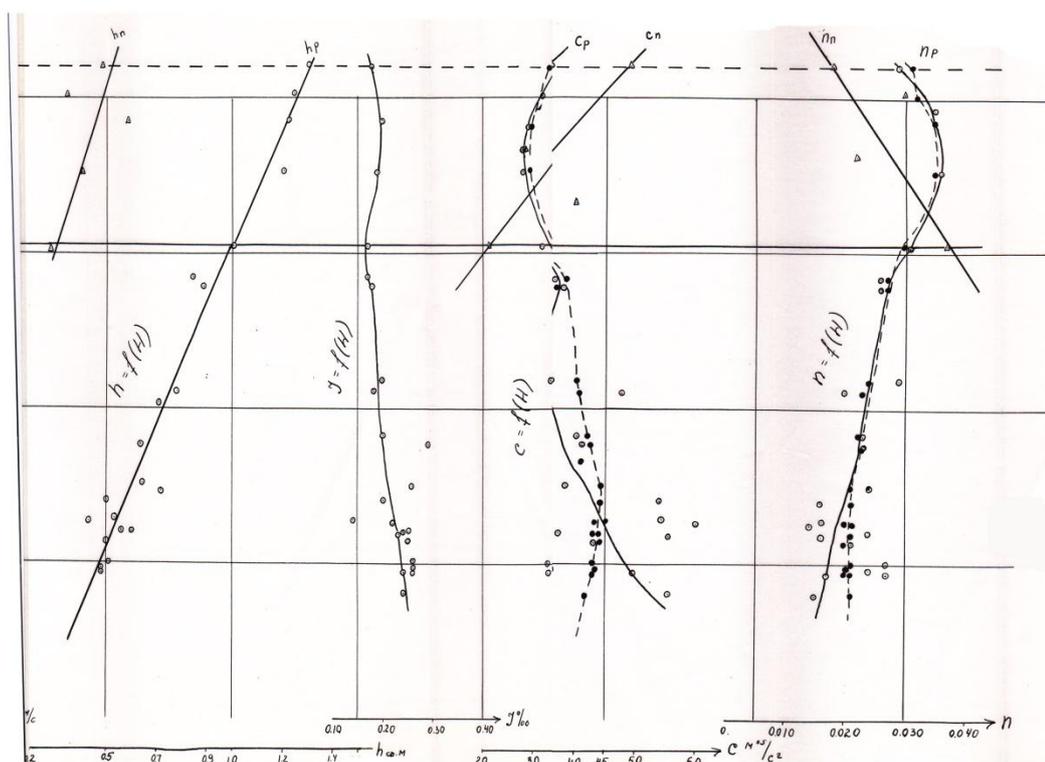


Рисунок 3.1 – График кривых зависимостей  $Q = f(H)$ ,  $\omega = f(H)$ ,  $V = f(H)$ ,  $h = f(H)$ ,  $I = f(H)$ ,  $c = f(H)$ ,  $n = f(H)$

Весьма сложен характер изменения уклонов: с увеличением уровня воды уклоны уменьшаются (начиная от  $H = 143$  см до  $H = 170$  см). Расширения поймы ниже расчетного створа обуславливает небольшое увеличение уклонов свободной поверхности при увеличении уровней воды после выхода потока на пойму.

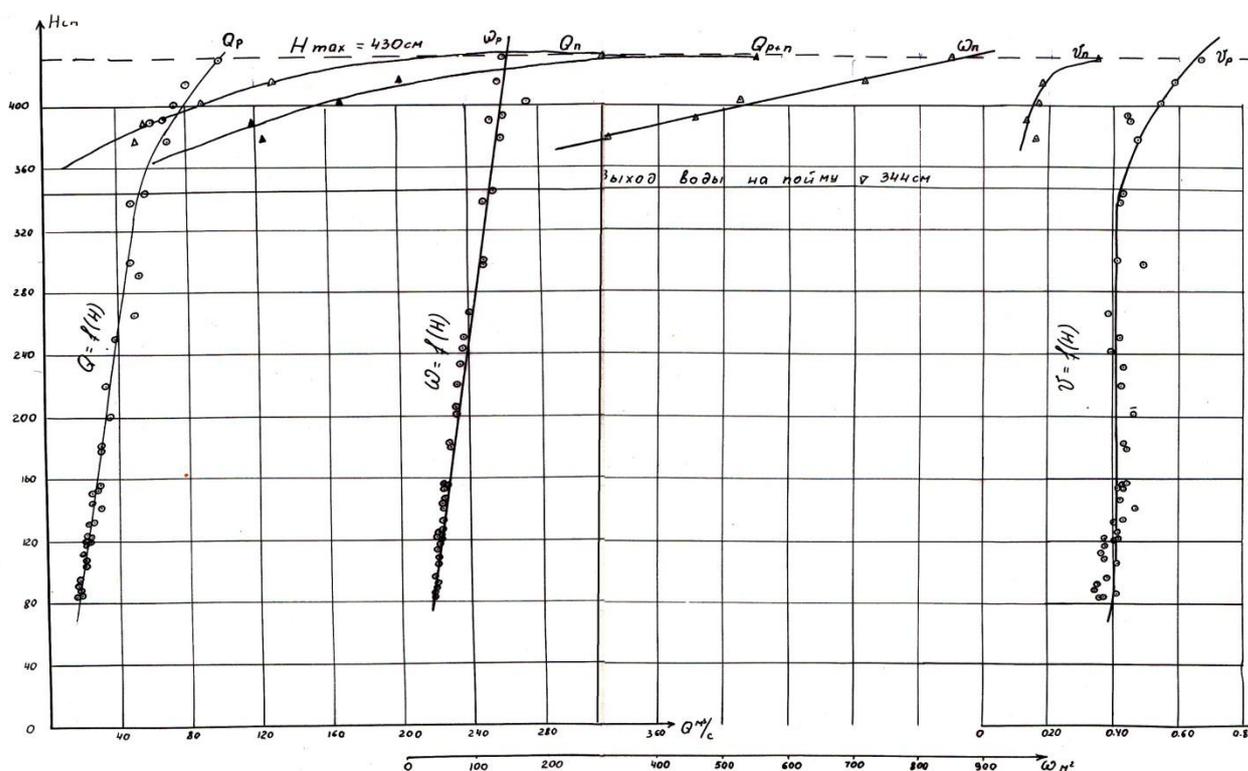
Значение коэффициента Шези с ростом уровня (от  $H = 60$  см до  $H = 185$  см) уменьшается (от 44 до  $28 \text{ м}^{0.5}/\text{с}^2$ ) затем при увеличении уровня до  $H = 210$  см возрастает до  $36 \text{ м}^{0.5}/\text{с}^2$ .

Для русловой части потока кривая  $n = f(H)$  имеет наклон в сторону увеличения значений коэффициента  $n$ , но после выхода воды на пойму ( $H = 153$  см) наблюдается перегиб кривой. Сначала наблюдается резкое увеличение коэффициента шероховатости, а при  $H = 180$  см уменьшение его значений.

Для пойменной части потока коэффициент с «с» увеличивается с увеличением уровня, а «п» – уменьшается. Такое поведение кривых  $s = f(H)$  и  $p = f(H)$  обуславливается взаимодействием руслового потока.

В качестве исходной информации были использованы данные об измеренных расходах воды, площадях сечения, скоростях течения, уклонах свободной поверхности и других характеристиках потока за 1970 и 1971 гг. Как видно из таблицы 3.1, были получены сведения о 35 расходах воды, 5 из них при затопленной пойме в 1970 г.; о 44 расходах воды, 3 из них при выходе потока на пойму, который в створе измерения наблюдается при  $H = 400$  см над «0» графика.

Измерения проводились вертушкой ГР-21, основным или двухточечным способами. Для построения кривых зависимостей  $Q = f(H)$ ;  $\omega = f(H)$ ;  $V = f(H)$ ;  $h = f(H)$  также как и у с. Оженин сечение потока подразделялось на русловую и пойменную части [7].



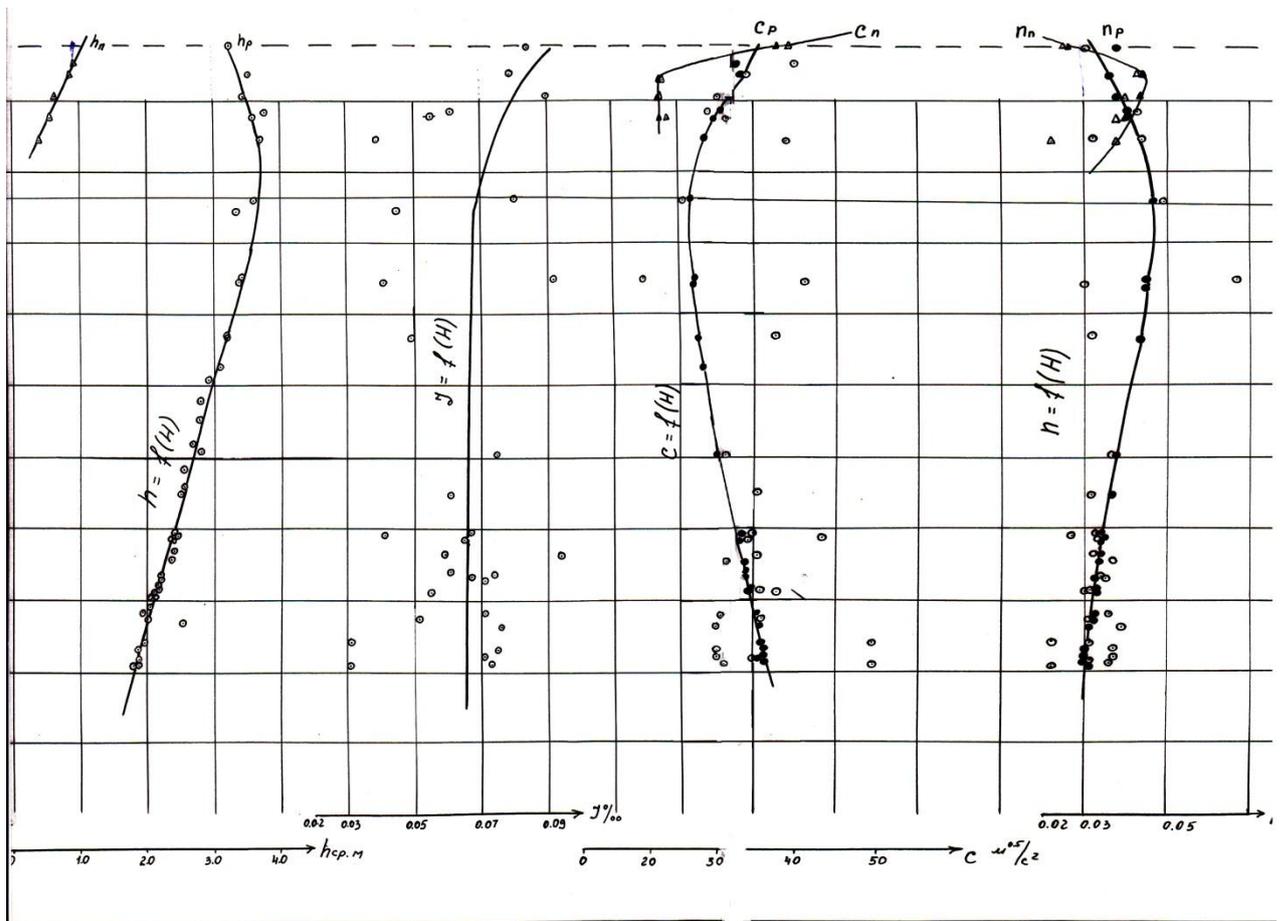


Рисунок 3.2 – График кривых зависимостей  $Q = f(H)$ ,  $\omega = f(H)$ ,  $V = f(H)$ ,  $h = f(H)$ ,  $I = f(H)$ ,  $c = f(H)$ ,  $n = f(H)$

На рисунках 3.1 и 3.2 видно, что при уровнях выхода воды на пойму и более высоких отмечается перегиб кривых  $Q_p = f(H)$  и  $V = f(H)$  для русловой части потока; резкое увеличение скоростей и расходов воды, обусловленные растеканием руслового потока по пойме.

Расширения поймы ниже расчетного створа обуславливает увеличение, и весьма значительное, уклонов свободной поверхности при увеличении уровней воды после выхода потока на пойму. Следует отметить, что точность измерений  $I$  невелика (рисунок 3.4). Разброс точек, соответствующих натурным данным в поле координат  $I = f(H)$  велик. Это явление – следствие рутинных методов измерений, отсутствия современной аппаратуры и дефектами методики.

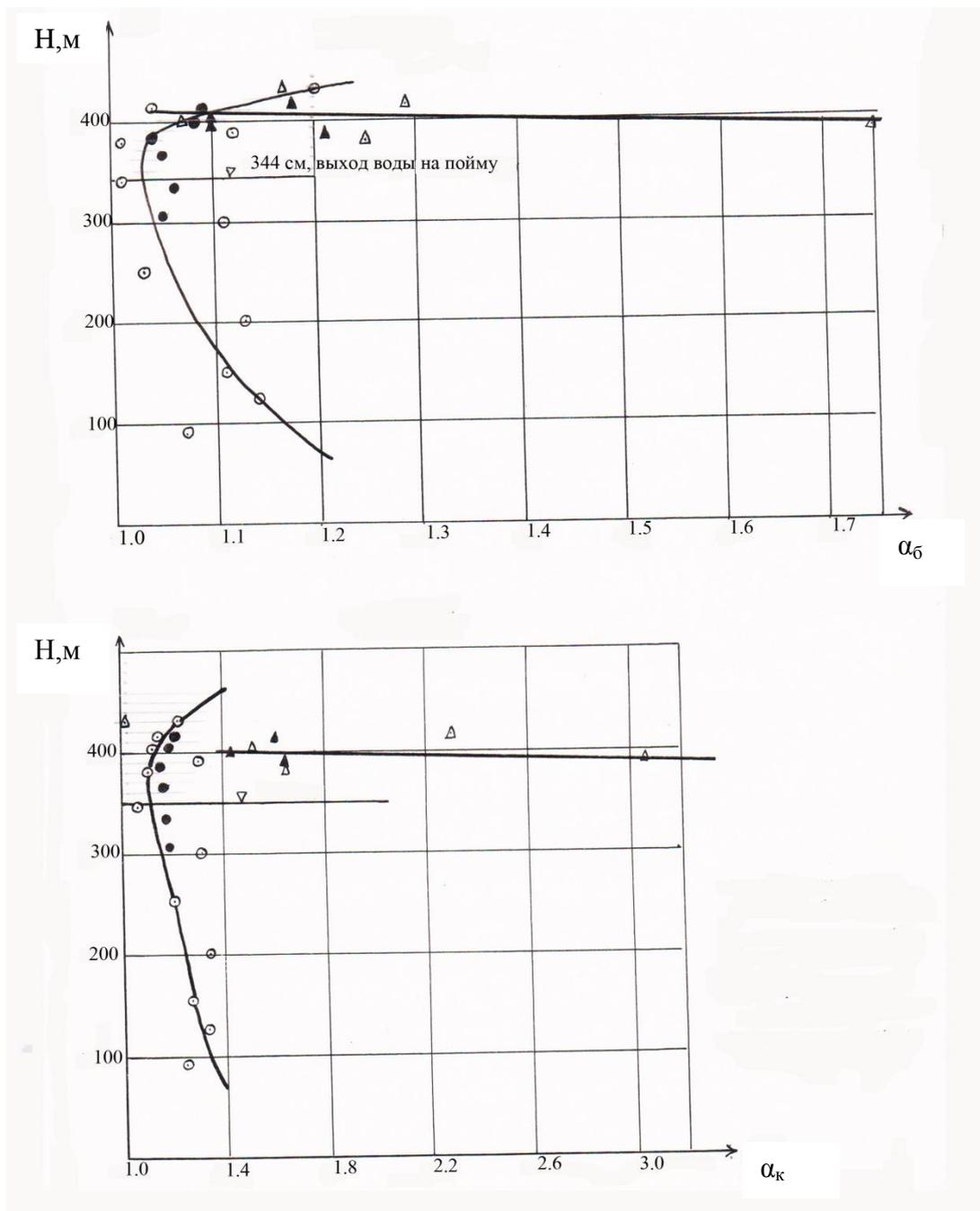


Рисунок 3.4 – Графики связи  $\alpha_b = f(H)$  и  $\alpha_k = f(H)$

После выхода воды на пойму значение параметра «с» (в 1970 г.) существенно возрастают от 26 ( $H = 344$  см) до  $35 \text{ м}^{0.5}/\text{с}^2$  ( $H = 430$  см), а в 1971 г. это увеличение незначительно (от 29 до  $30 \text{ м}^{0.5}/\text{с}^2$ ). В тоже время низкая точность исходных данных об  $\alpha$  за 1971 г. обуславливает значительный разброс и в поле координат  $s = f(H)$ .

Характер изменения коэффициента шероховатости диаметрально противоположен изменения «с» при увеличении уровней воды (от  $H = 344$  см,

соответствующих выходу воды на пойму, до  $H = 430$  см) значение « $n$ » в 1970 г. изменяется от 0.047 до 0.034, а в 1971 г. соответственно от 0.040 до 0.037.

По плану участка поста установлено, что ниже расчетного створа геометрически оси русла и поймы расходятся. Это соответствует 2 типу взаимодействия потоков. Угол расхождения  $\alpha = 24^\circ$ .

Анализ изменения  $Q$ ,  $V$ ,  $I$ ,  $s$ ,  $n$  при затопленной пойме подтверждает данный вывод.

Описание поста р. Горынь – с. Деражно.

Пост расположен на юго-востоке села, ниже устья левобережного притока р. Деражка в 0.4 км.

Местность, прилегающая к долине реки, низменно-равнинная, залесенная. Долина реки пойменная, извилистая, шириной до 2.0 км. Склоны долины слаборассечённые балками и оврагами; правый высотой 5-6 км, крутой, выпуклый, супесчаный, используется под сельскохозяйственные угодья, левый – высотой 10-15 м, крутой, местами обрывистый, выпуклый залесенный, частично распахан. Пойма преимущественно двухсторонняя, шириной до 1.5 км, слабопересеченная, луговая, открытая, сухая, супесчаная, начинает затопляться при высоте уровня около 300-320 см [8].

Пойму реки в 100 м выше водпоста пересекает насыпь шоссейной дороги, размытой в местах бывших проток.

В 600 м от реки образовалось озеро, с глубинами до 6 м. Русло умеренно извилистое, неразветвленное, зарастающее у берегов. Правый берег высотой 4-5 м, очень крутой, левый высотой до 3 м., крутой, выпуклый. Оба берега задернованы, супесчаные. Дно реки слабо деформирующееся, илисто-песчаное.

На участке поста вследствие выхода грунтовых вод наблюдаются полыньи; заторы льда отмечаются в 0.5 км выше и в 0.4 км ниже водпоста.

На уреченный режим реки в низкую межень оказывает некоторое влияние работа плотин мельниц, расположенных на р. Стубле в 6.5 км и на р. Путиловке в 12 км выше водпоста. Водпостсвайный, находится на левом берегу [8].

Высота нуля графика 162 м БС. Уклон воды определяется по основному и уклонному водпосту, свайного типа, расположенному в 510 м ниже.

Гидроствор №1 совмещен с водпостом и оборудован установкой ГР-70. На пойме расходы измеряются в 100 м выше водпоста.

В бассейне выше поста, расположено 14 сельских межколхозных и государственных ГЭС с водохранилищами и 251 пруд. Пруды используются для рыбозаведения и для работы мельниц. Суммарная площадь прудов составляет около 4746 га, суммарный объем 2 240 млн м<sup>3</sup>.

Зарегулированность годового и максимального стока половодья 4-7 %. Забор воды на промышленное и муниципальное водоснабжение в год составляет 43 992 тыс. м<sup>3</sup>, сброс воды в реку 44 624 тыс. м<sup>3</sup> [8].

Описание поста р. Горынь – с. Оженин.

Пост расположен в 4.5 км на юго-востоке от с. Оженин, на восточной окраине с. Броды.

Местность, прилегающая к долине реки, степная, слабоволнистая равнина. Долина реки пойменная, прямая, шириной до 2.0 км. Склоны высотой 15-20 м, умеренно крутые, волнистые, слаборассеченные, используются под сельскохозяйственные угодья. На участке поста левый склон имеет хорошо выраженную террасу, высота ее 3-3.5 м, ширина – 200 м. Терраса ровная, используется под сельскохозяйственные угодья. Пойма преимущественно двухсторонняя шириной 1.5 км, ровная, луговая, сухая, местами заболоченная, песчаная и супесчаная, используется под сенокосы. Пойма затопляется при высоте уровня воды около 160 см [8].

Русло извилистое, неразветвленное, деформирующееся, слабо зарастающее у берегов. Берега высотой 1-1.5 м, пологие, прямые. В 150-200 м выше и ниже водпоста берега высотой 2-3.5 м, крутые, местами покрытые травой, супесчаные. Дно ровное, сильно деформирующееся, песчаное.

В 20 м выше основного водпоста наблюдается движущийся пережат, определяющий направление течения на гидростворе.

Заторы льда наблюдаются в 400 м выше и 300 м ниже водпоста. На уровенный режим у поста в межень оказывает влияние работа вышерасположенной (в 25 км) Нетишинской ГЭС.

Водпостсвайный, находится на левом берегу. Высота нуля графика 185.07 м Б.С. Уклон воды определяется по основному водпосту и уклонному водпосту свайного типа, расположенному в 600 м выше [8].

Гидроствор №1 (меженный) совмещен с водпостом, гидроствор №2 (паводочный) расположен в 400 м выше водпоста, оборудован установкой ГР-70.

Температура воды для определения химического состава берется в створе основного водпоста на 0.5 ширины реки. Температура воды измеряется в створе основного водпоста у берега, толщина льда – в створе основного водпоста на середине реки.

В бассейне реки до створа поста имеется 100 прудов, большинство которых расположено в верхней части водосбора на притоках. Суммарная площадь прудов составляет около 2986 га, суммарный объем – 28.9 млн. м<sup>3</sup>.

Пруды используются для рыбозаведения и удовлетворения местных хозяйственных нужд. Забор воды на промышленное и коммунальное водоснабжение в год составляет 58 тыс. м<sup>3</sup>, сброс воды в реку 164 тыс. м<sup>3</sup> [8].

### 3.2 Зависимости $c = f(H)$ и $n = f(H)$ и их анализ

Коэффициент Шези рассчитывался по формуле 3.1.

$$c = \frac{V}{\sqrt{In}} \quad (3.1)$$

В связи с недостаточно высокой точностью информации была выполнена оценка точности расчетов параметров «с» и «n» по фактическим данным. С этой целью выполнены сравнения расчетных величин с их осредненными значениями, полученными по кривым  $c = f(H)$  и  $n = f(H)$  при тех же уровнях (таблица 3.2).

Анализ табличных данных позволяет сделать вывод, что величина средней ошибки для с. Деражно  $c = 11\%$ ;  $n = 12.7\%$ ;  $c_{\max} = 40.2\%$ ;  $n_{\max} = 52.2\%$ , для с. Оженин соответственно  $c = 14.3\%$ ;  $n = 15.2\%$ ;  $c_{\max} = 29.7\%$ ;  $n_{\max} = 72.2\%$ .

На пойме для с. Деражно  $c_{\text{ср}} = 11.8\%$ ;  $n_{\text{ср}} = 16.9\%$ ;  $c_{\max} = 44\%$ ;  $n_{\max} = 72.2\%$ ; для с. Оженин  $c_{\text{ср}} = 12.3\%$ ;  $n_{\text{ср}} = 13.3\%$ ;  $c_{\max} = 30.7\%$ ;  $n_{\max} = 30.7\%$ .

В связи с изложенными выше проблемами выбора значений «n» по таблицам М. Ф. Срибного, Дж. Бредли, В. Т. Чоу, Л.Л. Лиштвана.

Значение «n» рассчитывалось по формуле 3.2 отдельно для русла и поймы (таблица 3.2).

$$n = h^{1/6}/c \quad (3.2)$$

Для русловой части потока значения гидравлических сопротивлений «n» рассчитывалось отдельно при затопленной и незатопленной пойме.

Рассчитанные значения «n» взяты за основу сравнения. Для удобства анализа и сравнения табличных и расчетных значений «n» вычислялись значения относительной ошибки  $(\frac{n_{\text{табл}}-n_{\text{расч}}}{n_{\text{расч}}}) \times 100 \%$ .

Сравнение расчетных значений параметров «n» с табличными показывает, что для русловой части потока они близки между собой, исключая «n» по таблице Срибного, где максимальные значения  $\frac{\Delta n}{n_{\text{расч}}} \times 100 \%$  достигают 81.8 %. Наилучшие результаты получаем для русла по таблицам В.П. Чоу и Дж. Бредли. Для поймы результаты сравнений значительно хуже, здесь отмечаются существенные отклонения, обусловленные недоучетом кинематического эффекта и влиянием глубин на сопротивление поймы, а также, по-видимому, недостаточностью информации. Диапазон изменений отклонений от 2.9 до 81.5 %.

Следует отметить, что при оценке значений коэффициентов шероховатости « $n_{\text{расч}}$ » и « $n_{\text{табл}}$ » встречается ряд трудностей, основная из которых заключается в отсутствии в таблицах полного описания участка. Основной характеристикой большинства таблиц, как правило, является растительность. В то же время известно, что характер растительности, а значит и сопротивление весьма значительно изменяются в зависимости от погодных условий и других причин, как в течение года, так и в различные годы. В таблицах также недостаточно учитываются пересеченность рельефа, распаханность, глубина затопления поймы и другие характеристики.

С этой точки зрения лучше всего подходят таблицы ДжюБредли и В.П. Чоу, которые отличаются наибольшей детализацией и применимы к малым и средним рекам. Таблицы других авторов менее детализированы и более применимы для крупных и средних рек.

Выполненный расчет и анализ позволяют сделать вывод о тесной взаимосвязи между гидравликой потока и его морфологией, особенно резко проявляющейся при движении транзитного потока на пойме.

Таблица 3.2 – Сравнение расчетных и табличных значений «n»

Река-пункт	Характеристика русла и поймы	Стадия затопления	$n_{расч}$	$n$ по Чоу	$n$ по Срибному	$n$ по Лиштвану	$n$ по Бредли	
р.Горынь-с.Деражно	Русло умеренно извилистое, неразветвленное, зарастающее у берегов. Дно слабodeформирующая, илисто-песчаное	русло	незатопленная пойма	0.036	0.035	0.050	0.036	0.035
			затопленная пойма	0.033				
			незатопленная пойма	0.037				
			затопленная пойма	0.039				
р.Горынь-с.Оженин	Русло извилистое, неразветвленное, деформирующееся, слабозарастающее у берегов. Дно ровное сильно деформирующееся, песчаное	русло	незатопленная пойма	0.022	0.035	0.040	0.036	0.035
			затопленная пойма	0.033				
р.Горынь-с.Деражно	Пойма преимущественно двухсторонняя, шириной до 1.5 км. Слабопересеченная, луговая, открытая, сухая, супесчаная	пойма		0.034	0.035	0.050	0.025	0.035
				0.027				
р.Горынь-с.Оженин	Пойма преимущественно двухсторонняя, ровная, луговая, сухая, местами заболоченная, песчаная и супесчаная	пойма	0.027	0.035	0.040	0.025	0.035	

Продолжение таблицы 3.2

Река-пункт	Характеристика русла и поймы	Стадия затопления		$\frac{\Delta n}{n_{расч}} \times 100 \%$				Год
				Чоу	Срибнов	Лиштман	Бредли	
р.Горынь-с.Деражно	Русло умеренно извилистое, неразветвленное, зарастающее у берегов. Дно слабдеформирующееся, илисто-песчаное	русло	незагопленая пойма	2.8	38.8	0	2.8	1970
				6.1	51.5	8.3	6.1	1971
		русло	затоппеная пойма	5.4	35.1	2.7	5.4	1970
				10.2	28.2	7.7	10.2	1971
р.Горынь-с.Оженин	Русло извилистое, неразветвленное, деформирующееся, слабозарастающее у берегов. Дно ровное сильно деформирующееся, песчаное	русло	незагопленая пойма	59.1	81.8	63.6	59.1	1971
				6.1	21.2	8.3	6.1	
р.Горынь-с.Деражно	Пойма преимущественно двухсторонняя, шириной до 1.5 км. Слабопересеченная, луговая, открытая, сухая, супесчаная	пойма		2.9	47.1	40.0	2.9	1970
				29.6	81.5	7.4	29.6	1971
р.Горынь-с.Оженин	Пойма преимущественно двухсторонняя, ровная, луговая, сухая, местами заболоченная, песчаная и супесчаная	пойма		29.6	48.1	7.4	29.6	1971

### 3.3 Расчет коэффициентов Буссинеска и Кориолиса и анализ зависимостей $\alpha_B = f(H)$ , $\alpha_k = f(H)$

В уравнении Сенвенана используются значения осредненных скоростей, а учет и изменение скоростей по сечению потока осуществляется с помощью коэффициентов Буссинеска и Кориолиса.

Если при решении какой-либо задачи используется теорема количества движения, то учет неравномерности распределения скоростей осуществляется с помощью коэффициентов Буссинеска и Кориолиса, если применяется теорема кинетической энергии.

Безразмерная величина  $\alpha_B$  равная отношению количества движения массы жидкости, протекающей в единицу времени через данное живое сечение, к количеству движения жидкости, вычисленному в предположении, что скорости во всех точках живого сечения равны средней скорости потока, называется коэффициентом Буссинеска или коррективом количества движения [7].

$$\alpha_B = \frac{\text{КД} (m)}{[\text{КД} (m)]_{\text{ср}}} = \frac{\int_{\omega} U^2 \times d\omega}{V^2 \times \omega} \quad (3.1)$$

Безразмерная величина  $\alpha_k$ , равная отношению кинетической энергии массы жидкости, протекающей в единицу времени через данное живое сечение, к кинетической энергии массы жидкости, вычисленной в предположении, что скорости во всех точках живого сечения равны средней скорости потока, называется коэффициентом Кориолиса или коррективом кинетической энергии.

$$\alpha_k = \frac{\text{КЭ} (m)}{[\text{КЭ} (m)]_{\text{ср}}} = \frac{\int_{\omega} U^2 \times d\omega}{V^3 \times \omega} \quad (3.2)$$

А.М. Патрашев и Д.И. Кумин вводят понятие об обобщенных коррективах количества движения и кинетической энергии, учитывающих высокочастотные пульсации и неравномерность распределения скоростей течения по живому сечению потока. Разделяя кинетическую энергию потока

на две части, а именно на энергию осредненного движения, равную  $\alpha_{ks} \frac{\bar{v}^2}{2 \times g}$ , и энергию пульсационного движения, равную  $\alpha_{kn} \frac{v'^2}{2 \times g}$ , получим формулу 3.3 [7].

$$\bar{\alpha}_k = \frac{v^2}{2 \times g} = \alpha_{ks} \frac{\bar{v}^2}{2 \times g} + \alpha_{kn} \frac{v'^2}{2 \times g}, \quad (3.3)$$

где  $\alpha_{ks}$  – коэффициент Кориолиса, учитывающий неравномерность распределения средних скоростей по живому сечению

$\alpha_{kn}$  – коэффициент Кориолиса, учитывающий пульсацию скоростей

Аналогично для коэффициента Буссинеска получаем формулу 3.4.

$$\bar{\alpha}_\sigma = \alpha_{\sigma s} + \alpha_{\sigma n} \quad (3.4)$$

При выводе формул 3.3 и 3.4 Патришеви и Кумин сделали допущение, близкое к действительности, что  $V' = 0$ . Это допущение будет правомерным, если будем рассматривать весь спектр пульсации, а не одни крупномасштабные, далее не ясно, почему в формуле 3.3 значение  $\bar{\alpha}_k$  подразделяется на 2 величины, фактически  $\alpha_{ks} = \alpha_{kn} = \bar{\alpha}$ .

Исследованиями И.Г. Есьмана, Кумина и Т.Г. Войнич-Сяножецкого установлено, что значения  $\alpha_{\sigma n}$  и  $\alpha_{kn}$  на участках интенсивной пульсации могут превышать  $\alpha_{\sigma s}$  и  $\alpha_{ks}$ .

В практике гидрологических и гидравлических расчетов  $\alpha_{\sigma n}$  и  $\alpha_{kn}$  обычно не учитывают, так как оперируют с осредненными скоростями.

Коррективы количества движения и кинетической энергии, определяются наличием вязкости жидкости, твердых частиц, их

неоднородность, а также турбулентным эффектом гидродинамических сопротивлений [7].

Теперь рассмотрим методы расчета. Для расчета коэффициентов Буссинеска и Кориолиса предложен ряд методов. Наиболее точным по оценке Г.В. Железнякова и Л.С. Никитиной является графический метод с использованием тахиграфических кривых [10].

Распределение местных скоростей в любом поперечном сечении реки может быть представлено в виде линий равных скоростей – изотах. Планиметрированием определяются площади между смежными изотохами  $\omega_1, \omega_2 \dots \omega_n$  и соответствующие им значения местной скорости [4].

Был предложен арифметический метод получения коэффициентов  $\alpha_b$  и  $\alpha_k$ , основанный на предпосылке, что измеренная местная скорость относится к центру тяжести области, границы которой находятся на половине расстояния до точек местных скоростей, располагающихся вокруг нее.

Недостаток методов – точность определения коррективов количества движения и кинетической энергии зависит от числа замеров местных скоростей на вертикалях. Для расчета  $\alpha_b$  и  $\alpha_k$  в каналах с прямоугольным сечением предложен метод сетки. Поперечное сечение канала делится сеткой на ячейки. В центре тяжести каждой ячейки измеряются скорости, причем предполагается, что средняя скорость потока находится в центре тяжести сетки [4]. После этого:

$$\alpha_b = \frac{\sum u^2 \times \Delta\omega}{V^2 \times \omega} \quad (3.5)$$
$$\alpha_k = \frac{\sum u^3 \times \Delta\omega}{V^3 \times \omega}$$

По сути это частный случай арифметического метода. В работе Strauss Viliam теоретически установлена связь между коррективами количества движения, кинетической энергией и коэффициентом вариации поля продольных скоростей в поперечном сечении потока, которые можно считать однородной статистической совокупностью. Исходя из второго и третьего моментов характеризующих разброс совокупности, получены формулы:

$$\begin{aligned}\alpha_6 &= C_v^2 + 1 \\ \alpha_k &= C_s \times C_v^3 + 3 \times C_v^2 + 1\end{aligned}\quad (3.6)$$

Для получения  $C_s$  и  $C_v$  необходимо вычислить интегралы:  $\int_{\omega} d\omega$ ,  $\int_{\omega} U \times d\omega$ ,  $\int_{\omega} U^2 d\omega$ ,  $\int_{\omega} U^3 d\omega$ . Для их определения предполагается разбить поперечное сечение потока на элементарные ячейки, причем точки измерения местных скоростей, являлись бы центрами тяжести ячеек [4].

Метод является достаточно точным, однако громоздкость его очевидна. Все эти методы довольно громоздки в вычислениях, либо мало приемлемы.

А.С. Образовским предложены формулы вида 3.7, дающие, по мнению автора близкие к фактическим данным значения:

$$\begin{aligned}\alpha_6 &= \frac{(1+K_2^*)^2}{2 \times K_2^* + 1}, \\ \alpha_k &= \frac{(1+K_2^*)^3}{3 \times K_2^* + 1},\end{aligned}\quad (3.7)$$

где  $K_2^* = \frac{V_{max} - V}{V}$  или  $\frac{\sqrt{g}}{\varepsilon \times C}$ , кинематический параметр,

$\varepsilon$  – параметр Кармана;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

C – коэффициент Шези

Этот кинематический параметр определяет показатель снижения в параболической формуле профиля скорости, и в соответствии с этим будет дана новая интерпретация зависимостям (3.7).

В.В. Голубев установил эмпирическую формулу для определения коэффициентов  $\alpha_6$  и  $\alpha_k$  в зависимости от уклона горного потока:

$$\begin{aligned}\alpha_6 &= 1 + 0.75 \times \sqrt{I + 0.001}, \\ \alpha_k &= 1 + 2.25 \times \sqrt{I + 0.001},\end{aligned}\tag{3.8}$$

Которые рекомендует применять при  $I=1-200$  ‰. Некоторые исследователи предлагают определять коррективы количества движения и кинематической энергии по эмпирическим формулам через коэффициент Дарси либо по скоростному множителю формулы Шези [4].

Формула Г.В. Железнякова имеет вид 3.9 [10]:

$$\alpha = 1 + 0.88 \times \left(0.34 + \frac{1 + \frac{\sqrt{g}}{c}}{2.3 + 0.3 \times \frac{c}{\sqrt{g}}}\right)^2\tag{3.9}$$

Исследователями Л.С. Никитиной установлено, что данная формула дает наиболее точные результаты по сравнению с формулами А.А. Труфанова, Л.А. Морозова для коэффициента Кориолиса в речных потоках. Однако она мало пригодна для условий взаимодействия руслового и пойменного потоков.

Определение  $\alpha_b$  и  $\alpha_k$  в руслах с поймами в работе Hulsing, Smith предлагается методом разбивки потока на кинематически обособленные зоны.

После вычисления  $\alpha_b$  и  $\alpha_k$  в выделенных зонах их средние значения для поймы рассчитываются на основании зависимости [10]:

$$\alpha = \frac{\alpha_1 \times \frac{K_1^3}{\omega_1^2} + \dots + \alpha_n \times \frac{K_n^3}{\omega_n^2}}{\frac{(K_1 + K_2 + \dots + K_n)^3}{(\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_n)^2}} \quad (3.10)$$

где  $K = C \times \omega \times \sqrt{R}$ , расходная характеристика

Как указывает М.С. Грушевский, коррективы  $\alpha_b$  и  $\alpha_k$  теряют в этом случае свой первоначальный смысл, так как поток разбивается на отдельные фрагменты, которые гидравлически не связаны между собой.

Таким образом, многообразие теоретических и эмпирических формул, в которых установлены связи величин  $\alpha_b$  и  $\alpha_k$  с различными параметрами свидетельствуют о том, что эта проблема сложна и недостаточно изучена.

Величины  $\alpha_b$  и  $\alpha_k$  всегда больше единицы. В практических расчетах их часто принимают равными:  $\alpha_b = 1.00 - 1.03$  и  $\alpha_k = 1.00 - 1.10$ . Действительные величины, как показали многочисленные исследования, изменяются в широких пределах и зависят от распределения скоростей по живому сечению.

В настоящее время наиболее полно исследован вопрос об изменении  $\alpha_b$  и  $\alpha_k$  в гидравлическом прыжке и в нижнем бьефе.

Изменение коэффициента Кориолиса на равнинных и горных реках исследовались Л.А. Морозовым.

Установлено, что коэффициент  $\alpha_k$  изменяется от 1.00 до 2.43. В среднем же для расчета на равнинных реках им рекомендуется  $\alpha_k = 1.20$ ; для горных –  $\alpha_k = 1.50$  [11].

Максимальные величины  $\alpha_b$  и  $\alpha_k$  для естественных потоков получены болгарскими учеными:  $\alpha_b = 1.83$ ,  $\alpha_k = 5.59$ .

Американские исследователи установили, что для каналов и искусственных беспойменных русел  $\alpha_k = 1.03-1.76$ , при среднем значении  $\alpha = 1.10$ , для естественных русел трапецеидальной формы без пойм, мостовых устоев и других искусственных сооружений  $\alpha_k = 1.09-2.90$  при среднем 1.40. Для естественных русел с поймами  $\alpha = 1.18-2.99$ , при среднем  $\alpha = 1.46$ .

Л.С. Никитиной установлены величины  $\alpha_b$  и  $\alpha_k$  на беспойменных участках рек, в руслах с поймами при взаимодействии руслового и пойменного потоков, а также при наличии ледяного покрова и шуги. При ледяном покрове ( $\alpha_b = 1.28$  и  $\alpha_k = 1.85$ ) и при малых наполнениях пойм ( $\alpha_b = 1.19$  и  $\alpha_k = 1.69$ ).

Величина коэффициента Кориолиса при увеличении шероховатости увеличивается ( $\alpha = 1.05-1.18$ ), так же как и при зарастании.

Анализ зависимостей  $\alpha_b = f(H)$  и  $\alpha_k = f(H)$  на реке Горынь – с.Деражно. Расчет коэффициентов Буссинеска и Кориолиса осуществлялся графическим способом.

В качестве исходной информации использованы данные об 10 измеренных расходах воды в 1970 и 7 – в 1971 (9 из них при затопленной пойме). На основе этих данных были построены профили поперечного сечения по гидроствору в изотахмах для разных уровней воды. Планометрированием определяли площади между смежными изотахмахми и соответствующие им значения местной скорости. Затем по формулам  $\alpha_b =$

$\frac{\sum u^2 \times \Delta \omega}{V^2 \times \omega}$  и  $\alpha_k = \frac{\sum u^2 \times \Delta \omega}{V^3 \times \omega}$  были вычислены  $\alpha_b$  и  $\alpha_k$  и построены зависимости  $\alpha_b = f(H)$  и  $\alpha_k = f(H)$ .

Как видно на рисунке 3.4 при увеличении уровня воды значения коэффициента Буссинеска уменьшается от 1.14 до 1.01, а при уровне выхода воды на пойму наблюдается резкое его увеличение от 1.01 до 1.2. Это связано с увеличением сопротивления в русле. На пойме наблюдается противоположная картина: с увеличением уровня уменьшается коэффициент (от 1.75 до 1.07).

Характер изменения коэффициента Кориолиса аналогичен изменению коэффициента Буссинеска. С увеличением уровня (от 90 до 344 см) значение  $\alpha_k$  уменьшается (от 1.36 до 1.1), а после выхода воды на пойму наблюдается увеличение, правда, не столь резкое как у  $\alpha_b$  (от 1.1 до 1.22).

На пойме при небольшом увеличении уровня (от 390 до 430 см) значения коэффициента Кориолиса снижаются (от 3.06 до 1.02). Следует отметить, что точность измерений данных на пойме, особенно при низких уровнях недостаточна, так как измерения скоростей на вертикалях проводились часто в одной или двух точках, а в прибрежных зонах вообще не проводились.

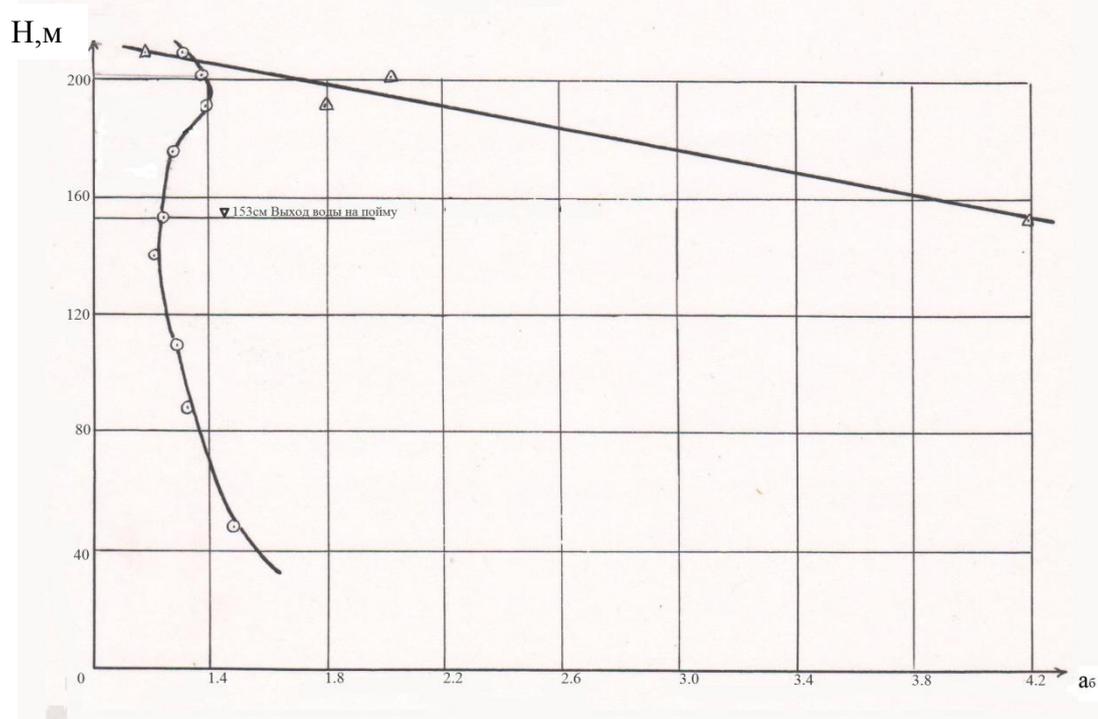
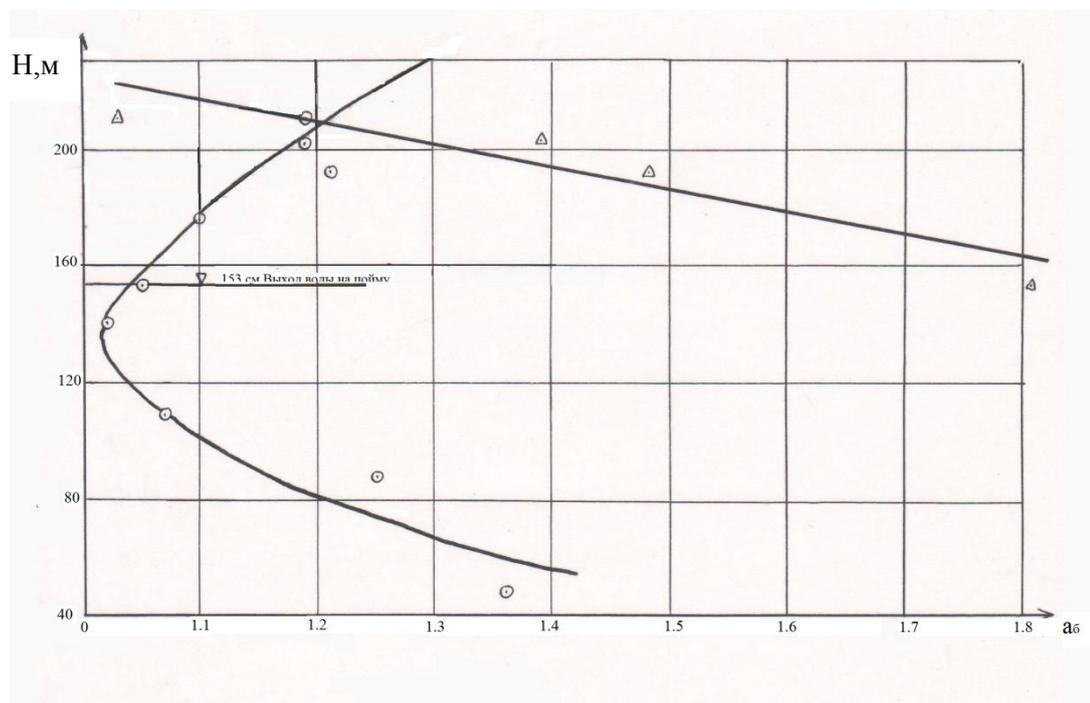
Увеличение  $\alpha$  связано с растеканием воды на пойму и увеличением шероховатости. Данные  $\alpha_b$  и  $\alpha_k$ , высчитанные по скоростям течения, измеренным в 1970 году дублируются данными за 1971 г.

Анализ зависимостей  $\alpha_b = f(H)$  и  $\alpha_k = f(H)$  по р. Горынь – с.Оженин.

Для вычисления коэффициентов Буссинеска и Кориолиса были использованы данные о 9 измеренных расходах воды, 4 из них при затопленной пойме.

По результатам расчетов были построены кривые  $\alpha_b = f(H)$  и  $\alpha_k = f(H)$ .

Как видно на рисунке 3.5 с ростом уровня (от 48 до 140 см) значение коэффициента Буссинеска уменьшается (от 1.36 до 1.02). При выходе воды на пойму он резко увеличивается (от 1.02 до 2.1) из-за увеличения сопротивления потока и передачи количества движения русловым потоком пойменному. При этом коэффициенты  $\alpha_b$  и  $\alpha_k$  вычислялись отдельно для русла и поймы.



### Рисунок 3.5 – Графики зависимостей $\alpha_6 = f(H)$ и $\alpha_k = f(H)$

На пойме изменения коэффициентов Буссинеска и Кориолиса имеют обратный характер, при увеличении уровня (от 153 до 210 см)  $\alpha_6$  уменьшается (от 1.92 до 1.03). Это связано с изменением формы поймы.

Значения коэффициентов Кориолиса уменьшаются (от 1.48 до 1.2) при увеличении уровня (от 48 до 140 см), а после выхода воды на пойму увеличивается (от 1.2 до 1.38) при увеличении уровня (от 153 до 190 см), затем от уровня 192 до 210 см наблюдается уменьшение коэффициента Кориолиса (от 1.38 до 1.30).

На пойме при увеличении уровня (от 153 до 210 см) наблюдается уменьшение коэффициента Кориолиса (от 4.19 до 1.18)

Следует отметить, что вычисленные на пойме при малых уровнях коэффициенты не обладают большой точностью, так как скорости на вертикалях измерялись в одной – двух точках, что обусловлено низкой точностью наведения изотах.

#### 3.4 Трансформация поля скоростей руслового потока под влиянием пойменного

При взаимодействии руслового и пойменного потоков происходит трансформация поля скоростей. Для его анализа по данным наблюдений на р. Горынь с. Оженин за 1971 г. и с. Деражно за 1970 и 1971 гг. были построены профили поперечного сечения по гидростворам, на которые нанесены изотахи (при трех расчетных уровнях).

Для р. Горынь с. Деражно по данным паводных изменений 1970 г. были построены поля изотах и эпюры распределения средних на вертикалях

скоростей течения по ширине русла и поймы при уровнях 430 см, 344 см, 300 см (рисунок 3.6).

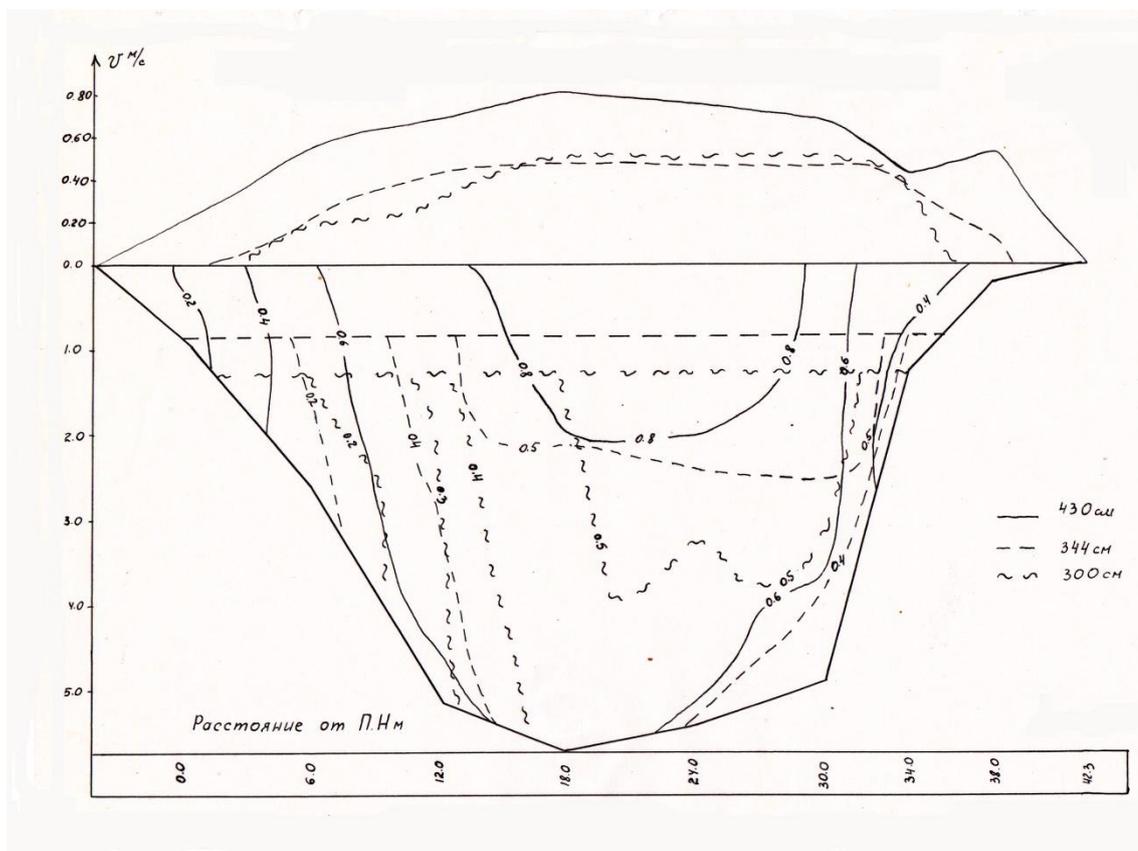


Рисунок 3.6 – Профиль поперечного сечения с изотаксами

Уровень 300 см – наибольший перед выходом воды на пойму, 344 – первый уровень, при котором был изменен расход на пойме, уровень 389 – максимальный из наблюдаемых, соответствующий затоплению поймы шириной в 950 м.

При росте уровней от 300 до 430 см отмечается небольшой рост скоростей течения в средней части русла, особенно у левого, противоположного пойме берега. Максимальные и средние скорости на вертикалях при этом увеличивались соответственно от 0.58 до 0.88 м/с и от 0.41 до 0.67 м/с.

При выходе воды на пойму ( $H = 344$  см) наблюдается небольшое снижение скорости в центральной части потока по сравнению с  $H = 300$  см.

Максимум скоростей течения в русле немного смещается сначала к правому берегу при изменении  $H$  от 300 до 344 см, а затем при росте уровня от 344 до 430 см – сдвигается к центру русла.

На пойме при этом увеличиваются как средние, так и максимальные скорости на вертикалях.

По данным уровней, глубин и уклонов по формуле Шези-Павловского были проведены вспомогательные расчеты средних скоростей потока при  $H = 430$  см,  $H = 344$  см,  $H = 300$  см.

При этом значение коэффициента шероховатости определяются по морфологическим характеристикам участка измерений и таблице М.Ф. Срибного. Сравнение расчетных с натурными данными показало, что значения отклонений для русловой части потока на вертикалях достигает максимума 380 %, а для средних скоростей максимальное отклонение – 31.3 %, для пойменной части значения гораздо лучше – 18.8 %.

Причиной этого являются небольшая точность подбора коэффициента  $n$ , а также несоответствие продольных уклонов свободной поверхности руслового и пойменных потоков и не учет влияния глубин на сопротивление потока.

Характер естественного течения руслового и пойменного потоков нарушен мостовым переходом, находящимся в 100 м выше водпоста, создающим частичное стеснение потока, имеющего мостовые переходы не только в русле, но и на пойме. Мостовой переход не имеет струенаправляющих дамб. В то же время по характеру рельефа на участке и его изменения по длине потока отмечается 2 тип взаимодействия руслового и пойменного потоков[12].

Действительно ниже створа измерения происходит расширение поймы от 800 до 1225 м и оси руслового и пойменного потоков образуют между собой

угол равный  $24^\circ$ . В чистом виде этот тип не проявляется, так как искажает мостовой переход.

Для р. Горынь – с. Оженин по данным паводочных измерений 1971 г. были построены поля изотак и эпюры распределения средних скоростей на вертикалях по ширине русла и поймы при уровнях 210, 153 и 140 см (рисунок 3.7).

Уровень 140 см максимальный перед выходом потока на пойму, 153 – первый уровень, при котором был измерен расход на пойме и 210 – максимальный уровень из наблюдаемых, соответствующий затоплению поймы шириной в 286 м.

Отмечается значительный рост скоростей при увеличении уровня воды, от 140 до 210 см. Максимальные и средние скорости на вертикалях увеличиваются от 0.60 до 0.72 м/с и от 0.48 до 0.52 м.

Однако смещения максимума скоростей в русле к берегу, противоположному пойме, не наблюдается.

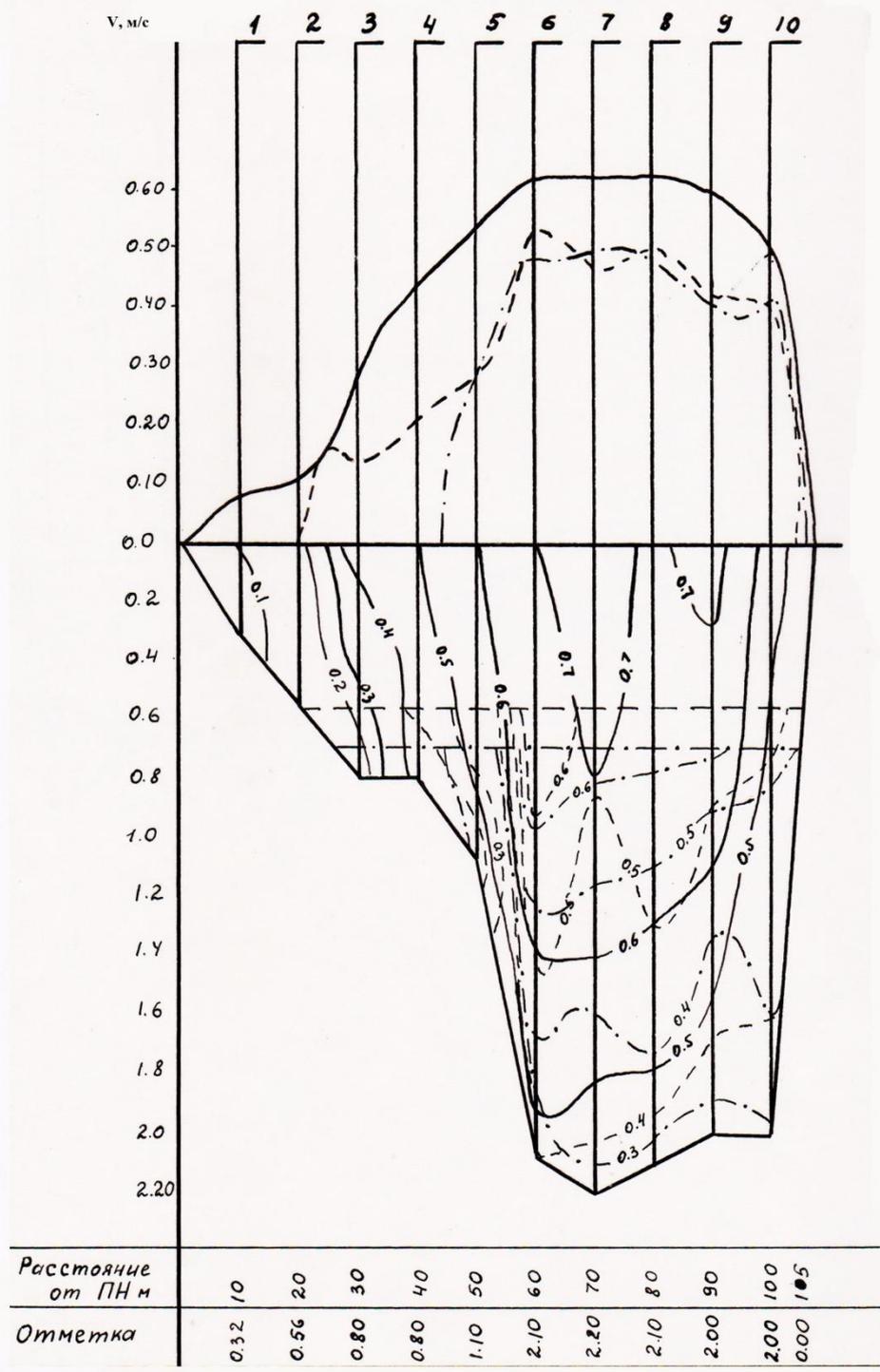
При выходе воды на пойму  $H = 153$  см средние скорости на вертикалях в русле несколько снижаются по сравнению со скоростями при  $H = 140$  см, особенно в центре потока от 0.53 до 0.46 м/с.

Для поймы также характерно, что с увеличением уровня воды, увеличиваются как средние, так и максимальные скорости на вертикали от 0.15 до 0.43 м/с и от 0.42 до 0.80 м/с.

По данным уровням, глубинам, уклонам по формуле – Шези-Павловского были проведены вспомогательные расчеты средних скоростей потока при  $H = 210$  см,  $H = 152$  см и  $H = 139$  см.

При этом значение коэффициента шероховатости определялось по морфологическим характеристикам участка измерений и по таблице М.Ф. Срибного [4].

Сравнение расчетных с натурными данными показало, что значения отклонений для русловой части потока на вертикалях достигает 50 %, в среднем – около 20 %, а для средних скоростей отклонения в среднем примерно 25 %. Для пойменной части значения гораздо хуже – максимум 153 %.



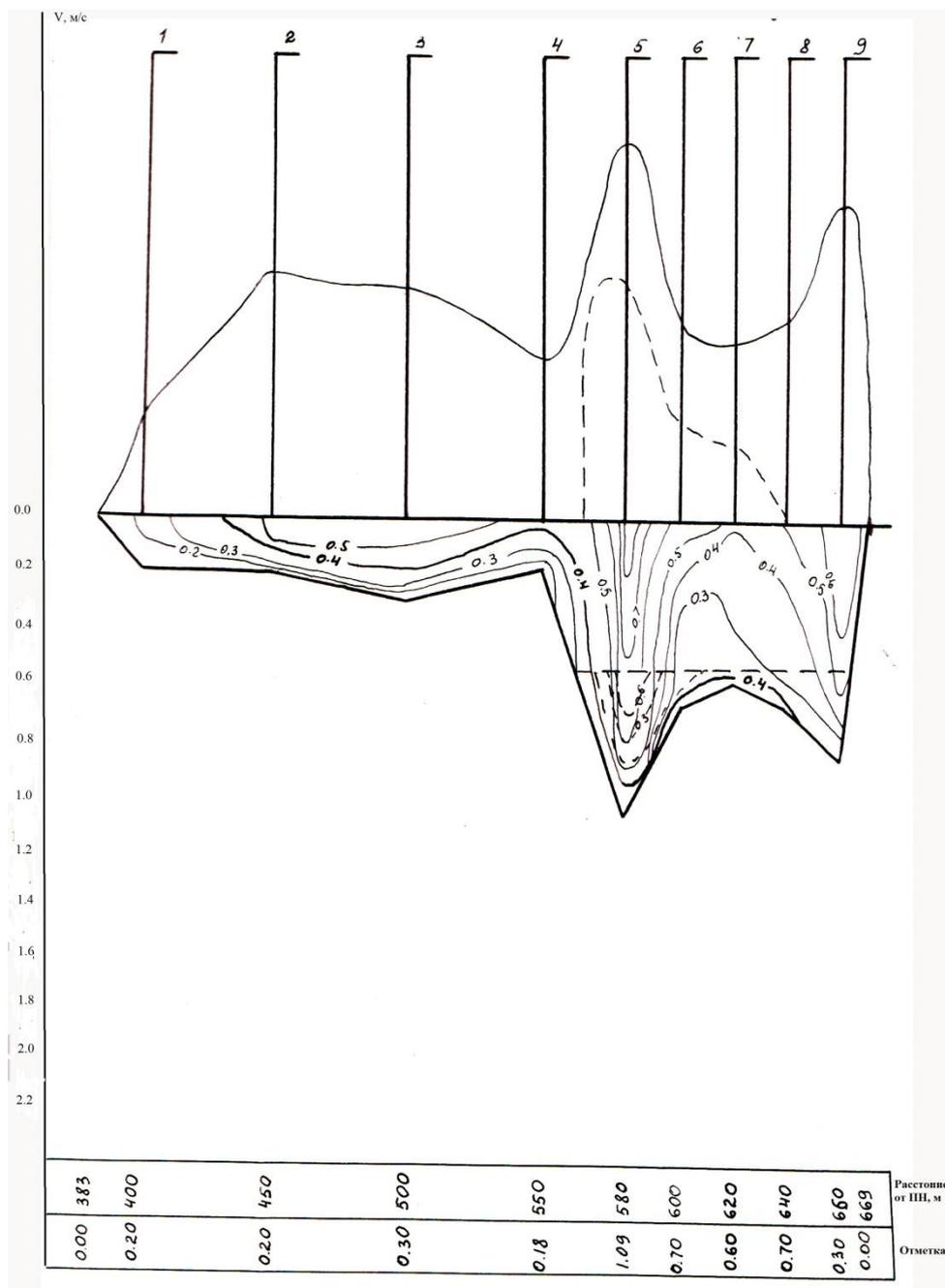


Рисунок 3.7 – Профили поперечного сечения с изотопами и кривыми распределения средних на вертикалях скоростей по ширине гидроствора на р. Горыньус. Оженин за 1971 г.

Причиной этого является небольшая точность подбора коэффициента шероховатости, а также несоответствие продольных уклонов свободной поверхности руслового и пойменного потоков и не учет влияния глубин на сопротивление.

По планово-высотным материалам участка измерений были определены направления геометрических осей русла и поймы (при максимальном уровне затопления) и угол между ними.

Значение угла  $\alpha$  равно  $32^\circ$ . При этом наблюдается расхождение русла и поймы. Следовательно, на данном участке наблюдается 2 тип взаимодействия.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Методика Д.Е. Скородумова, основанная на уравнении движения потока с переменной массой, в данный момент является наиболее совершенной для расчетов пропускной способности сложносоставных русел. Однако, на данном этапе организации гидрологических наблюдений на сети гидрометслужбы расчет по этой методике затруднен и требует длительного времени и затрат средств, так как нужны измерения по крайней мере в двух створах. Поэтому целесообразно выделить несколько пойменных участков и створов в каждом УГМС с целью дальнейшей разработки этой методики.
2. Расчет пропускной способности русел по формуле Шези является наиболее доступным в настоящее время. Однако, этот расчет имеет допущение, так как формула Шези была выведена для равномерного движения. Кроме того, возникает ряд трудностей в связи с большим количеством эмперических формул для расчета коэффициента «с».
3. Формула Г.В. Железнякова, является наиболее удачной и совершенной из всех имеющихся на данном этапе формул для расчета коэффициента Шези. Формула Г.В. Железнякова применяется при любых значениях коэффициента  $n$  и  $R$ .
4. Таблицы, которыми в настоящее время пользуются для определения  $n$ , не учитывают всего многообразия факторов, влияющих на сопротивление руслового и пойменного потоков. Они отличаются сравнительно узкой детализацией и имеют большой диапазон значений  $n$  при одинаковых условиях. К недостатку этих таблиц следует отнести не учет типа взаимодействия руслового и пойменного потоков. Н.В. Барышниковым и Каном предложено новое направление разработки таблиц для определения  $n$  с учетом всех факторов, влияющих на сопротивление потока и с большей детализацией.

5. Анализ кривых  $Q = f(H)$ ,  $V = f(H)$ ,  $\omega = f(H)$ ,  $n = f(H)$  и другие для р. Горынь подтвердили сделанные уже другими авторами выводы о влиянии на пропускную способность русла пойменного потока. При выходе воды на пойму при 2 типе взаимодействия пропускная способность русла резко увеличивается.
6. Зависимость  $\alpha_6 = f(H)$  и  $\alpha_k = f(H)$  тесно связана с сопротивлением в русле и пойме, она имеет противоположный характер изменения для пойменного и руслового потоков. Из-за плохого качества и количества измерений расходов на пойме значения  $\alpha_6$  и  $\alpha_k$  обладают малой точностью.
7. Пойменный поток оказывает существенное влияние на скоростное поле руслового потока. При 2 типе взаимодействия центр скоростей смещается в сторону, противоположную пойме. Также при выходе воды на пойму наблюдается область резкого падения скоростей на границе руслового и пойменного потоков.
8. После тщательного просмотра фондовых материалов по Украинскому УГМС следует признать низкое качество производства наблюдений и измерений на сети. Это подтверждается отсутствием измерений на большинстве объектов в период затопления пойм. На тех же объектах, где эти измерения проводились, как правило, отсутствовали данные об уклонах свободной поверхности. Кроме того, на большинстве объектов отсутствуют планы участков постов, а имеющиеся относятся к съемке 1953-1955 гг.
9. Целесообразным было бы рекомендовать Украинскому УГМС наладить производство регулярных наблюдений над уклонами свободной поверхности и измерение расходов воды на пойме. Производить съемку участков постов не реже одного раза в 5 лет.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Барышников, Н.Б. Влияние поперечных перемещений масс жидкости на пропускную способность русел с поймами [Текст] / Н.Б. Барышников. – Л.: ЛГМИ, 1972. – 123 с
- 2 Гончаров, В.И. Динамика русловых потоков [Текст] / В.И. Гончаров. – Л.: Гидрометиздат, 1976. – 375с.
- 3 Барышников, Н.Б. Об учете взаимодействия руслового и пойменного потоков при построении и экстраполяции кривых расходов воды [Текст] / Н.Б. Барышников. – Л.: ЛГМИ, 1967. – 176 с.
- 4 Барышников, Н.Б. Трансформация поля скоростей руслового потока под влиянием пойменного [Текст] / Н.Б. Барышников. – Л.: ЛГМИ, 1978. – 146 с.
- 5 Барышников, Н.Б. Поймы и пойменные процессы [Текст] / Н.Б. Барышников. – Л.: Изд. РГГМУ, 2006. –136 с.
- 6 Барышников, Н.Б. Морфология, гидрология и гидравлика пойм [Текст] / Н.Б. Барышников. – Л.: Гидрометиздат, 1984. – 280 с. Барышников, Н.Б.,
- 7 Барышников, Н.Б., Иванов, Г.В. Влияние эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков при пересечении их осей на русловой процесс [Текст] / Н.Б. Барышников. – Красноярск.: 1974. – 123 с.
- 8 Гидрологические ежегодники том 2 вып. 3.4 за 1966, 1967 гг.
- 9 Динамика русловых потоков [Текст] / Н.Б. Барышников. – СПб.: Изд. РГГМУ, 1999. – 208 с.
- 10 Железняков, Г.В. Теория гидрометрии [Текст] / Г.В. Железняков. – Л.: Гидрометиздат, 1976. – 344 с.

11 Скородумов, Д.Е. Вопросы гидравлики пойменных русел в связи с задачами построения и экстраполяции кривых расходов воды [Текст] // Труды ГГИ. – Л.: 1968. – 96 с.

12 Спицин, И.П. О механизме взаимодействия потоков основного русла и поймы [Текст] / И.П. Спицин. – Л.: ЛГМИ, 1962. – 176 с.