



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 **Методика расчётов средних на
вертикалях скоростей русловых
потоков при их взаимодействии с
пойменными потоками**

Исполнитель Корниенко Константин Вячеславович
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель Доктор географических наук, профессор
(ученая степень, ученое звание)

Барышников Николай Борисович
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

Кандидат географических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Исаев Дмитрий Игоревич
(фамилия, имя, отчество)

«30» июн 2016 г.

Санкт-Петербург
2016

СОДЕРЖАНИЕ

	тр.
ВВЕДЕНИЕ	
Взаимодействие руслового и пойменного потоков	
Итоги изучения проблемы взаимодействия руслового и	
.1 пойменного потоков	
Лабораторные исследования	
.2	
Натурные исследования процесса взаимодействия руслового и	
.3 пойменного потоков	4
Методы расчётов средних скоростей русловых потоков, находящихся под воздействием пойменных потоков	6
Анализ натурных данных	1
Влияния пойменного потока на характер изменения средних на вертикалях скоростей руслового потока при изменении уровней воды	2
Оценка точности расчетов средних на вертикалях скоростей по методике, основанной на формуле Шези	9
Методика расчётов средних на вертикалях скоростей русловых потоков, находящихся под воздействием потоков поймы	3
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	9

ВВЕДЕНИЕ

Для проектирования и строительства ряда гидротехнических сооружений необходимы сведения не только о средних скоростях русловых потоков при расчётных уровнях, но и данные о средних на вертикалях скоростях потоков. В частности, востребованность этой информации является крайне необходимой при проектировании мостов для расчётов заложения их опор.

Методика расчётов, основанная на теории равномерного движения, т.е. формуле Шези, предложенная А.В. Караушевым, даёт неплохие результаты расчётов для потоков в беспойменных руслах. Однако для русел равнинных рек, где паводки и половодья 1% обеспеченности, как правило, проходят по затопленным поймам, погрешности расчётов превышают допустимые пределы.

Исходя из этого, основной целью данной работы является апробация методики расчётов средних на вертикалях скоростей русловых потоков, находящихся под воздействием потоков пойм, разработанная на кафедре гидрометрии.

1 Взаимодействие руслового и пойменного потоков

1.1. Итоги изучения проблемы взаимодействия руслового и пойменного потоков

Детальный анализ данной проблемы выполнен Н.Б. Барышниковым [2,4]. Приведём результаты его работы.

Русла с поймами - частный случай сложносоставных русел, отличительной особенностью которых является наличие двух и более потоков, движущихся с различными скоростями параллельно или под различными углами друг к другу. При взаимодействии таких потоков возникают дополнительные сопротивления, существенно изменяющие пропускную способность таких русел. Итогам изучения этой проблемы и посвящен настоящий раздел.

Следует отметить, что аналогичные явления могут возникнуть и при движении потока непосредственно по пойме, глубина и шероховатость которой обычно резко изменяются по ширине. Возможны случаи резкого изменения шероховатости русла и поймы без заметного изменения глубин. Последние случаи также подлежат рассмотрению, ибо различие скоростей потоков, являющееся основной причиной эффекта их взаимодействия, может быть существенным из-за изменения сопротивлений. Результатом этого могут быть весьма значительные изменения пропускной способности меандрирующих русел.

Первые сведения об особенностях пропускной способности русел с поймами приводятся Ф. Форхгеймером [22], который указывает, что расчетное значение расхода воды, определенное на основе формулы Шези, будет больше фактического. Уменьшение пропускной способности русла с поймой он объясняет, ссылаясь на работу Грантца (1926 г.), образованием вихрей с вертикальной осью вращения, возникающих на границе раздела руслового и пойменного потоков.

Несколько позднее М. Эгли [24] провел обширные исследования взаимодействующих потоков на крупномасштабной модели Эльзаского канала в г. Меце. Длина канала в масштабе 1:20 составила 209,2 м, а сечение представляло собой трапецеидальное русло с шириной по дну 1,65 м с односторонней, также трапецеидальной поймой. Однако детальные эксперименты Эгли не выявили особенностей поведения потоков в сложносоставных руслах. М. Эгли в качестве одного из основных выводов

приводит следующий: «Распределение общего расхода между различными частями сечения происходит пропорционально глубине потоков и шероховатости стенок каждой части». Хотя Эгли и установил наличие поперечных течений, но он объяснил их неравномерностью режима потока в составном русле.

Примерно в это же время Б. В. Поляков в своих работах [13 и др.] привел ряд кривых расходов воды для русловой части р. Дон, на которых четко прослеживается их перегиб и значительное отклонение влево при уровнях, превышающих уровни выхода воды на пойму. Однако Поляков также не дал объяснения этому факту.

И только в 1947 - 1950 гг. Г. В. Железняков [10], выполнивший анализ экспериментальных данных по изучению руслового и пойменного потоков, полученных на прямолинейной модели русла с двусторонней поймой, обнаружил существенное уменьшение средних и поверхностных скоростей руслового потока под влиянием пойменного, впоследствии названное им кинематическим эффектом взаимодействия безнапорного руслового и пойменного потоков. Исследования Железняка положили начало широкому изучению различных аспектов этой сложной и очень важной для решения ряда практических задач проблемы.

1.2. Лабораторные исследования

Дальнейшие исследования первоначально выполнялись на моделях различной длины, где русло с одной или двумя поймами создавалось при параллельности их геометрических осей. Краткая сводка экспериментальных работ приведена в таблице 1.1.

Несколько позднее Н.Б. Барышниковым [2,5 и др.] и А. Л. Радюком [15,16] были выполнены экспериментальные исследования процесса взаимодействия потоков, протекающих по поверхности с резко отличной шероховатостью и примерно равной глубиной по ширине (смотри таблицу 1.1).

Как указано в таблице 1.1, на модели в лаборатории РГГМУ было сформировано русло, на котором по всей длине установки на двух полосах шириной 0,75 м каждая была нанесена различная шероховатость (1,8 и 4,5 см), а дно средней полосы было покрыто стеклом толщиной 7 мм (смотри рисунок 1.1).

Таблица 1.1– Основные характеристики моделей и опытов по изучению взаимодействия руслового и пойменного потоков и потоков в руслах с различной шероховатостью по ширине при параллельности геометрических осей отсеков моделей

Исследователь (серия опытов)	Год	Длина L , м	Глубина основного русла, см	Форма русла	Ширина, м		Продольный уклон $I^{0/00}$	Шероховатость, см		Расход воды, л/с	Глубина в русле, см
					русла B_p	поймы $\frac{B_{п.п}}{B_{п.л}}$		русла Δ_p	поймы $\frac{\Delta_{п} / \Delta_{л}}{(n_{п} / n_{л})}$		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Железняков	1947	7,2	5,0	Параболическая	0,45	2,6/2,6	0,5	Бетон-корка	(0,1/0,1)	6,9-51,4	6,2-9,1
	1948	7,2	6,0	То же	0,60	0,6	1,0	То же	$\frac{(0,1-0,2)}{(0,1-0,2)}$	7,5-40,1	6,2-10,1
	1948	7,2	6,0	То же	0,60	1,2/1,2	1,0	То же	$\frac{(0,1-0,2)}{(0,1-0,2)}$	7,5-40,1	6,2-10,1
	1948	7,2	6,0	То же	0,60	2,33/-	1,0	То же	(0,1-0,2)	7,5-40,1	6,2-10,1
Спицын	1959	12,0	6,3	Прямоугольная	0,40	1,66/-	3,0	0,016	0,35/-	2,7-74,4	2,0-12,8
Серия 1-2	1960	12,0	6,3	Прямоугольная	0,40	1,66/	3,0	0,14	0,35/	8,1-80,3	5,7-12,7
Серия 1-3	1960	12,0	6,3	Прямоугольная	0,40	1,66/	3,0	0,20	0,35/	4,6-74,4	4,0-12,5

Серия 2-1	1961	12,0	6,3	Трапецеидальная	0,20	1,66/	3,0	0,016	0,35/	14,4-78,2	7,3-12,5
Серия 2-2	1961	12,0	6,3	Трапецеидальная	по дну 1,0	1,66/	3,0	0,09	0,35/	2,7-81,2	3,9-13,0
Серия 3-1	1961	12,0	6,3	Треугольная	0,40	1,66/	3,0	0,016	0,35/	5,6-82,7	5,5-12,5
Серия 4-1	1961	12,0	6,3	Треугольная	0,40	1,66/	3,0	0,016	0,35/	4,4-83,4	4,8-12,2
Серия 5-1	1961	12,0	6,3	Параболическая	0,40	1,66/	3,0	0,023	0,35/	2,4-81,9	3,8-12,8
Агасиева, Барекян	1957 1959	35,0	12,0	Параболическая	123	9,47	0,27-0,28	-	-	25,7-180	12-24,6
Селлин	1964	4,5	4,4	Прямоугольная	0,10	0,17/-	0,85	Гладкая	Гладкая	-	0,6-6,6
Ашида и др.	1967	50	19,0	Прямоугольная	0,60	1,2/1,2	-	Гладкая	Гладкая	69,1-192,5	17-23,7
Ле Ван Киен	1966 1968	23	-	Прямоугольная	0,41-0,42	0,2-2,5	1,44	Бетонкорка	-	-	-
Железняков,	1963	21,4	12,0	Прямо-	0,30	3,2	1.2	Песок	-	-	-

Алтунин*	1965			угольная							
Барышников *	1963 1965	4,0	6,0	Прямо- угольная	0,19	0,21	3,0-6,0	Крашено е дерево	1,5	0,2-21,8	1,0-11,8
Барышников	1965 1967	4,0	5,0-7,0	Прямо- угольная	0,19	0,21	3,0-9,0	Крашено е дерево	0,5-2,0	1,0-28,0	1,0-13,0
Барышников **	1968 1969	12	5,0	Прямо- угольная	0,40	1,0/1,0	2,4	Бетон	0,2-2,0	2,0-90,0	1,0-14,0
Деллеур и др.	1967	27	0,18	Прямо- угольная	0,28	0,31/-	0,67-3,72	0.015- 0.15	0,18-0.27	63-301	1,0-14,0
	1967	27	0,42	Прямо- угольная	0,28	0,76/0,76	0,67-3,72	Лакиров ан-ная фанера	0,18-0,27	63-301	1,0-14,0
Таусенд	1968	10,1	0,10	Прямо- угольная	0,25	0,35	Переменный	Гладкая	Гладкая		1,0-12,64
Новикова*	1972	23	-	Трапецеи- дальная	2,31 по дну 1,57	1,26	1,0	0.02	-	40-133	6,0-16,0
Вайт, Картенс***	1970	6,0	12,5 10,0 7,5	Два прямоуголь- ника	0,125	0,125	-	Алюми- ний	Алюми- ний	-	-
Райс, Р.Аравипори	1975	13,4	8,0	Прямо- угольная	0,103	0,718	0,8-3,3	Пластик, резина	Пластик, резина	6,3	8,0-13,0
	1981	18,3	9,75	Прямо- угольная	0,72	0,52	0,36-0,72	Бетон	Бетон	56,0	11,3-18,1

Отсеки с различной шероховатостью по ширине											
Барышников **	1963 1965	12	–	Прямоуголь ная	0,75	0,75/0,75	2,8	Стекло	4,5/1,8	3,6-105,4	2,0-12,0
	1965 1967	12	–	Прямоуголь ная	0,75	0,75/0,75	2,4	Стекло	0,2/3,5	3,0-110	1,0-14,0
Радюк	1967	14	–	Прямоуголь ная	0-140	0-140	2-3	0,7	2,0-5,2	1,3-125	2,3-16,8
	1967	14	–	Прямоуголь ная	0-140	70/70	10	1,05	4,2-9,2	1,3-125	2,3-16,8

* Размываемая модель.

** Динамические оси потоков непараллельны.

*** Напорный поток.

Примечания:

1. В графе 7 в числителе дроби дана ширина правой поймы, в знаменателе – левой.
2. В графе 10 в скобках даны значения коэффициентов шероховатости n ; $\Delta_{\text{п}}$ и $\Delta_{\text{л}}$ – высота выступов шероховатости правой ($\Delta_{\text{п}}$) и левой ($\Delta_{\text{л}}$) пойм.

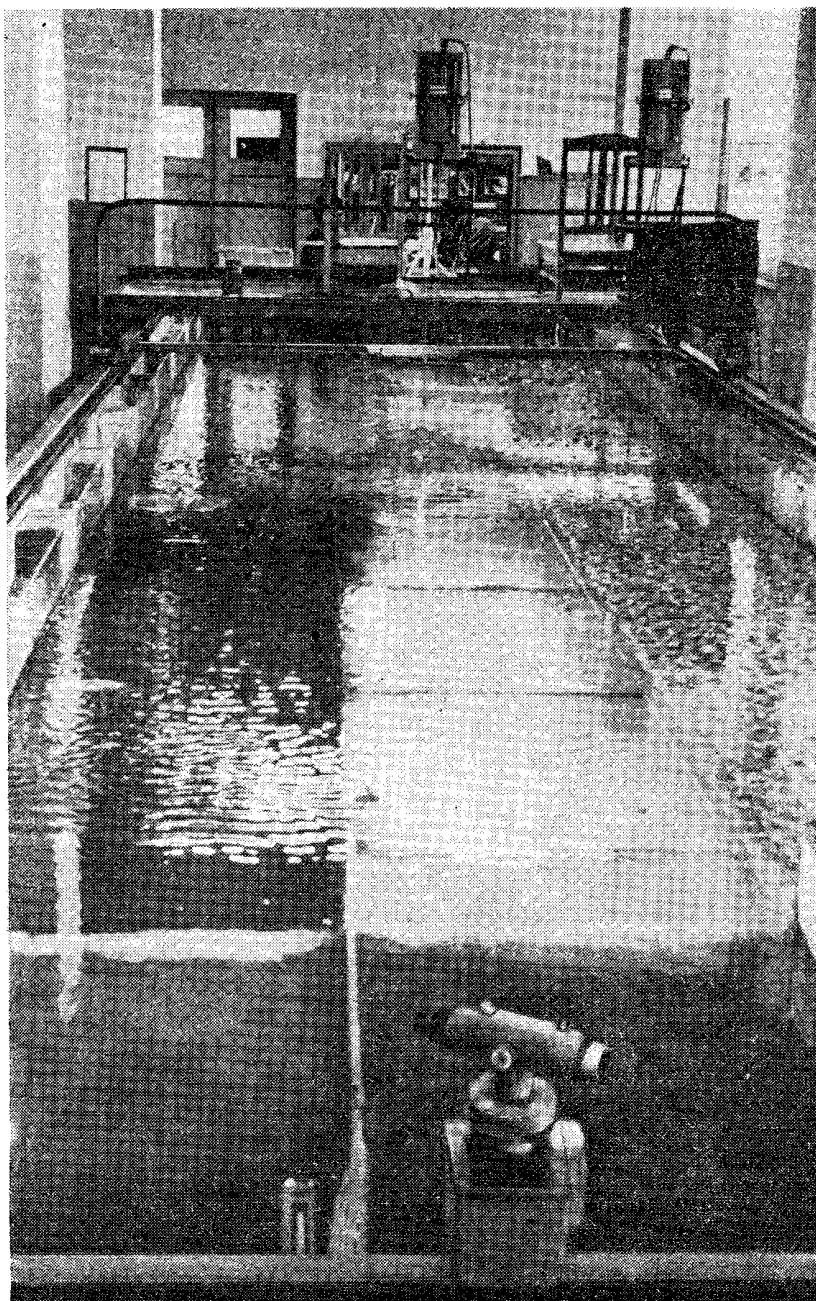


Рисунок 1.1– Общий вид экспериментальной установки РГГМУ
(фото В.Г. Саликова).

Таким образом, были образованы три отсека с различной шероховатостью по ширине. Изучение процессов взаимодействия потоков в этих отсеках осуществлялось по методике, разработанной ранее в университете, т. е. измерения параметров выполнялись при режиме, близком к равномерному как в изолированных, так и во взаимодействующих отсеках потока.

Особенностью экспериментов, проведенных под руководством Н.Б. Барышникова как на модели русла с поймами [3], так и на моделях русла с неоднородной шероховатостью по ширине [2], явилось изучение эффекта взаимодействия, возникающего при непараллельности динамических осей руслового и пойменного потоков.

Описание моделей, методики проведения экспериментов и полученные выводы приводятся как в отечественных, так и в зарубежных работах. Остановимся более детально на анализе полученных результатов и выводах, сделанных авторами исследований.

Как вытекает из анализа опубликованных работ [4, 8, 16], при движении потоков с различными скоростями на границе их раздела сначала (при малых скоростях) возникает вертикально расположенная волновая поверхность. По мере роста скоростей от нее отделяются вихри с вертикальной осью вращения, которые по закону Кутта – Жуковского перемещаются в поток, движущийся с большими скоростями. Следовательно, эти вихри, захватывая массы жидкости пойменного потока, переносят их в русловой, тем самым осуществляя массообмен между русловым и пойменным потоками и торможение пойменным потоком руслового.

Теоретический анализ процесса взаимодействия руслового и пойменного потоков впервые выполнен В. Н. Гончаровым [8], а наличие вихрей на границе взаимодействующих руслового и пойменного потоков впервые экспериментальным путем установлено И. П. Спицыным и несколько позднее подтверждено Р. Х. Селлиным (рисунок 1.2).

Интересные результаты получены А. Л. Радюком при измерениях на р. Большой Енисей на участке длиной 300 м с каменистой

односторонней поймой. «При очень большой разнице скоростей руслового (5 м/с) и пойменного (0,4 м/с) потоков по всей линии соприкосновения потоков поймы и русла четко просматривалась вихревая дорожка. Зона вихрей захватывала незначительную часть поймы и большую часть ширины русла. Вихри с вертикальной осью вращения зарождаются сразу же после слияния потоков поймы и русла и вращаются против часовой стрелки, постепенно увеличиваясь в диаметре до определенного предела. Диаметры вихрей изменялись от 15 до 150 см. Затем вихревые структуры начинают смещаться в сторону руслового потока, угловая скорость их вращения уменьшается, происходит распад вихрей на более мелкие локальные массы, которые рассеиваются в окружающей среде. Продолжительность «жизни» отдельных вихрей составляла 2 - 6 с» [16, с. 3 - 4].

Аналогичные вихри, но на границе взаимодействующих отсеков потока, протекающего по поверхности, имеющей резко неоднородную шероховатость и постоянную глубину по ширине (рисунок 1.3), были обнаружены автором совместно с В. Г. Саликовым [18].

Визуальные наблюдения, а также данные, приведенные на фотографиях, полученных через небольшой интервал времени, позволили сделать вывод о том, что указанные вихри имеют форму фигуры, ограниченной вытянутым эллипсом, большая ось которого, расположенная вдоль русла, постепенно сжимается, и к моменту отрыва вихря его форма становится близкой к кругу (рисунок 1.3.).

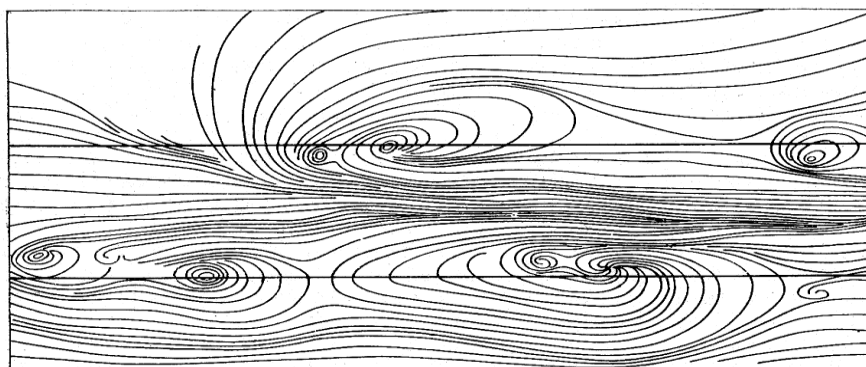


Рисунок 1.2– Вихри, образующиеся на границе раздела руслового и пойменных потоков. Опыты Р.Х.Селлина.

На процесс образования, перемещения и обтекания русловым потоком вихрей, а также на замещающие течения затрачивается значительное количество энергии, что приводит к уменьшению пропускной способности руслового отсека и деформации поля скоростей руслового потока. Значение дополнительного сопротивления в этом случае может быть оценено по формуле $\tau = A_{\beta} \frac{\partial V}{\partial b}$, где A_{β} - коэффициент турбулентного обмена между взаимодействующими потоками; $\frac{\partial V}{\partial b}$ - градиент осредненных по вертикали скоростей в зоне взаимодействия потоков.

Таким образом, сопротивление пропорционально разности, точнее градиенту скоростей потоков.

Поэтому аналогичная картина сопротивлений наблюдается и при взаимодействии отсеков потоков, протекающих по поверхности с различной шероховатостью по ширине, где градиент скоростей на их границе обусловлен не разностью глубин, а различием шероховатости дна.

Для экспериментального изучения таких сопротивлений в РГГМУ была разработана и применена оригинальная методика, основанная на изоляции взаимодействующих руслового и пойменного потоков тонкой (4 - 5 мм) продольной стеклянной разделительной стенкой. По этой методике увеличение сопротивлений определяется на основе данных измерений параметров потоков как при их изоляции, так и при их взаимодействии. Позднее эта методика была применена Р.Х. Селлиным и другими авторами [25].

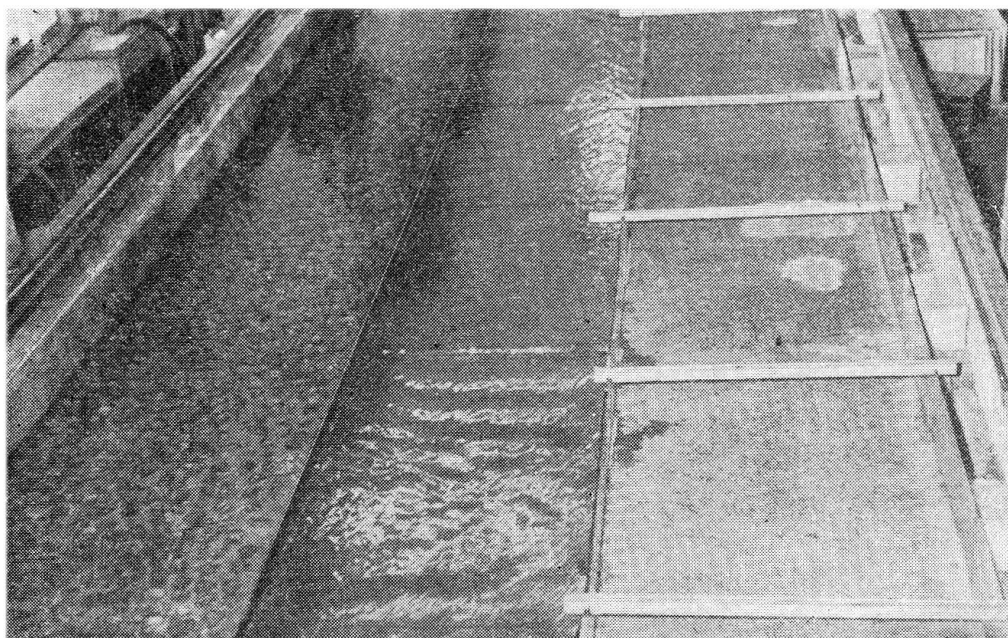
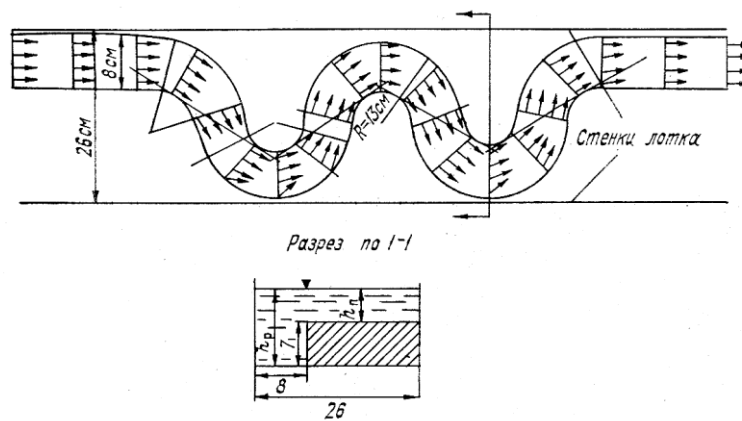


Рисунок 1.3– Вихри, образующиеся на границах потоков, протекающих по поверхности с резко отличной шероховатостью (фото В.Г. Саликова)

Аналогичная методика впервые была применена Н.Б. Барышниковым [2,4] при изучении сопротивлений при взаимодействии потоков, протекающих по поверхности, имеющей различную по ширине шероховатость.

Дальнейшие работы связаны с экспериментальным исследованием взаимодействия потоков при непараллельности их динамических осей. Первым исследованием является работа Н. А. Ржаницына [17], выполненная на модели малых размеров (шириной 26 см), представлявшей собой прямоугольное русло, составленное в плане из трех последовательных излучин и прямоугольной поймы (рисунок 1.4).

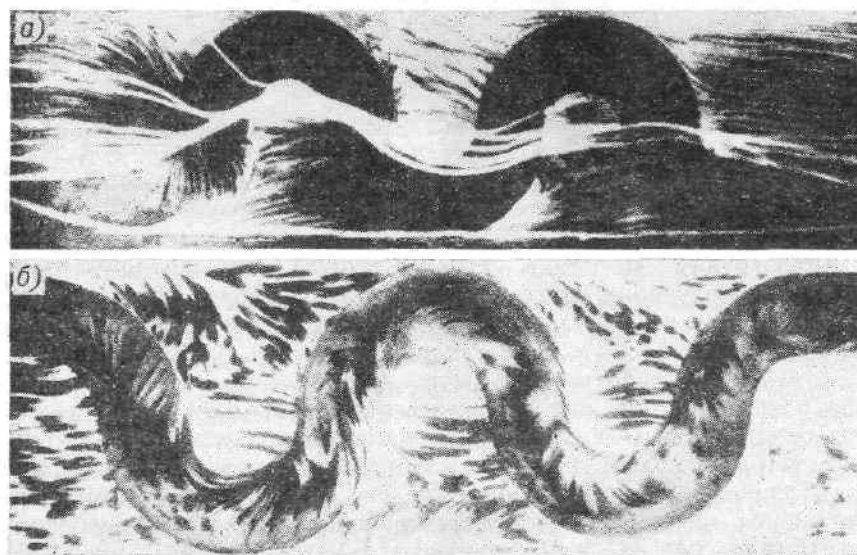
Н. А. Ржаницыным с помощью красителей изучались направления поверхностных и донных течений при взаимодействии руслового и пойменного потоков (рисунок 1.5). Детальными и тщательно выполненными явились экспериментальные исследования, начатые под руководством В. Н. Гончарова и при участии автора в лаборатории РГГМУ в 1959 г. и продолженные учениками Гончарова в последующий период [8]. Результаты этих исследований дали первые количественные характеристики эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков [8].



$$\omega_p = 56 \text{ см}^2; Q_p = 56 \times 5 = 280 \text{ см}^3/\text{с} = 0,28 \text{ л/с}.$$

Рисунок 1.4– Схема установки Н.А. Ржаницына

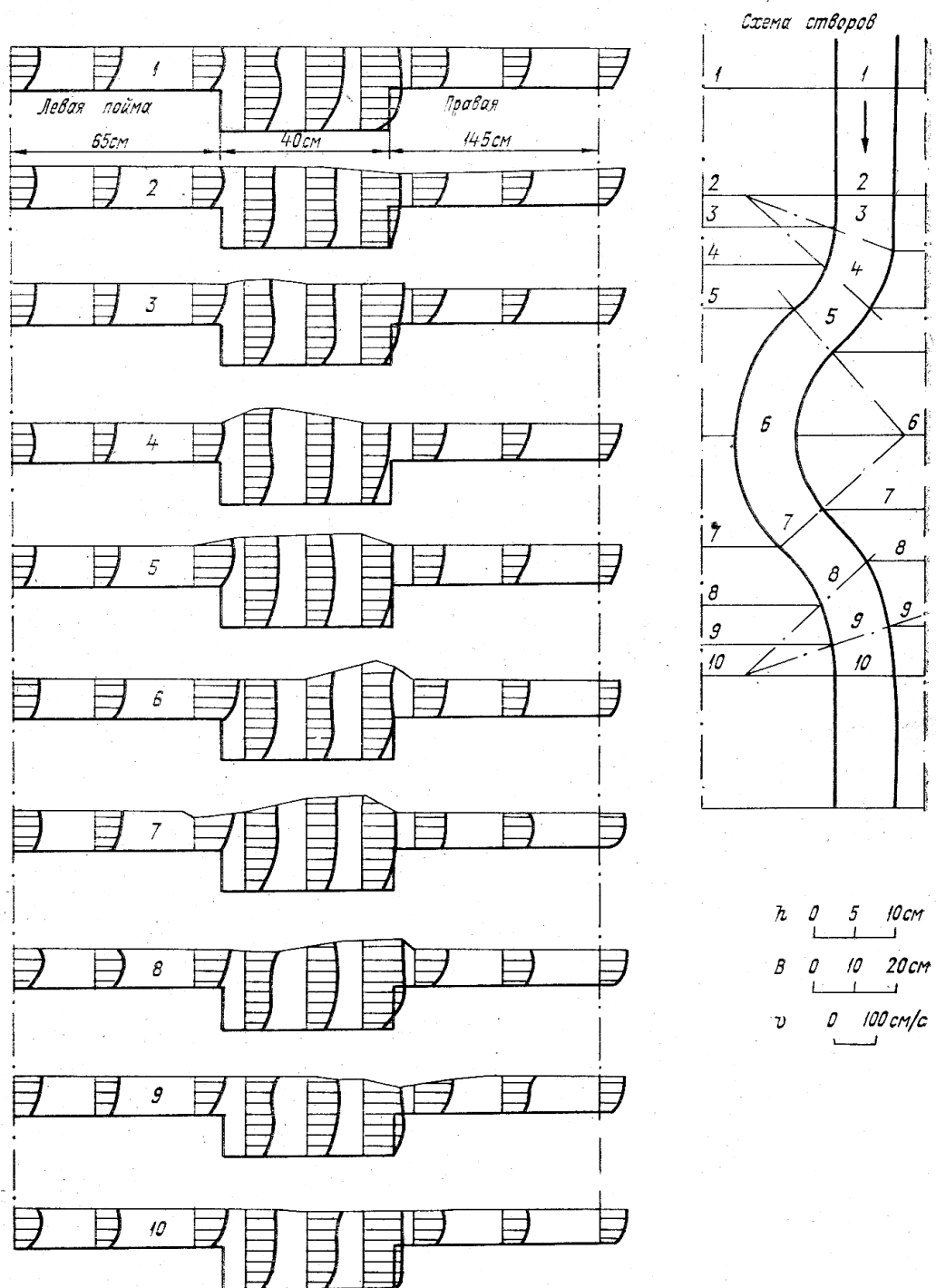
На рисунках 1.6 и 1.7 приведены основные характеристики моделей и поля скоростей по измерениям 1959 - 1960 гг.



а - поверхностные течения; б - донные.

Рисунок 1.5 –Схема течений по данным Н.А.Ржаницына .

Итоги работ раннего периода, обобщенные Гончаровым, сводятся к следующему. При малых затоплениях поймы $h_n \leq 0,2h_p$ ведущим является

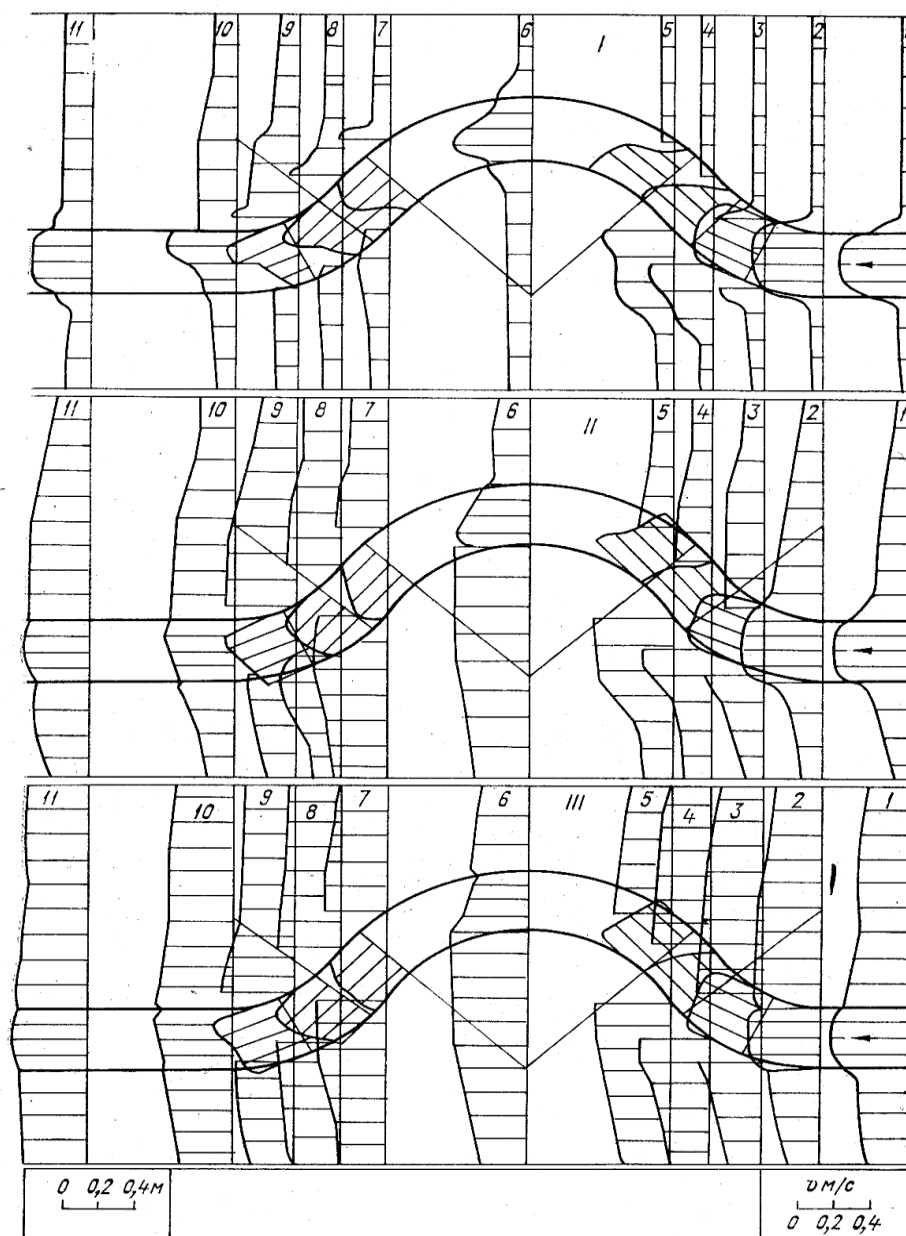


Для потока основного русла $Fr = 0,6; Re = 62\ 000$.

Рисунок 1.6—Поля продольных скоростей руслового и пойменного потоков (по данным В.Н. Гончарова), [8].

русловой поток, влияние на него пойменного невелико. Оно сказывается в уменьшении пропускной способности русла в результате перелива масс жидкости из русла на пойму и, наоборот, из поймы в русло, в уменьшении

интенсивности циркуляционных течений и выравнивании эпюр распределения скоростей по глубине потока.



1 – 11I - номера створов

Рисунок 1.7–Распределение средних скоростей вертикалей по ширине русла и поймыв условиях сложного изгиба русла (по В.Н. Гончарову).

Различные наполнения русла	I	II	III
Глубина русла, см	6,4	8,0	9,7
Глубина поймы, см	1,4	3,0	4,7
$Re_p \times 10^{-3}$	32	47	62
$Fr_p = 0,55$			

При глубинах $h_n \geq 0,2h_p$, по данным В. Н. Гончарова, ведущим становится пойменный поток. При этом отмечаются следующие отличия от предыдущего случая:

а) массы потока в русле, переливающиеся на пойму, уменьшают скорости до нормальных для пойменного потока значений на значительно большей длине, чем при малом наполнении поймы;

б) распределение скоростей по ширине руслового потока в створах изгиба выравнивается;

в) из-за увеличения переливов жидкости из русла и поймы еще более повышается торможение руслового потока пойменным. Поэтому, несмотря на значительную разность глубин потоков русла и поймы, скорости по ширине руслового и пойменного потоков выравниваются.

В последующий период резко увеличилось число экспериментальных исследований на схематизированных моделях изогнутого в плане русла и прямолинейной поймы. Все эти исследования можно разделить на три группы.

1. Русло прямоугольной формы сечения имело одну-две излучины [3, 20] и плоскую без поперечного уклона пойму.

2. Русло в плане представляет собой серию чередующихся излучин [26], как правило, с различными углами поворотов и плоскую без поперечного уклона пойму.

3. Русло - аналогичное предыдущему случаю: на пойме имеются прирусловые валы и другие образования, присущие натурным объектам.

Следует отметить, что большинство экспериментов было направлено на выяснение основных закономерностей и физической сущности процесса взаимодействия руслового и пойменного потоков. Поэтому авторы выбирали произвольные модели без какого-либо учета критериев моделирования и только в работах В. Г. Саликова (рисунок 1.8), моделировавшего конкретные участки рек трассы БАМа, выполнен расчет модели на основании учета критериев подобия [18].

В период перестройки и в последующий за ним период произошло значительное снижение качества и увеличение стоимости натурной информации, особенно в системе Росгидромета, сопровождавшееся существенным увеличением числа и главной величины катастрофических паводков в большинстве европейских стран, в том числе и в России. Это обусловило целесообразность возобновления лабораторных методов исследования, в частности в лаборатории РГГМУ, направленных на совершенствование методов расчетов пропускной способности русел с поймами. Помимо этого одной из основных задач было исследование процесса воздействия эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспорт донных наносов. Последняя проблема, имеющая не только научное, но и большое практическое значение, в частности при проектировании и строительстве различных гидротехнических сооружений, крайне слабо изучена. К тому же методы расчетов расходов и стока донных наносов несовершенны, а погрешности расчетов далеко выходят за допустимые пределы.

Острота данной проблемы подтверждается так же тем, что расходы донных наносов на сети Росгидромета не измеряются. Более того, даже методика их измерений является настолько несовершенной, что в 60–х годах прошлого столетия измерения расходов донных наносов на сети Росгидромета были прекращены. К сожалению, научно обоснованная методика измерений расходов донных наносов в настоящее время также отсутствует.

Методы измерений расходов наносов, перемещающихся в донногрядовой фазе, хотя и применяются в различных проектных и научных организациях, так же нельзя признать совершенными.

В 2003 – 2005 гг. К.В. Немчиновым были выполнены экспериментальные исследования воздействия эффекта взаимодействия потоков на транспорт донных наносов русловым потоком.

Не останавливаясь на детальном анализе их результатов, отметим лишь, что они выполнялись как при параллельных динамических осях потоков, так и при их схождении под углом $\alpha = 20^0$. Эксперименты выполнялись в лотке с переменным уклоном, длиной 6,0 м и шириной 0,6 м. В этом лотке была смонтирована модель русла шириной 0,25 м. с поймой шириной 0,35 м. При этом дно русла и поймы было сделано из стекла. Эксперименты выполнялись при расходах воды от 5 до 30 л/с.

Учитывая недостаточные размеры установки в 2005 – 2006 гг. Т.С. Селиной и А.О. Пагиным под руководством Н.Б. Барышникова [2,3 и др.]. была выполнена серия экспериментов на малой русловой площадке размерами 11,0 на 2,5 м. с постоянным уклоном дна в 1 ‰ в лаборатории при кафедре гидрометрии РГГМУ. На этой площадке из бетона была сделана модель русла, шириной 0,3 м., с поймой с переменной до 2,1м. шириной. На этой модели при разных углах расхождения и схождения динамических (геометрических) осей потоков (5, 10, 15 и 20^0), а также при параллельности осей взаимодействующих потоков были проведены серии экспериментов. Их задачей было выявление влияния эффекта взаимодействия на гидравлику потоков и транспорт донных наносов русловым потоком. Не останавливаясь на анализе результатов этих экспериментальных исследований, которые будут приведены в последующих разделах, отметим лишь, что при их проведении была применена методика, разработанная в РГГМУ. Ее суть заключалась в проведении экспериментов сначала при изоляции руслового потока от пойменного тонкой стеклянной перегородкой, затем эта перегородка удалялась и эксперименты повторялись, но уже при взаимодействии потоков. В частности, при расхождении

динамических осей потоков створы, в которых измерялись скорости течения и расходы воды, располагались соответственно на расстояниях 3, 5 и 7 м от входного створа.

Эти исследования позволили не только оценить веса инерционных членов уравнения движения потока с переменным по длине расходом воды, но и выявить влияние эффекта взаимодействия потоков на транспорт донных наносов. Установлено, что резкое увеличение расходов донных наносов, наблюдающееся при расхождении динамических осей потоков, соответствует процессу затопления пойм при прохождении паводков и половодий.

Результаты, в частности, полученные К.В. Немчиновым только при одном угле схождения динамических осей взаимодействующих потоков, равном 20^0 , позволили установить резкое уменьшение транспорта донных наносов русловым потоком. Такой процесс взаимодействия потоков соответствует условиям разгрузки пойм в периоды спада уровней при пропуске паводков и половодий. Таким образом, анализ результатов экспериментов, проведенных в РГГМУ, позволил подтвердить регулирующее воздействие эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков как на расходы воды, так и на расходы донных наносов. Все это, в общем и целом, подтверждает концепцию саморегулирования в системе бассейн – речной поток – русло.

Действительно, при пропуске паводков по поймам в период их затопления в русло реки из его бассейна поступает большое количество как жидкого стока, так и донных наносов, поэтому поток таким образом перестраивает свое скоростное поле, что приводит к резкому увеличению как скоростей руслового потока, так и его транспортирующей способности.

В периоды же разгрузки пойм при спаде уровней резко сокращается поступление наносов в русла рек и система русловой поток – русло таким образом перестраивает свою структуру, что скорости руслового потока и его транспортирующая способность резко сокращаются. Этот процесс в основном регулируется посредством изменения уклонов водной поверхности.

Анализ каждой экспериментальной работы не целесообразен из-за их большого количества и в ряде случаев повторения выводов. Поэтому ниже приведем лишь основные выводы, полученные из этих экспериментов:

1. Выявлены основные закономерности взаимодействия руслового и пойменного потоков и потоков с различной шероховатостью по ширине при непараллельности их осей.

2. С помощью разработанной типизации выделено четыре типа взаимодействия руслового и пойменного потоков, основанных на взаимном расположении их динамических осей.

3. Установлен характер трансформации полей скоростей руслового потока под воздействием пойменного потока под воздействием руслового при каждом из четырех типов их взаимодействия.

4. Разработаны различные частные рекомендации по учету эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков при расчете пропускной способности сложносоставных русел [5, 8, 18 и др.].

5. Намечены пути практического использования полученных результатов, о чем будет сказано в последующих разделах.

6. Выявлено резкое увеличение транспортирующей способности руслового потока под воздействием пойменного при расходящихся осях потоков.

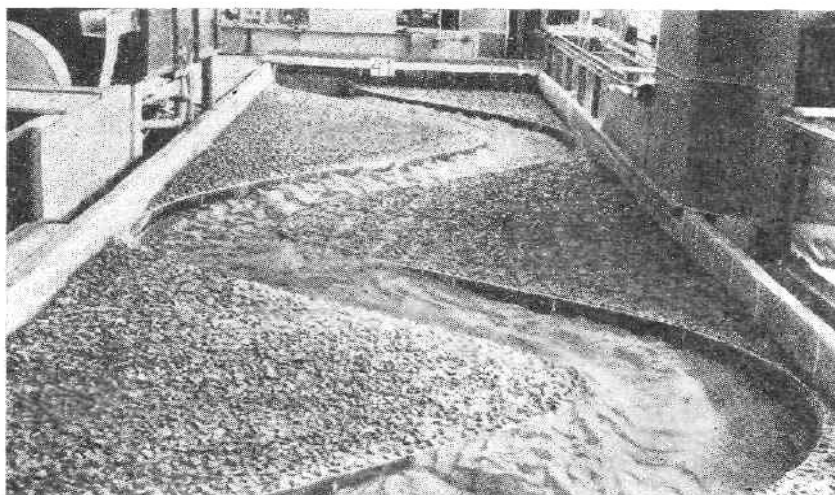


Рисунок 1.8–Общий вид установки В.Г. Саликова.

В то же время модельные испытания не лишены ряда недостатков, основными из которых, по нашему мнению, являются:

1. Недоучет влияния морфологии русла и поймы и изменения их морфометрических характеристик по длине водотока. Действительно, все известные автору экспериментальные работы выполнены лишь на моделях, у которых берега поймы, имитирующие склоны долины, были строго параллельны друг другу, а суммарная ширина русла и поймы на моделях оставалась неизменной по длине потока.

2. Наличие прорв в прирусловых валах в совокупности с многочисленными гривами, старицами, пойменными озерами и другими морфологическими образованиями приводит к резкому отличию натурального процесса от модельного, особенно на поймах. Эти особенности рельефа пойм на моделях не воспроизводились.

3. На реках обычно наблюдается чередование разновысотных пойм, а в лабораторных условиях большинство авторов изучали поймы, имеющие одинаковые отметки. Исключение, пожалуй, составляют работы В. Г. Саликова (рисунок 1.8) и Н.Б. Барышникова [2,18].

4. Несоответствие уклонов свободной поверхности (продольных и особенно поперечных) на моделях натурным данным о поймах.

Как вытекает из анализа ограниченных данных наблюдений за уклонами свободной поверхности пойм, процесс их формирования весьма сложный и в основном определяется типом и морфологией пойм.

5. Зависимости, полученные на основании модельных испытаний, имеют локальное значение; они ограничены диапазоном изменения параметров модельных испытаний.

Все это приводит к необходимости изучения процесса взаимодействия руслового и пойменного потоков и потоков в руслах с неоднородной шероховатостью по ширине в натуральных условиях.

1.3 Натурные исследования процесса взаимодействия руслового и пойменного потоков

В 1962 - 1963 и 1966 гг. ГГИ были выполнены специальные паводочные исследования на семи реках ЕТР. Результаты этих работ обобщены Д. Е. Скородумовым [19] и Ю. Н. Соколовым [20]. В 1970 г. ГГИ совместно с Институтом водных проблем Белоруссии на излучине р. Сож проведены исследования процессов взаимодействия руслового и пойменного потоков при пересечении их осей под углом 135° . Результаты этих работ обобщены И. Ф. Карасевым [11]. Помимо указанных специальных исследований, известны работы Московского гидромелиоративного института по изучению течений на пойменном массиве р. Оки, работы Р.Х.Селлина [25] на р. Бат, исследования сотрудников ГГИ на реках Поломети и Оби.

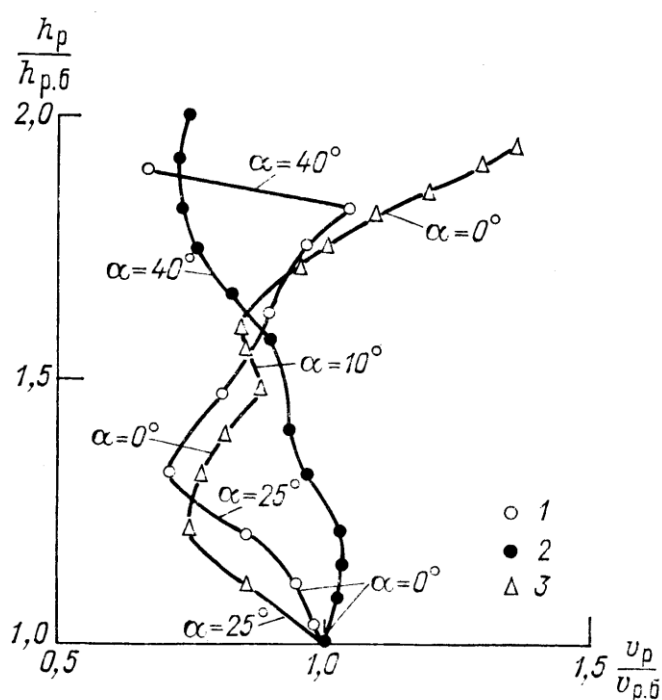
Другое направление в изучении процессов взаимодействия руслового и пойменного потоков по натурным данным основано на анализе обширных материалов паводочных измерений, проведенных на сети Росгидромета и в различных проектных организациях. Такой анализ был выполнен Барышниковым по данным измерений на 27 реках бывшего СССР [2,3,4,5] и Г. В. Железняковым [10] по материалам р. Оки.

Наиболее ценными и полными являются: исследования ГГИ 1962 - 1963, 1966 и 1970 гг. как по широте охвата, так и глубине выполненного анализа, обобщенные Д. Е. Скородумовым и Ю. Н. Соколовым, а также исследования И. Ф. Карасева [11] и Барышникова [2,3,4], основанные на данных Росгидромета.

В итоге анализа натурных материалов были получены интересные результаты, в основном подтвердившие выводы лабораторных экспериментов.

В то же время натурные исследования позволили установить в качестве фактора, определяющего значение сопротивления и характер взаимодействия руслового и пойменного потоков, морфологию русла и поймы на участке измерений и изменение их морфометрических характеристик по длине реки и с

ростом глубин в русле и на пойме. Действительно, именно характер изменения ширины долины, а следовательно, и ширины поймы, определяют положение динамической оси пойменного потока. Барышниковым [3] по данным р. Крыловки у с. Крыловка; р. Нестеровки у рзд. Таловый и р. Друть у с. Городище установлен факт изменения взаимного расположения динамических осей руслового и пойменного потоков при увеличении глубин в русле (рисунок 1.9). Как видно на этом рисунке, при увеличении значений относительных глубин за счет изменения угла α (угол пересечения динамических осей руслового и пойменного потоков) кривая зависимости $v_p/v_{p.б} = f(h_p/h_{p.б}, \alpha)$ резко изменяет свое направление, иногда даже на обратное.



Натурные данные по рекам: 1 - Нестеровка - рзд. Таловый,
2 - Крыловка - с. Крыловка, 3 - Друть - с. Городище.

Рисунок 1.9—Кривые $v_p/v_{p.б} = f(h_p/h_{p.б}, \alpha)$ при $\alpha = f(h_p/h_{p.б})$

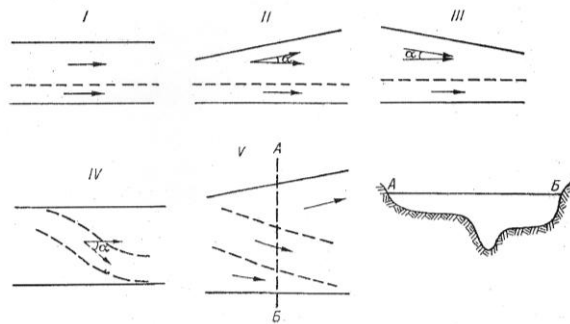
Натурные данные позволяют также установить наиболее часто встречающиеся случаи взаимного расположения геометрических осей русла и поймы, динамических осей руслового и пойменного потоков и другие

особенности натуральных водотоков и разработать рекомендации для их последующих лабораторных исследований.

Совместный анализ натуральных и лабораторных данных позволил разработать предварительную классификацию процессов взаимодействия руслового и пойменного потоков, основанную на учете особенностей морфологии русла и поймы на расчетном участке.

2 Методы расчётов средних скоростей русловых потоков, находящихся под воздействием пойменных потоков

Известно [1,2], что особенности морфологического строения участка расположения расчётного морфоствора определяют гидравлику потоков в руслах с поймами. Именно это позволило разработать типизации процессов взаимодействия русловых и пойменных потоков. В частности, в РГГМУ [1,3] была разработана типизация, основанная на учёте морфологических особенностей строения участка, расположенного ниже расчётного створа. В ней выделено пять типов взаимодействия потоков (рисунок 2.1). Как видно на рисунке, в качестве основного фактора принято расположение динамических осей взаимодействующих потоков относительно друг друга. В то же время направление динамических осей этих потоков определяется направлением геометрических осей русла и поймы. Не останавливаясь на детальном анализе этой типизации, так как она выполнена в ряде работ [2,6 и др.], отметим лишь, что средние скорости русловых потоков при воздействии на них пойменных потоков могут существенно отличаться от аналогичных, но определённых по методике, основанной на допущении о равномерности движения потоков, т.е. на основе формулы Шези.



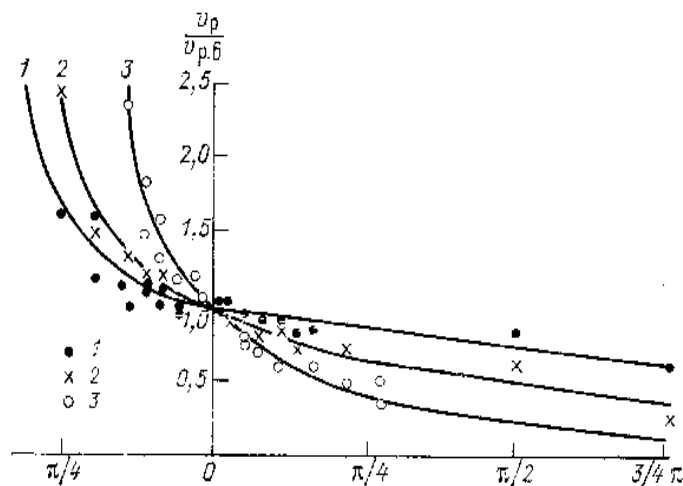
I - V - типы взаимодействия руслового и пойменного потоков.

Рисунок 2.1– Схема типизации процессов взаимодействия руслового и пойменного потоков.

Анализ натурной информации по более, чем пятидесяти рекам бывшего Советского Союза позволил получить зависимость для расчётов средних скоростей русловых составляющих потоков от средних глубин и углов α [1,5 и др.] вида $v_p/v_{p.б.} = f(h_p/h_{p.б.}, \alpha)$ (рисунок 2.2), где α – угол между динамическими осями взаимодействующих русловых и пойменных потоков. Принят положительным при схождении осей потоков, т.е. при третьем их типе, и отрицательным при расхождении осей потоков, т.е. при втором их типе; v и h – соответственно средние скорости и глубины русловых потоков; p и $p.б.$ – означают, что значения параметров относятся к русловым составляющим потоков при расчётном "р" уровне и "р.б." – уровне затопления бровки прирусловых валов.

Как видно на рисунке 2.2, средние скорости русловых потоков при изменении глубин и углов α могут увеличиваться в несколько раз при втором типе взаимодействия потоков и, наоборот, уменьшаются в разы при третьем, т.е. при вторжении пойменных вод в русловой поток. Таким образом, характер изменения средних скоростей русловых составляющих потоков, при изменении глубин и углов α зависит от особенностей морфологического строения участка расположения морфостроения. При воздействии пойменного потока изменяется

не только величина средних скоростей русловых потоков, но и средних на вертикалях скоростей. Более того, как правило, наблюдается смещение максимума этих скоростей в сторону противоположную пойме.



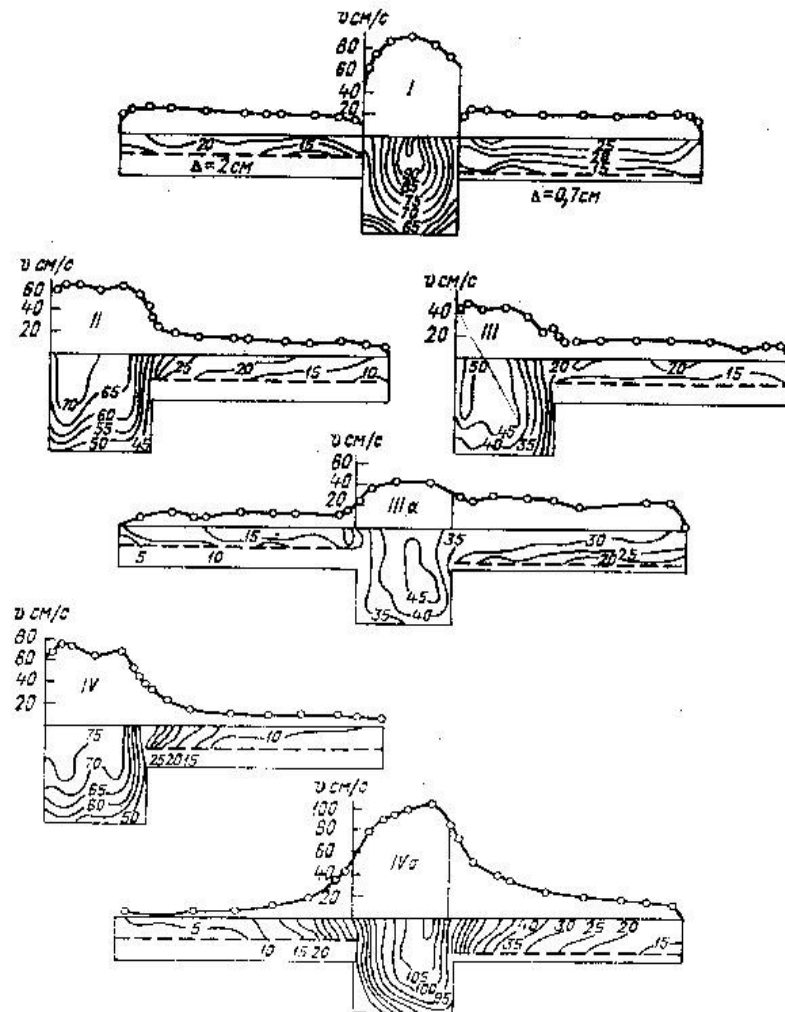
1 - $h_p/h_{p.б} = 1,10$; 2 - $h_p/h_{p.б} = 1,25$; 3 - $h_p/h_{p.б} = 1,50$

Рисунок 2. 2— Кривые $v_p/v_{p.б} = f(h_p/h_{p.б}, \alpha)$

Одним из первых это выявил В.Н. Гончаров [8] на основе анализа данных экспериментальных исследований на моделях русла с односторонними и двухсторонними поймами, выполненными из бетона (рис. 2.3). Как видно на рисунке, при первом и третьем типах взаимодействия потоков наблюдается не только уменьшение средних скоростей русловых составляющих потоков, но и смещение максимумов средних на вертикалях скоростей в сторону противоположную пойме (рисунки 2.3, II и 2.3, III). Более сложная структура скоростного поля руслового потока наблюдается при двухсторонней пойме (рисунок 2.3, III а). Хотя средняя скорость потока тоже уменьшается, но максимальная скорость находится почти по середине сечения.

Существенно отлична структура руслового потока при втором и четвёртом (по второму) типам взаимодействия потоков (рисунок 2.3, IV). При односторонней пойме (рисунок 2.3, IV) уменьшения скоростей не наблюдается. При двухсторонней пойме наблюдается смещение максимума скоростей в

сторону поймы, на которой пойменный поток движется с большими скоростями (рисунок 2.3, IVa).



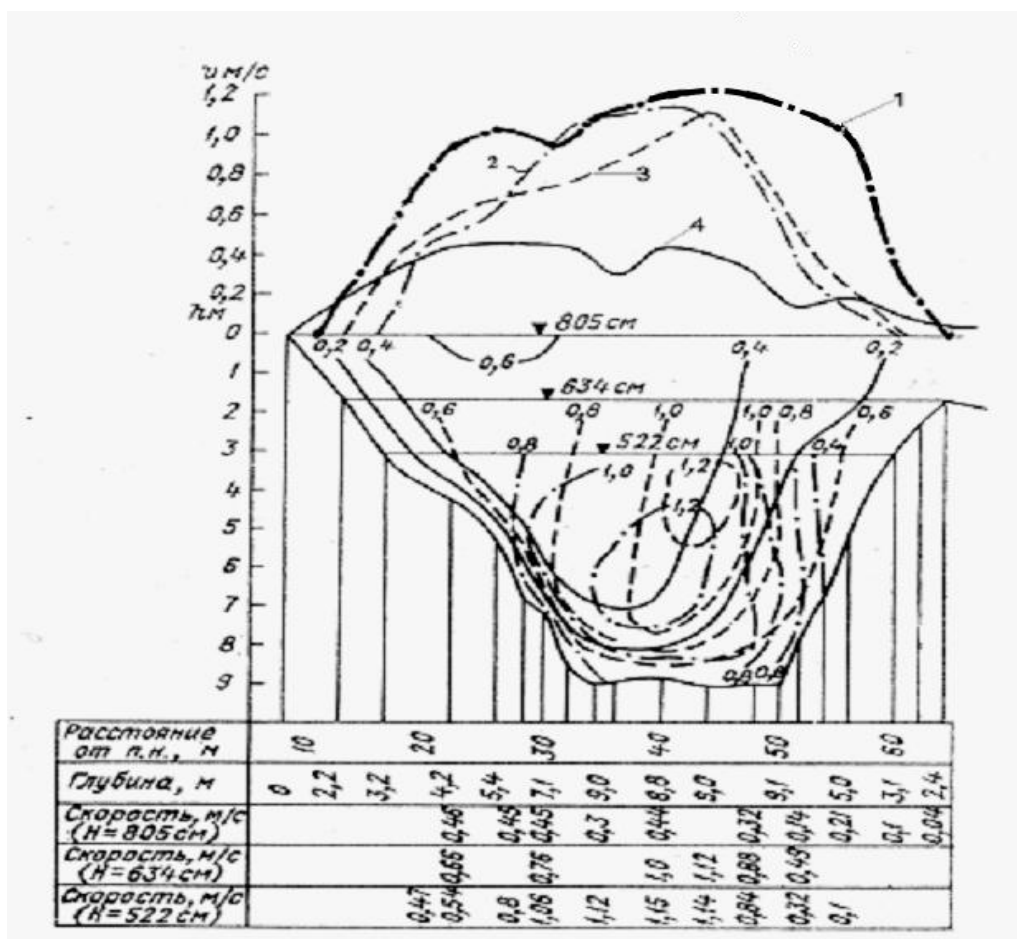
I – изолированные русло и поймы; II – первый тип взаимодействия потоков; III и IIIa – перетекание из пойм в русло; IV и IVa – перетекание из русла в поймы.

Рисунок 2.3– Поля скоростей потоков в руслах с поймами при различных типах взаимодействия (по данным экспериментов при $h_p=9\text{ см}$).

Даже предварительный анализ лабораторных данных позволяет считать, что под воздействием пойменного потока происходит трансформация скоростного поля руслового потока. Более чётко эта трансформация проявляется при анализе, к сожалению, ограниченного объёма натурных

данных. [2,3]. Анализ этих данных позволил установить, что на малых и средних реках трансформация скоростного поля руслового потока происходит по всей его ширине, а на больших, таких как Амур, Обь, Волга и другие она затрагивает только часть припойменного руслового потока [2,3].

В качестве примера рассмотрим трансформацию поля скоростей руслового потока под воздействием пойменного потока при большом угле схождения динамических осей потоков ($\alpha \approx 50^\circ$) (рисунок 2.4).



1 – расчетная кривая по формуле Шези при уровне 805 см; данные натурных измерений 1968 г при уровнях: 2 - 522 см, 3 - 634 см, 4 - 805 см

Рисунок 2.4–Профиль поперечного сечения с изотаксами и кривыми распределения средних на вертикалях скоростей по ширине гидроствора р. Ветлуги - д. Быстри.

Как видно на рисунке 2.4, где приведены кривые распределения средних на вертикалях скоростей русловой составляющей потоков, полученной как по данным измерений при различных, в том числе и наибольших, уровнях, так и на

основе результатов расчётов по методике А.В. Караушева [7], основанной на формуле Шези. Последняя кривая резко в сторону завышения отклоняется от аналогичной, полученной по данным измерений при наивысшем уровне (805 см). Величины этих отклонений достигают 370% .

3 Анализ натурных данных

По данным 23 рек (таблица 3.1), расположенных в различных физико-географических зонах бывшего СССР, был выполнен анализ деформаций скоростных полей руслового потока под воздействием пойменного. Исходным материалом для анализа являлись книжки для измерения расходов воды, планы участков постов и профили поперечных сечений по гидростворам до незатопляемых отметок. По планам участков устанавливался тип взаимодействия потоков русла и поймы. При этом принималось, что положению геометрических осей русла и поймы должно соответствовать направление динамических осей потоков. Из 26 обследованных объектов 11 были отнесены ко II типу, 5 - к III типу, 6 - к IV типу и 4 - к V типу взаимодействия руслового и пойменного потоков.

Для анализа трансформации скоростного поля по данным наблюдений были построены профили поперечного сечения по гидростворам, на которые нанесены изотакхи при 2 - 3 расчетных уровнях воды. Эти уровни выбирались в зависимости от характера изменения отметок дна русла и поймы. Один из уровней соответствовал межени, т. е. выбирался несколько ниже уровней выхода воды на пойму. Второй уровень выбирался равным или несколько выше отметки бровки прируслового вала, а третий - максимальным из наблюдаемых. При сложной морфометрии (две поймы, составное сечение и пр.) намечались дополнительные расчетные уровни.

Наиболее четко основные характеристики II типа взаимодействия руслового и пойменного потоков отражены на р. Луге у д. Воронино (рисунок 3.1) и у г. Луга и р. Пьяне у д. Камкино (рисунок 3.2). Участок измерений на р.

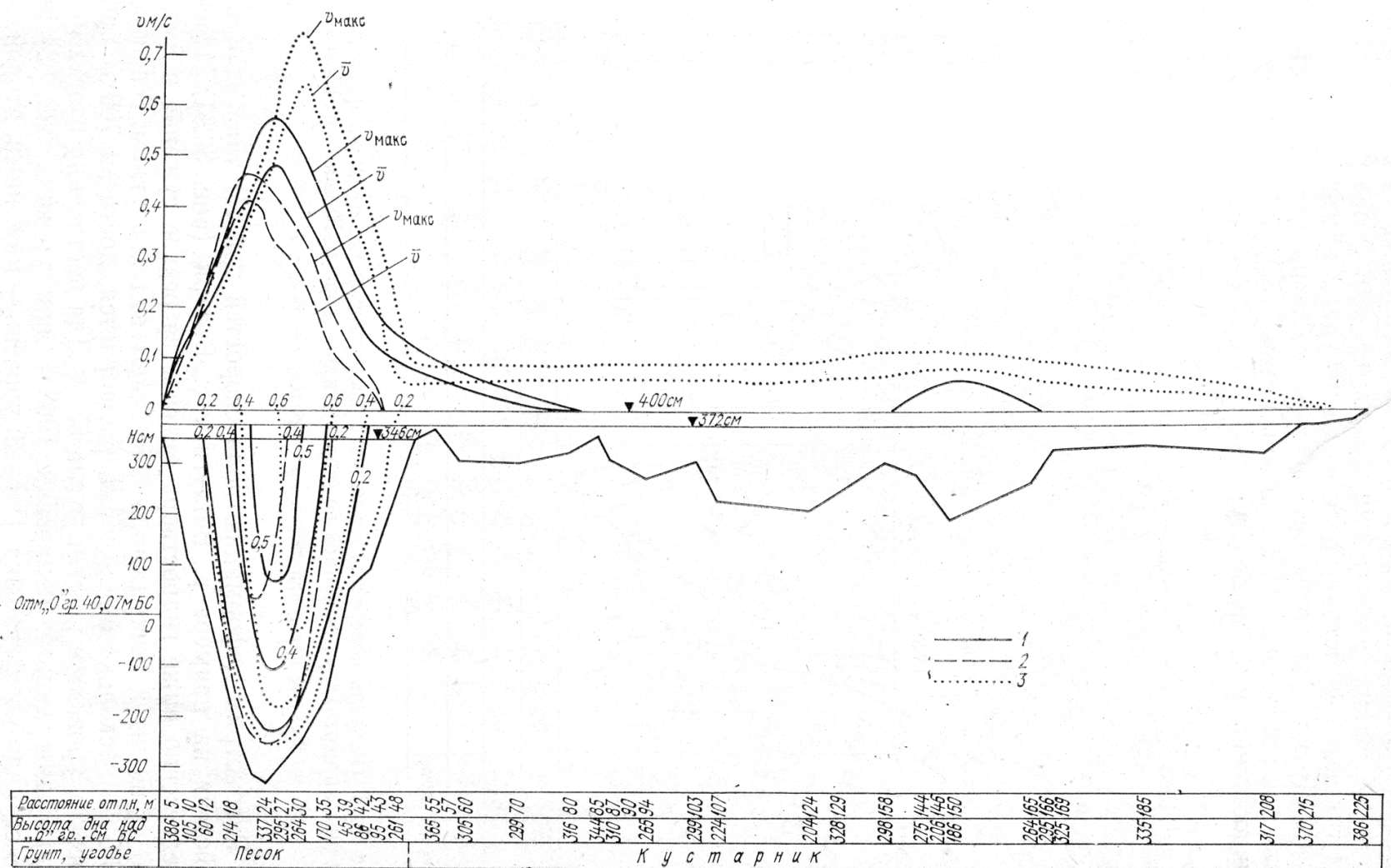
Луге в районе д. Воронино расположен выше дамбы, пересекающей пойму и имеющей отверстия для пропуска паводочных вод. При высоких уровнях дамба создает подпор. На р. Луге в качестве расчетных для построения поля скоростей приняты следующие уровни над нулем графика: 346 см, при котором русловой поток отделен от пойменного прирусловым валом, 372 см—несколько выше отметки бровки прируслового вала и максимальный - 400 см.

Таблица 3.1 – Сведения о расчетных уровнях и типах взаимодействия руслового и пойменного потоков

Река — пост	Год	Расчетный уровень, см	Характеристика уровня	Тип взаимо- действия	Характер трансформаций поля скоростей в русле (под влия- нием поймы)	$\frac{B_p}{B_r}$
Луга — Воронино	1966	346	Ниже бровки	II	Рост скоростей с уров- нем	3,4
		372	На уровне бровки			
		400	Максимальный			
Луга — Луга	1966	323	Ниже бровки	II	Рост скоростей	0,5
		390	На бровке			
		447	Максимальный			
Луга — Толмачево	1977	270	Ниже бровки	IV—III	Уменьшение скоростей. Выравнивание по шири- не	1,25
		389	Выше бровки, ниже ле- вой поймы			
		450	Выше бровки и л. п.			
Оредеж — Моровино	1966	532	Максимальный	IV—III	Уменьшение скоростей. Смещение максимума в сторону от поймы Выравнивание по ши- рине	3,1
		386	Уровень бровки			
		684	Максимальный			
Тигода — Любань	1966	374	Ниже бровки	IV—III	Уменьшение скоростей. Выравнивание эпюры по ширине	6,5
		430	Выше бровки			
		609	Максимальный			
Исlochь — Боровиков- щина	1970	186	Ниже бровки	III	Сначала смещение мак- симума от поймы и уменьшение его, за- тем рост скоростей и выравнивание эпюры	0,9
		318	Уровень бровки			
		378	Максимальный			
Рыбчанка — Радощко- вичи	1970	161	Уровень бровки	II	Рост скоростей	11,0
		218	Максимальный			
Илия — Владыки	1970	142	Ниже бровки	II	Рост скоростей при мак- симуме, смещение максимума скоростей в сторону левой пой- мы	2,2 1,8
		152	Левая затоплена, над бровкой правой			
		296	Максимальный			

Вига — Шартаново	1966	336	Ниже бровки прирусло- вого вала	III	Рост скоростей, смеще- ние максимума скоро- стей в русле к проти- воположному берегу	3,0
		710	Пойма затоплена пол- ностью			
Ветлуга — Быстри	1968	522	Ниже бровки	III	Резкое уменьшение ско- ростей Смещение максимума скоростей от поймы	12,5
		634	Уровень бровки (потоки разделены)			
		805	Максимальный, пойма затоплена			
Ветлуга — Дубники	1957	652	Несколько выше уровня бровки	III—I	Небольшое сужение поймы по длине реки	8,0
		738	Максимальный			
Пьяна — Камкино	1953	666	Затоплена правая пойма	IV—II	Интенсивный рост ско- ростей	5,3
		529	Ниже бровки			
Крыловка — Крыловка	1966	244	Ниже бровки	V		1,16 3,82 31,0
		297	Затоплена правая пойма			
		318	Уровень бровки левой поймы			
		505	Максимальный уровень			
Нестеровка — Таловый	1968	420	Ниже бровки	V	Рост скоростей	3,5 14,0 16,3 39,0
		460	Затоплена часть левой поймы			
		477	Выше бровки правой поймы			
		512	Выше бровки правой поймы			
		549	Присоединился большой отсек поймы			

Конда — с. Чантырья	1966	487 654 719	Ниже бровки Бровка затоплена Максимальный	III	Уменьшение скоростей, смещение максимума скоростей от поймы
Вагай — Нововыиграш- ная	1957	282 699 818	Ниже бровки Заполнена небольшая левая пойма Максимальный, зато- плены обе поймы	V—II	Рост скоростей
Аремзянка — Чукманка	1957	302 751 802	Меженный Над бровкой правой поймы Обе поймы затоплены	IV—III	Рост скоростей, смеще- ние максимума от ле- вой поймы
Урюп — Подуторник	1974	390 423		II	Рост скоростей
Ольшанка — Богданово	1968	114 167	Ниже бровки Выше бровки	II	Рост скоростей
Кеть — с. Максимкин Яр	1974	556 663	Ниже бровки Выше бровки	V—II	Рост скоростей
Бобр — Куты	1973	166 202	Ниже бровки Выше бровки	IV—III	Уменьшение скоростей, смещение максимума от поймы
Тяжин — Ст. Тяжин	1974	560 696	Ниже бровки Выше бровки	III	Рост скоростей, смеще- ние максимума к ле- вой пойме
Янка — Куштали	1970	149 223	Ниже уровня бровки Максимальный	II	Небольшой рост скоро- стей. Интенсивное выравнивание по ши- рине
Словечна — Кузьмичи	1970	242 246 272	Ниже бровки Уровень бровки Максимальный	II	Незначительный рост, а затем стабилизация скоростей
Ясельда — Береза	1970	449 570	Ниже бровки Пойма затоплена	II	Интенсивный рост ско- ростей
Маревка — Покровка	1957	302 412	Ниже бровки Пойма затоплена	V—III	Рост скоростей, смеще- ние максимума от поймы



Данные измерений 1966 г. при уровнях: 1 - 372 см, 2 - 346 см, 3 - 400 см.

Рисунок 3.1.— Профиль поперечного сечения с изотаксами и кривыми распределения средних на вертикалях скоростей по ширине гидроствора р. Луги - д. Воронино.

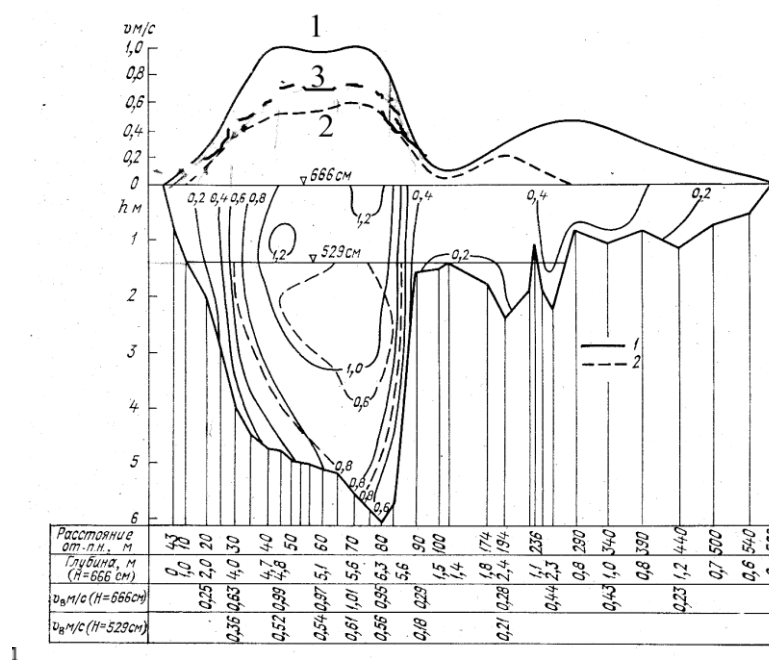
При последних двух уровнях потоки русла и поймы, сливаясь, образуют единый транзитный поток. Как видно на рисунке 3.1, наблюдается постепенное увеличение скоростей с ростом уровней воды, но в противоположность экспериментальным данным максимум скоростей в русле не смещается в сторону поймы.

Участок измерений на р. Пьяне расположен в 250 м ниже крутого поворота реки (на 45°) и характеризуется расширением левобережной поймы, имеющей малую шероховатость. Этот участок также можно отнести к IV типу взаимодействия руслового и пойменного потоков. Такая морфология участка приводит к тому, что при высоких уровнях массы жидкости из русла поступают на пойму, увеличивая скорости течения на ней, тем самым еще больше уменьшают коэффициент шероховатости поймы ($n_{\text{п}} = 0,022$). Такое уменьшение значения коэффициента шероховатости поймы на ее прирусловом участке обусловлено вторжением на неё поверхностных слоев руслового потока, имеющих скорости, значительно превышающие скорости пойменного потока. Фактически движение при этом будет неравномерное, неустановившееся. Более того, с переменным по длине расходом воды. Однако расчёт коэффициента шероховатости выполняется на основе формулы Шези, т.е. при допущении равномерности движения, что не соответствует реальным условиям.

По данным паводочных измерений 1953 г. на р.Пьяне при уровнях 666 и 529 см были построены поля изотак и эпюры распределения средних на вертикалях скоростей по ширине русла и поймы. Уровень 529 см несколько превышал отметку бровки прируслового вала, а уровень 666 см (максимальный из наблюдаемых) соответствовал затоплению поймы шириной 470 м. Как видно на рис. 3.2, отмечается значительный рост скоростей при увеличении уровня воды. Максимальные и средние на вертикалях скорости увеличились почти в 2 раза - соответственно от 0,73 до 1,21 и от 0,61 до 1,09 м/с. Однако смещение максимума скоростей в русле к берегу, противоположному пойме, также не наблюдается.

Следует отметить, что для всех 11 исследованных рек характерным является увеличение местных и средних на вертикалях скоростей, хотя интенсивность их изменения зависит от местных условий и различна для рассматриваемых рек.

Это в целом соответствует выводам, полученным на основании лабораторных экспериментов. В то же время уменьшения скоростей при затоплении поймы (II тип взаимодействия потоков) на натуральных объектах не обнаружено. Другим отличием натуральных данных от экспериментальных является отсутствие смещения максимума скоростей в русле к противоположному пойме берегу.



Данные измерений 1953 г. при уровнях: 1 - 666 см, 2 - 529 см,
3 – расчетная кривая.

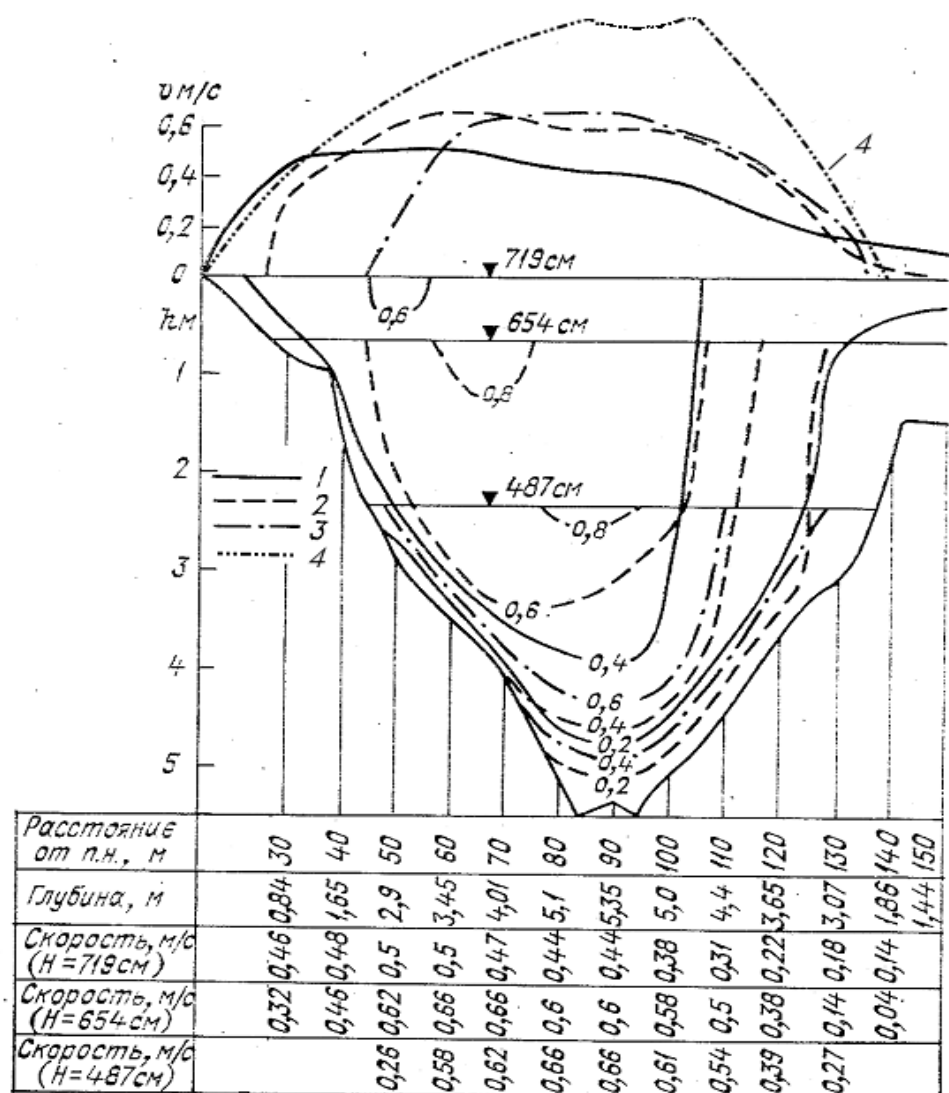
Рисунок 3.2–Профиль поперечного сечения с изотопами и кривыми
распределения средних на вертикалях скоростей по ширине гидроствора р.

Пьяна - д. Камкино.

Рассмотрим деформацию поля скоростей при III типе взаимодействия на примере р. Ветлуги у с. Быстри (рис. 2.4). Непосредственно ниже гидроствора отмечается резкое сужение поймы, что приводит к поступлению пойменных вод под углом, близким к 50^0 , а несколько ниже пойма расширяется, достигая 700 м при высоких уровнях и ширине русла 65 м. Для построения изоток использованы данные измерений 1968 г. при уровнях 522, 634 и 805 см над нулем графика. Первый уровень - меженный, второй - соответствует отметке бровки прируслового вала; третий - максимальный, при котором производились измерения скоростей и наблюдался единый поток в русле и на пойме.

Следует отметить, что при уровне 634 см стока воды по пойме не было из-за полного заполнения ее снегом и льдом. Поэтому влияние пойменного потока на русловой отсутствовало. Динамическая ось руслового потока располагалась у правого пойменного берега. Наибольшая местная скорость достигала 1,20 м/с, максимальная из средних на вертикали - 1,12 м/с, средняя скорость потока в русле - 0,76 м/с. С ростом уровня на 171 см, т. е. при уровне 805 см, наблюдается резкое уменьшение скоростей руслового потока. Так, максимальные скорости уменьшаются до 0,60 м/с, а наибольшие из средних на вертикали - до 0,46 м/с, средняя скорость руслового потока равна 0,33 м/с.

Таким образом, скоростные характеристики руслового потока уменьшаются более чем в 2 раза, а следовательно, уменьшается и расход воды. Одновременно отмечается резкое смещение максимума скоростей к левому, противоположному пойме берегу. В то же время существенно увеличиваются скорости потока на пойме: максимальные до 0,40 м/с, а средние на вертикалях до 0,36 м/с. Средние на вертикалях скорости выравниваются по ширине потока. Однако над прирусовым валом значения скоростей малы (0,05 м/с), т. е. наблюдаются две динамические оси потока - одна в русле, другая - на пойме, разделенные зоной малых скоростей.



Данные измерений 1966 г. при уровнях: 1 - 719 см, 2 - 654 см, 3 - 487 см.

Рисунок 3.3— Профиль поперечного сечения с изотопами и кривыми распределения средних на вертикалях скоростей по ширине гидроствора р. Конда - д. Чантырья.

Аналогичная картина имеет место и на других реках, например на р. Конде у с. Чантырья (рис. 3.3), на р. Бобр у с. Куты и др. Однако на ряде рек этой группы (табл. 3.1), где углы схождения динамических осей потоков русла и поймы малы, наблюдается существенно отличная картина изменения скоростей руслового потока под влиянием пойменного. В качестве примера могут быть приведены р. Ветлуга у д. Дубники (рис. 3.4) и р. Тяжин у пос. Старый Тяжин. На этих реках под влиянием пойменного потока резко замедляются

(даже стабилизируются) скорости руслового потока, хотя уровень воды увеличивается. Эпюра распределения скоростей по ширине потока выравнивается (р. Ветлуга - д. Дубники), максимум скоростей выражен не резко. Особенно это характерно для рек с двусторонней поймой.

В целом основные черты трансформации скоростного поля руслового потока под влиянием пойменного, установленные экспериментальным путем при этом типе взаимодействия, в натуре прослеживаются достаточно четко. Однако морфологические особенности отдельных водотоков оказывают существенное влияние, значительно изменяя скоростное поле русловых потоков.

При проектировании и строительстве различных гидротехнических сооружений (например, мостов) в качестве одной из основных расчетных характеристик является средняя на вертикали скорость руслового потока. В соответствии с Наставлением НИМП-72 расчет этих скоростей выполняется по формулам Шези – Маннинга или Шези – Павловского для наивысших уровней воды (1-ной % или 0,1-ной % обеспеченности). Исходя из этого, были выполнены расчеты этих скоростей по рекомендованной методике, основанной на формуле Шези.

Результаты расчетов и их сравнение с данными измерений, в частности приведены в таблице 3.2.

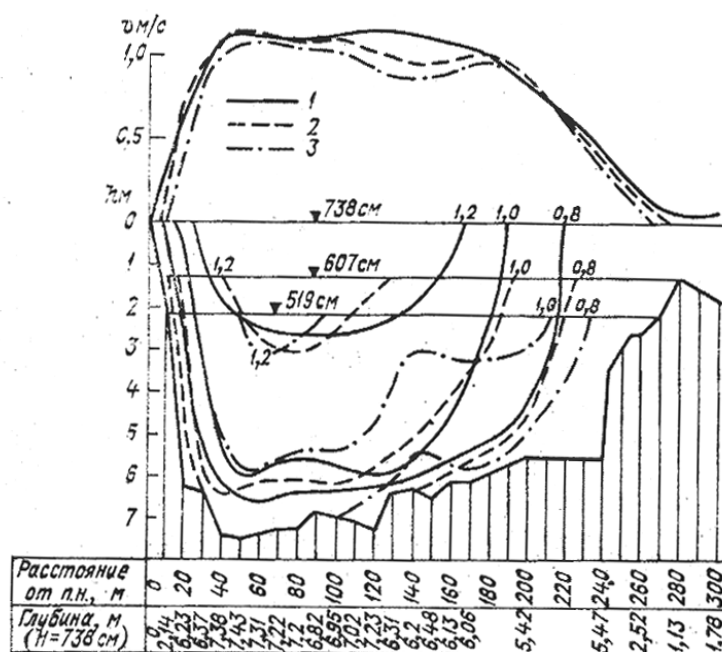
Таблица 3.2– Расчетные и измеренные значения средних на вертикалях скоростей по р. Ветлуге – д. Дубники по ширине руслового потока

Расстояние от п.н., м		20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240
Глубина, м		6,23	7,38	7,31	7,20	6,95	7,23	6,20	6,13	5,74	5,42	5,42	5,47
Скорости на вертикалях м/с	Измеренные	0,65	1,12	1,0	1,10	1,12	1,14	1,13	1,03	0,98	0,92	0,70	0,98
	Расчётные	1,18	1,32	1,31	1,30	1,26	1,30	1,18	1,17	1,11	1,07	1,07	1,08
$\Delta v = v_p - v_{изм}$		0,53	0,20	0,21	0,20	0,14	0,16	0,05	0,14	0,13	0,15	0,37	0,61
$\Delta v/v_{изм} \%$		81,5	17,9	19,1	18,2	12,5	16,1	4,4	13,6	13,3	16,3	52,9	127

Как вытекает из анализа данных, приведенных в этой таблице, погрешности расчетов значительно превышают допустимые пределы, достигая в ряде случаев сотни и более процентов. Действительно на р. Ветлуге – д. Дубники наибольшая погрешность расчетов составляет 127 % при ее средней величине 37,5 %. При этом установлена четкая зависимость величины погрешности от значения угла α .

При втором типе взаимодействия потоков величины погрешностей несколько меньше, чем при третьем. Однако и в этом случае наблюдается четкая их зависимость от угла α .

Из этого вытекает необходимость введения поправочных коэффициентов при использовании методики, основанной на формуле Шеши, за счет значений угла α .



Данные измерений 1957 г. при уровнях: 1 - 738 см, 2 - 607 см, 3 - 519 см.

Рисунок 3.4 –Профиль поперечного сечения с изотаксами и кривыми распределения средних на вертикалях скоростей по ширине гидроствора р. Ветлуга - д. Дубники.

Рассмотрим деформацию поля скоростей руслового потока при IV типе взаимодействия потоков. Это наиболее общий и сложный тип. Обычно поля

скоростей при этом типе близки к III типу, но возможны случаи, когда наблюдается деформация поля скоростей руслового потока под влиянием пойменного аналогично II типу. С такой ситуацией мы встретились, анализируя данные специальных наблюдений, выполненных экспедицией ГГИ на реках Аган и Ватинский Еган. К сожалению, детальные данные по этим объектам у нас отсутствуют. К этому типу относится и р. Пьяна.

Характер деформации скоростного поля при данном типе взаимодействия зависит как от характера изменения ширины поймы по длине реки, так и от расположения гидроствора относительно излучины реки. В качестве примера приведем деформацию скоростного поля руслового потока под влиянием пойменного на р. Оредеж у с. Моровино и р. Луге у пос. Толмачево (рисунок 3.5). В обоих случаях гидростворы расположены на относительно прямолинейных участках в вершине излучины. В 100 - 200 м выше гидростворов русла рек поворачивают под углом, близкими к прямому, и располагаются почти параллельно гидроствору. Поймы резко сужаются вниз по течению. При высоких уровнях воды глубины на поймах достигают 5 - 7 м, а пойменные потоки пересекают русловые под углом 20 - 40° и становятся ведущими. Такой тип взаимодействия приводит к существенным трансформациям скоростного поля руслового потока. Для анализа использованы данные наблюдений 1966 г. на р. Оредеж у с. Моровино ($\alpha \approx 40^\circ$), при уровне 386 см, соответствующем отметке бровки прируслового вала, и уровне 684 см, максимальном, при котором производились измерения скоростей. При увеличении уровней на 298 см отмечается резкое уменьшение как максимальных (от 0,98 до 0,34 м/с), так и наибольших из средних на вертикалях скоростей (от 0,74 до 0,27 м/с). Максимум скоростей руслового потока немного смещается к противоположному пойме берегу, а на пойме возникает второй максимум со скоростью 0,37 м/с, превышающей русловой. Эпюра скоростей выравнивается по всей ширине потоков русла и поймы. Однако в районе прируслового вала скорости потока остаются малыми.

На р. Луге у пос. Толмачево (рисунок 3.5) использованы данные наблюдений 1977 г. при четырех уровнях: 270 см, соответствующем отметке бровки первого прируслового вала; 389 см - несколько выше бровки основного прируслового вала, но ниже значительного расширения русла с противоположной пойме стороны, 450 см - выше указанного расширения и 532 см - максимальном уровне, при котором измерялись скорости течения. При уровне 389 см определяющим был русловой поток, а для уровней 450 и 532 см - пойменный. Такое большое количество расчетных уровней обусловлено сложным профилем поперечного сечения русла и поймы по гидроствору, наличием значительных расширений русла, находящихся на разных отметках и позволяющих рассматривать русло как сложносоставное. На рис. 3.5 показаны как изотакхи, так и кривые распределения средних и максимальных скоростей на вертикалях по ширине потока при всех расчетных уровнях воды. Как видно на этом рисунке, наблюдается существенное уменьшение максимальных и средних на вертикалях скоростей в русле с ростом уровней и одновременный рост скоростей на пойме (см.таблицу 3.3).

Это приводит к выравниванию эпюры распределения скоростей по ширине потоков русла и поймы, хотя резкие переломы поперечного профиля отражаются и на распределении скоростей.

При данном типе взаимодействия, как показывает проведенный анализ, поля скоростей сложно деформируются, характер этой деформации близок к деформации при III типе. Однако в ряде случаев отмечаются деформации полей скоростей и по II типу, что в целом определяется характером изменения ширины поймы по длине реки, расположением гидроствора на различных участках излучины и другими характеристиками.

Таблица 3.3—Сведения о максимальных и наибольших из средних на вертикалях скоростей р. Луги у пос. Толмачево в 1977 г.

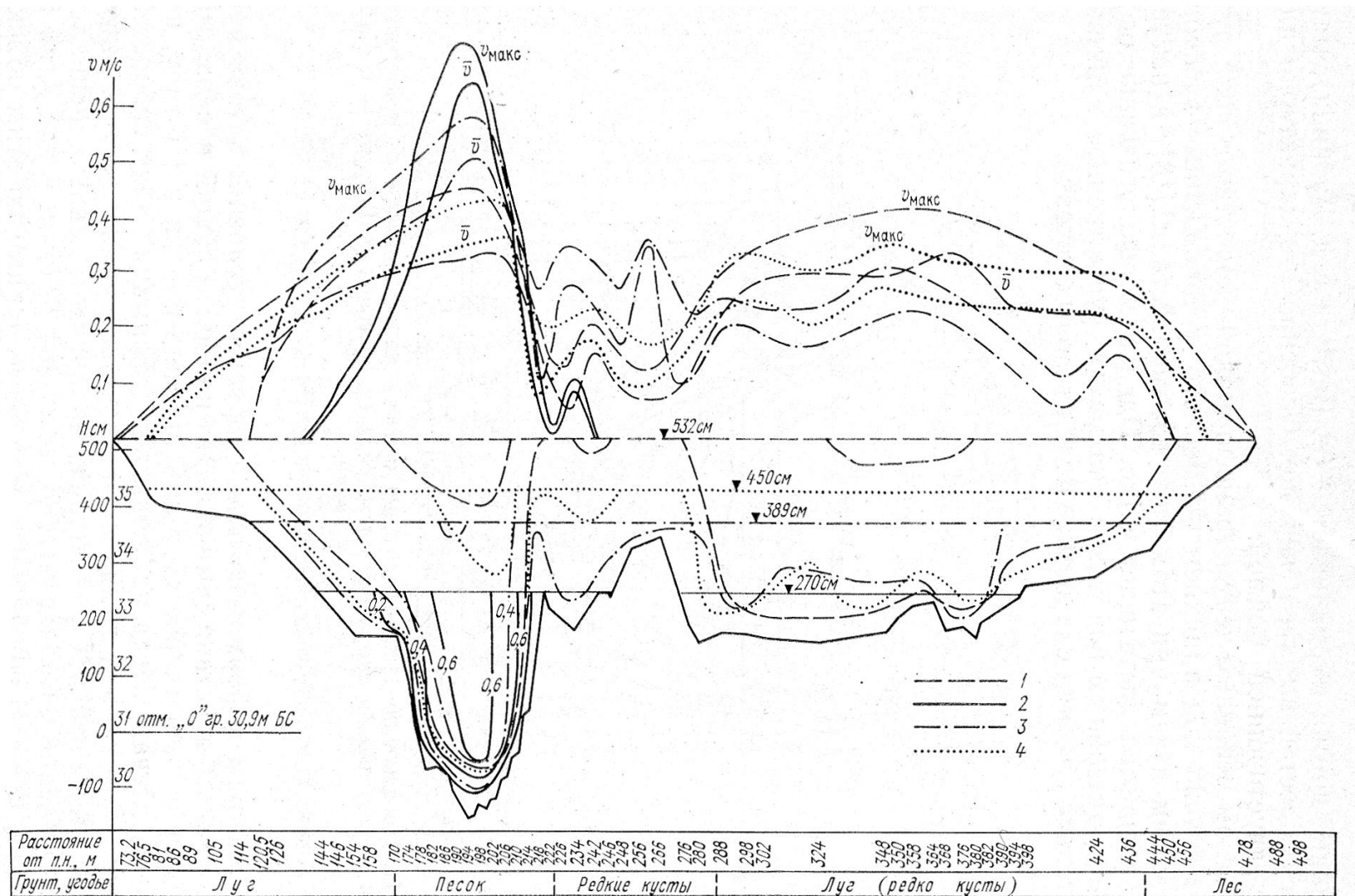
Расчетный уровень, см	Скорость потока в русле		Скорость потока на пойме	
	максимальная	наибольшая из средних на вертикали	максимальная	наибольшая из средних на вертикали
270	0,72	0,65	-	-
389	0,58	0,51	0,32	0,24
450	0,44	0,37	0,36	0,28
532	0,45	0,34	0,42	0,34

Особым случаем является V тип взаимодействия потоков, протекающих в руслах с двумя разновысотными поймами, а также с одно - и двусторонней одинаковой высоты поймой, у которой с ростом уровней ее расширение по длине сменяется сужением или, наоборот, сужение - расширением.

Наиболее типичным примером является р. Нестеровка у рзд. Таловый, где имеется двусторонняя сложного строения пойма, и р. Крыловка у с. Крыловка с односторонней поймой.

Для р. Нестеровки у рзд. Таловый рассмотрены данные о полях скоростей при уровнях 450, 477, 512 и 549 см и данные о распределении средних на вертикалях скоростей по ширине русловой части потока дополнительно к указанным при уровнях 400 и 420 см, при которых производились измерения расходов воды (рисунок 3.6).

Уровень 400 см предшествует уровням выхода воды на пойму. Наибольшая из средних на вертикали скорость находится у левого берега. Эпюра скорости выровнена по ширине потока. При $H = 420$ см, соответствующем затоплению левобережной поймы ниже створа измерений, эпюра распределения средних на вертикали скоростей по ширине руслового потока близка к аналогичной для $H = 400$ см, но наибольшая скорость смещена к противоположному затопляемой пойме берегу.



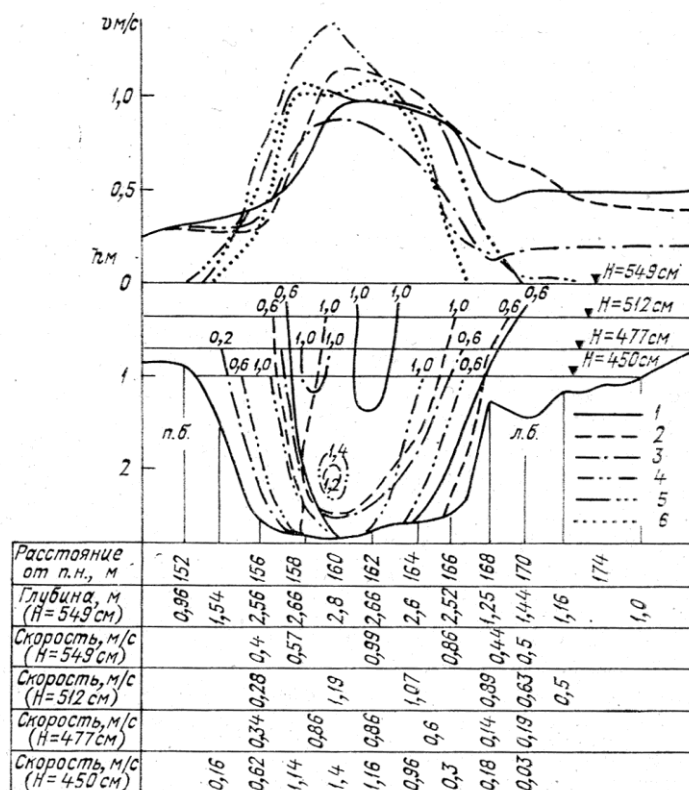
Данные измерений 1977 г. при уровнях: 1 - 532 см, 2 - 450 см, 3 - 389 см, 4 — 270 см.

Рисунок 3.5.— Профиль поперечного сечения с изотопами и кривыми распределения средних на вертикалях скоростей по ширине гидроствора р. Луга - пос. Толмачево.

При $H = 450$ см вода затопливает значительное левобережное расширение русла ($0,7B_p$) и достигает бровки прируслового вала правосторонней поймы. При этом уровне средние на вертикалях скорости резко возрастают. Наибольшая из них изменяется от 1,07 до 1,40 м/с.

Аналогичная картина распределения скоростей наблюдается и при следующем расчетном уровне 477 см, при котором происходит затопление правосторонней поймы на ширину, равную 3,5 ширинам русла. С левой стороны к ранее затопленному расширению русла подключается довольно широкая пойма (около семи ширин русла) с двумя протоками. Это приводит к выравниванию эпюры скоростей по ширине руслового потока и уменьшению их значений. Наибольшая скорость на вертикалях уменьшается от 1,40 до 0,83 м/с. Максимальная измеренная скорость потока уменьшается от 1,45 до 1,03 м/с.

При следующем уровне (512 см) происходит лишь небольшое расширение лево- и правосторонней пойм. Это приводит к небольшому увеличению средних скоростей, наибольшая из которых возрастает от 0,83 до 1,13 м/с, и некоторому смещению ее к правому берегу. Наибольшие местные скорости также увеличиваются от 1,03 до 1,20 м/с.



Данные измерений 1968 г. при уровнях: 1 - 549 см, 2 - 512 см, 3 - 477 см, 4 - 450 см, 5 - 420 см, 6 - 400 см.

Рисунок 3.6—Профиль поперечного сечения с изотаксами и кривыми распределения средних на вертикалях скоростей по ширине гидроствора р.

Нестеровки – рзд. Таловый.

Несмотря на то что шероховатость левой поймы значительно больше (лес), чем правой (луг), происходит смещение динамической оси потока в сторону правой, обусловленное значительно большей шириной правобережной поймы на участке измерений. При этом уровне основным ведущим становится пойменный поток.

При наивысшем уровне 549 см продолжается дальнейшее затопление левой поймы. К ранее затопленной подключается значительный ее отсек шириною немного меньше 30 ширин русла, что вновь приводит к уменьшению скоростей руслового потока.

Наибольшая средняя на вертикали скорость уменьшается от 1,13 до 0,99 м/с. Местные скорости вновь существенно уменьшаются от 1,20 до 0,99 м/с.

Продолжается дальнейшее смещение динамической оси потока в сторону левобережной поймы, обусловленное морфологией поймы и русла на участке измерений. Второй максимум эпюры скоростей находится почти над бровкой прируслового вала левой поймы. Наблюдается постепенное выравнивание скоростей по ширине поймы.

Таким образом, отмечается увеличение скоростей руслового потока с ростом уровней от 420 до 460 см, затем их уменьшение при росте уровня до 477 см, сменяемое дальнейшим ростом скоростей до уровня 512 см и резким их уменьшением до уровня 549 см. Следовательно, при увеличении уровня воды происходит существенное изменение характера распределения морфометрических характеристик поймы и русла по длине реки, вызывающее троекратную смену знака производной $\partial v / \partial h$, что является свидетельством определяющего влияния морфологии русла и поймы на гидравлику потока при пропуске паводков.

Аналогичные расчеты по оценке методики, основанной на формулах Шези – Маннинга или Шези – Павловского, были выполнены для рек V типа взаимодействия потоков. На рисунке 3.1 приведены кривые распределения средних на вертикали скоростей, полученные по данным измерений (1 – 6), а результаты расчётов приведены в таблице 3.3.

Расчетные данные резко отличаются от натурных, которые ощущают сильное воздействие эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков. В основном данные на 90 – 310 % отличаются в сторону завышения от натурных данных (табл. 3.3). Следует отметить, что расчет основывался на коэффициенте $k = v/h^{2/3}$, определяемом по данным наблюдений в русловой части потока до уровня выхода воды на пойму. Этот коэффициент изменяется в довольно широких пределах (от 0,5 до 0,96) в зависимости от местоположения скоростной вертикали. Такие результаты еще раз свидетельствуют о необходимости разработки методики расчетов скоростей, учитывающих эффект взаимодействия потоков.

Таблица 3.3–Измеренные и расчетные значения средних на вертикалях скоростей по р. Нестеровки – рзд. Таловый по ширине руслового потока

Расстояние от п.н., м		30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
Глубина, м		0,84	1,65	2,90	3,45	4,01	5,10	5,35	5,00	4,40	3,65	3,07	1,86
Скорости на вертикалях м/с	Измеренные	0,46	0,48	0,50	0,50	0,47	0,44	0,41	0,38	0,31	0,22	0,18	0,14
	Расчётные	0,31	0,49	0,71	0,80	0,88	1,04	1,07	1,02	0,94	0,82	0,74	0,53
$\Delta v = v_p - v_{изм}$		0,15	0,01	0,21	0,30	0,41	0,60	0,66	0,64	0,63	0,60	0,56	0,39
$\Delta v/v_{изм} \%$		32,6	2,1	42,0	60,0	87,2	136	161	168	203	273	311	279

Характер трансформации поля скоростей р. Крыловки у с. Крыловки при уровнях 505, 383, 318 и 266 см представлен на рисунке 3.7.

Профили поперечного сечения с изотаксами и кривыми распределения средних скоростей на вертикалях по ширине гидроствора построены и использованы для анализа также и по остальным рекам, указанным в табл. 3.3.

Таким образом, анализ деформаций полей скоростей руслового потока под влиянием пойменного, проведенный по данным наблюдений на 26 гидростворах, расположенных на 23 реках, позволяет сделать следующие выводы.

1. Морфологическое строение русла и поймы на участке измерений и его изменение по длине реки определяют тип взаимодействия руслового и пойменного потоков.

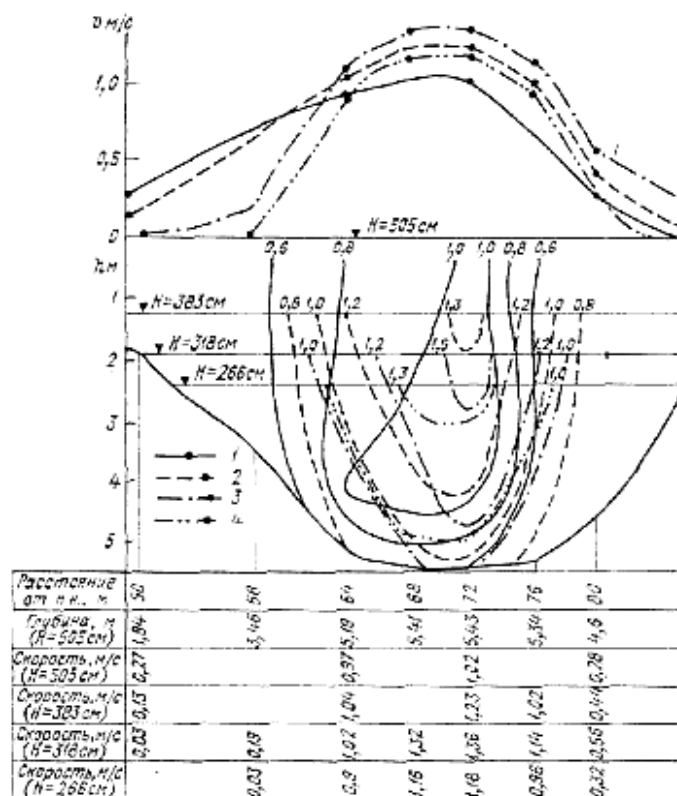
2. Из четырех типов взаимодействия руслового и пойменного потоков, установленных по данным экспериментов на идеализированных моделях, в природных условиях нами исследованы только три. Первый тип, характеризующийся параллельностью осей руслового и пойменного потоков, на натуральных реках наблюдается крайне редко, что объясняется изменением ширин и других морфометрических характеристик русла и поймы по длине реки. На ряде гидростворов сети Росгидромета наблюдается близкий к I типу

взаимодействия потоков характер изменения скоростей с увеличением уровней воды.

3. Характер изменения скоростей руслового потока при II - IV типах взаимодействия близок к установленному экспериментальным путем и заключается в значительном увеличении градиентов скоростей при отметках уровней, превышающих отметки бровки прирусловых валов. Однако морфологическое строение русел и пойм вносит в него существенные изменения и в значительной степени определяет форму и положение изоток. Наиболее сложные деформации поля скоростей происходят при IV и V типах взаимодействия потоков.

4. При V типе взаимодействия потоков, не исследованном в лабораторных условиях, характер трансформации поля скоростей целиком и полностью определяется изменением морфометрических характеристик поймы и русла как по длине реки, так и при изменении уровня воды. В последнем случае обычно происходит смена направления динамических осей руслового и пойменного потоков с изменением уровня воды, приводящая к значительно более сложной, чем при всех предыдущих типах взаимодействия потоков, трансформации полей скоростей.

5. Нецелесообразно располагать гидростворы ниже излучин, в местах сужения пойм и на участках с разновысотными поймами, ибо это приводит к резким деформациям полей скоростей в русловой части потока.



Данные измерений 1966 г. при уровнях: 1 - 505 см, 2 - 383 см, 3 - 318 см, 4 - 266 см.

Рисунок 3.7— Профиль поперечного сечения с изотаксами и кривыми распределения средних на вертикалях скоростей по ширине гидроствора р.

Крыловка - с. Крыловка.

4 Влияние пойменного потока на характер изменения средних на вертикалях скоростей руслового потока при изменении уровней воды

В качестве исходной информации использованы сведения об измеренных расходах воды на пойменных гидростворах сети Росгидромета как при меженных уровнях, так и при уровнях затопления поймы.

Как отмечалось выше, при измерениях паводочных расходов воды число скоростных вертикалей, как правило, сокращается и многие из них изменяют свое местоположение. Поэтому недостающие значения скоростей на расчетных вертикалях приходилось определять по эяграм их распределения по ширине потока.

Для II - V типов взаимодействия руслового и пойменного потоков были построены кривые зависимости $v_v = f(H)$ для характерных и наиболее полно освещенных исходной информацией скоростных вертикалей в русловой части потока.

При II типе взаимодействия руслового и пойменного потоков при малых значениях углов α ($\alpha \leq 25^\circ$) практически на всех скоростных вертикалях исследуемых рек наблюдается плавное, более или менее, равномерное увеличение скоростей с ростом уровней воды.

Существенно отличная картина изменения скоростей на вертикалях наблюдается при больших значениях углов α . Так, на р. Пьяне у д. Камкино (рисунок 4.1 а), хотя и относящейся к IV типу взаимодействия потоков, из-за значительного расширения долины ниже створа измерений происходит растекание масс руслового потока по пойме под углом $\alpha = 45^\circ$, т. е. процесс взаимодействия потоков происходит по II типу.

Как видно на рисунке 4.1 а, при уровнях, превышающих отметку бровки прируслового вала, наблюдается резкое увеличение скоростей, т. е. возрастание их градиентов ($\partial v_v / \partial H$). По-видимому, это можно объяснить двумя причинами: 1) на р. Пьяне угол расхождения осей потоков ($\alpha = 45^\circ$) значительно превышает аналогичные на других реках; 2) некоторое различие характера взаимодействия потоков при II и IV типах, даже если оно происходит по схеме II типа.

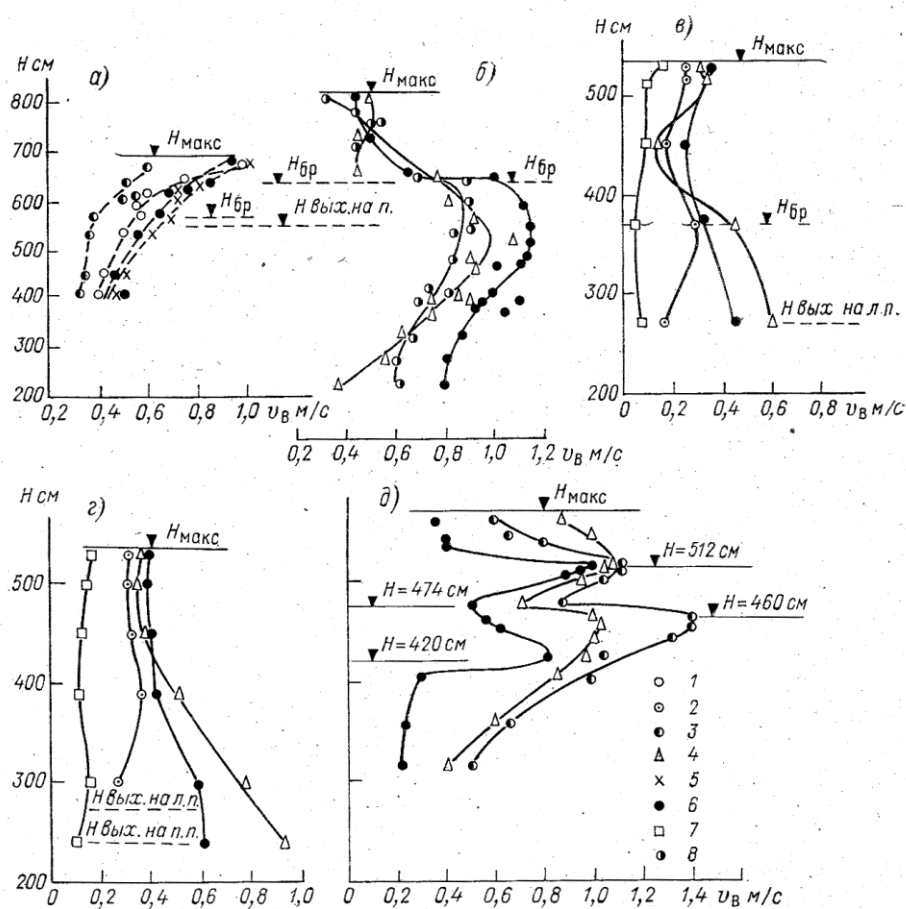
Таким образом, при II типе взаимодействия и малых углах расхождения динамических осей потоков существенного отличия характера изменения средних скоростей на вертикалях в русле при увеличении уровней воды и выходе ее на пойму по сравнению с меженным периодом не наблюдается.

При больших углах α резко возрастают градиенты скоростей при отметках уровней, превышающих отметки бровок прирусловых валов. Увеличение градиента скорости ($\partial v / \partial H$) пропорционально углу α .

В качестве примера влияния пойменного потока на средние скорости на вертикалях руслового потока при III типе их взаимодействия приведены кривые

зависимости $v_B = f(H)$ для р. Амур у пос. Кумара (рис. 4.2), где $\alpha = 4^\circ$, и для р. Ветлуги у д. Быстри (рисунок 4.1 б), где $\alpha = 50^\circ$.

На р. Ветлуге при уровнях, превышающих уровни выхода воды на пойму, наблюдается существенное замедление роста скоростей и даже их стабилизация, а при затоплении бровки прируслового вала скорости резко уменьшаются (примерно в 2 раза) и кривые зависимости $v_B = f(H)$ приобретают S-образную форму. Такой характер изменения скоростей отмечен на всех скоростных вертикалях, находящихся в русловой части потока.

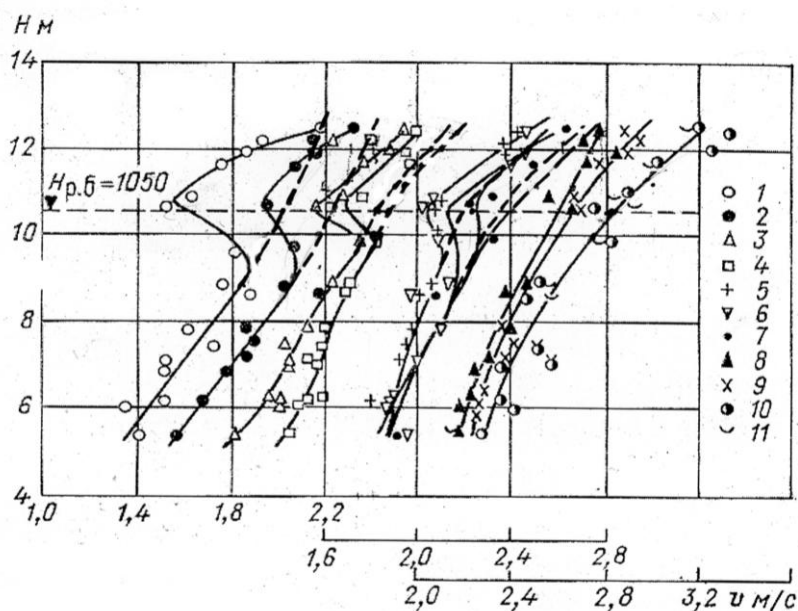


а) - р. Пьяна - д. Камкино; б) - р. Ветлуга - д. Быстри; в) г) - р. Луга - пос. Толмачево; в- подъем, г - спад уровней; д) - р. Нестеровка – рзд. Таловый; 1-8 - номера скоростных вертикалей; л. п. - левая пойма, п. п. - правая.

Рисунок 4.1– Кривые $v_B = f(H)$.

Существенно отлично изменение скоростей на р. Амур у пос. Кумара. Кривые зависимости $v_B = f(H)$ для вертикалей 1- 4, расположенных в непосредственной близости к пойме, имеют четко выраженную S-образную форму, хотя уменьшение скоростей значительно меньше, чем на р. Ветлуге, и в пределе достигает лишь 15 %. По мере удаления от поймы кривые зависимости $v_B = f(H)$ изменяют свою форму, они как бы распрямляются. Двойной перегиб кривых исчезает и во второй половине сечения, удаленной от поймы, они имеют обычную форму, характерную для беспойменных русел. Перегиб этих кривых прослеживается только до вертикали 9, расположенной на расстоянии 475 м от бровки прируслового вала (на вертикали 8 он слабо выражен). На вертикалях 9 - 11 кривые зависимости $v_B = f(H)$ имеют близкую к параболической форму.

Тормозящее влияние пойменного потока на русловой поток, по-видимому, затухает между вертикалями 8 и 9. Таким образом, зона влияния пойменного потока на русловой будет составлять 60 % ширины последнего ($B_p = 675$ м).



1-11 - вертикали. «-----» — результаты расчета по формуле Шези.

Рисунок 4.2— Зависимости средних на вертикалях скоростей от уровня воды на р. Амур - пос. Кумара за 1958 г.

На остальных реках этой группы при ($\alpha = 3 \div 5^0$) поймы имеют значительно большую ширину ($B_{\text{п}}/B_{\text{р}} = 3-7$; см. таблицу 3.1), и тормозящее влияние пойменного потока распространяется на всю ширину руслового.

Это объясняется тем, что р. Амур - большая река с относительно узкой поймой; 98,6 % максимального расхода воды, достигающего в створе пос. Кумара $22300 \text{ м}^3/\text{с}$, проходит в русле и только 1,4 % - по узкой пойме ($B_{\text{п}}/B_{\text{р}} = 2,0$). Остальные реки этой группы – малые и средние, причем доля их пойменной составляющей значительно больше и равна 30 - 40 %.

Таким образом, на всех реках данной группы отмечается резкое уменьшение скоростей при уровнях затопления бровок прирусловых валов. Это уменьшение пропорционально углу схождения или пересечения динамических осей руслового и пойменного потоков.

Установить непосредственную зависимость между этим уменьшением скоростей (Δv) и углом α затруднительно, ибо величина Δv зависит от местоположения вертикали и, как правило, уменьшается по мере увеличения расстояния от бровки прируслового вала, абсолютного значения скорости на вертикали, относительной ширины поймы и ряда других факторов.

На большинстве рек этой группы кривые $v_{\text{в}} = f(H)$ имеют S-образную форму. По мере удаления вертикалей от поймы кривые изменяют свою форму и как бы распрямляются. На больших реках, имеющих узкую пойму ($B_{\text{п}}/B_{\text{р}} \leq 0,5$), торможение руслового потока пойменным распространяется только на часть его ширины.

При IV типе взаимодействия потоков русла и поймы при расширении последней по длине реки характер изменения средних скоростей на вертикалях аналогичен соответствующим изменениям при II типе, при сужении - при III типе.

В качестве примера выше приведен анализ характера изменения кривых $v_{\text{в}}=f(H)$ по р. Пьяне у д. Камкино (II тип взаимодействия потоков рисунок 4.1 а).

Рассмотрим характер изменения средних на вертикалях скоростей при сужающейся пойме на примере р. Луги у пос. Толмачево, имеющей сложный, ступенчатый профиль поперечного сечения по гидроствору (рис. 4.1 в и г).

При уровнях 170 и 380 см происходит резкое расширение левобережной части русла примерно на 30 – 35 % его ширины, а при $H = 360$ см - затопление первого прируслового вала и присоединение правобережной поймы шириною 0,3 ширины русла и только при $H = 457$ см основной прирусловой вал затопливается и потоки русла и поймы сливаются. Пойма имеет небольшую ширину, равную 1,2-2,0 ширинам русла, но затопливается на значительную глубину – до 0,5-0,6 глубин русла (3,0-3,5 м при максимальном уровне).

Такой сложносоставной профиль поперечного сечения по гидроствору оказывает существенное влияние на скоростное поле потока и, в частности, на характер изменения средних скоростей на вертикалях в русловой части потока.

На рисунке 4.1 в и г представлены кривые $v_b = f(H)$ для подъема и спада уровней при прохождении половодья.

Характер изменения скоростей на вертикалях 1 - 6 на спаде и подъеме близок к рассмотренному при III типе взаимодействия потоков, хотя и менее четко выражен. Это обусловлено в первую очередь сложностью профиля поперечного сечения по гидроствору и недостаточным объемом исходной информации.

Некоторым отклонением от общей закономерности является характер распределения скоростей на вертикали 7, расположенной в 6 м от бровки прируслового вала, на которой скорости почти не изменяются при изменении уровня воды. Это, по-видимому, можно объяснить малыми глубинами на вертикали при уровнях затопления бровки прируслового вала и повышенной шероховатостью прибрежной части русла.

Таким образом, при IV типе взаимодействия потоков при углах пересечения их динамических осей $\alpha \leq 40 \div 60^\circ$ характер изменения кривых $v_b = f(H)$ аналогичен II типу при расширении поймы и III типу при ее сужении.

Это является дополнительным подтверждением того, что при классификации взаимодействующих потоков к IV типу целесообразно относить только те, у которых $\alpha > 40 \div 60^\circ$. Это граничное значение угла α необходимо уточнить по натурным данным. В остальных случаях в зависимости от характера изменения ширины поймы по длине реки такие исследуемые объекты целесообразно рассчитывать по схеме II или III типов взаимодействия потоков.

Наиболее сложен характер изменения зависимости средних скоростей на вертикалях от уровня воды при V типе, характеризующимся изменением взаимного расположения динамических осей взаимодействующих потоков при изменении уровней.

В качестве примера на рисунке 4.1 д приведены кривые зависимости $v_B = f(H)$ для р. Нестеровки у рзд. Таловый, имеющей широкую двустороннюю пойму, где особенно четко прослеживается влияние изменения морфологии затопленной части поймы на характер кривых зависимости средних скоростей на вертикалях от уровней воды. Присоединение дополнительных отсеков поймы к общему руслопойменному потоку при различных уровнях, которые указаны на рисунке 4.1 д (размеры этих отсеков даны в предыдущем разделе), как правило, приводит к изменению направления кривых $v_B = f(H)$. Эти перегибы кривых характерны для всех вертикалей, хотя на первой они менее четко выражены.

Аналогичные кривые для скоростных вертикалей р. Крыловки у с. Крыловка также имеют довольно сложный характер. Их перегибы происходят при уровнях, соответствующих уровням затопления дополнительных отсеков поймы, что приводит к изменению направления динамической оси пойменного потока и, как следствие, к изменению типа взаимодействия руслового и пойменного потоков.

Близкая картина изменения скоростей на вертикалях с уровнем воды происходит и на других реках этого типа.

Таким образом, проведенный анализ изменения средних скоростей на вертикалях в зависимости от уровня воды подтвердил и уточнил ряд выводов, полученных в предыдущем разделе, и позволил сделать новые, в частности о том, что кривые $v_v = f(H)$ имеют сложный ступенчатый вид при V типе взаимодействия потоков. Точкам перегиба этих кривых соответствует изменение направления динамической оси пойменного потока.

Важным является вывод о том, что на малых и средних реках влияние пойменного потока, как правило, распространяется на всю ширину руслового, а на больших реках только на ее часть B_p . По-видимому, относительная ширина русла ($B_p/B_{p.макс}$), на которую распространяется воздействие пойменного потока, зависит от соотношения мощностей этих потоков. В конечном счете, от глубины вреза русла, соотношения расходов воды в русле и на пойме, соотношения глубин и ширин русла и поймы и других факторов.

5 Оценка точности расчетов средних на вертикалях скоростей по методике, основанной на формуле Шези

При проектировании и строительстве различных гидротехнических сооружений одним из важнейших гидравлических параметров является средняя на вертикали скорость руслового потока. В качестве примера можно привести расчет глубины размыва у опор мостов, в нижних бьефах ГЭС и др. В то же время Наставление рекомендует выполнять этот расчет на основе формулы Шези, т.е. априори принимая движение равномерным. Однако максимальные расходы редкой (1 – 5 %-ной) обеспеченности на равнинных реках, как правило, проходят по затопленной пойме, когда наиболее четко выражен эффект взаимодействия руслового и пойменных потоков. Последний трансформирует эпюры распределения скоростей как по ширине, так и по глубине потока. К тому же движение таких потоков является неравномерным и, более того, с переменным по длине расходом воды. Все это свидетельствует о необходимости как оценки погрешностей расчетов по данной методике, так и о

ее корректировки в свете последних достижений по проблеме взаимодействия руслового и пойменного потоков.

Как известно, расчет максимальных расходов воды редкой обеспеченности выполняется на основе статистических методов, а переход от них к средним скоростям потоков выполняется на основании данных о морфологическом строении русла и поймы на расчетном участке. Расчет же распределения средних на вертикалях скоростей по ширине русловых потоков осуществляется по одной из методик, в частности методике А.В. Караушева, также основанной на формуле Шези. Погрешности расчетов при этом могут быть весьма значительными, существенно превышающими допустимые пределы.

С целью оценки точности и надежности этих методик были выполнены контрольные расчеты средних на вертикалях скоростей по ширине русловых потоков на примере нескольких рек (смотри таблицу 5.1). В основу расчетов были положены данные измерений расходов воды при максимальных уровнях и уровнях ниже уровня выхода воды на пойму. При этом допускалось, что коэффициенты шероховатости русла и уклоны свободной поверхности при увеличении уровней не изменяются. Это допущение является грубым и не соответствует последним достижениям по проблеме взаимодействия руслового и пойменного потоков [1-3 и др.]. Действительно, коэффициент шероховатости и уклоны водной поверхности могут значительно изменяться как увеличиваясь, так и уменьшаясь при увеличении уровня воды и особенно при затоплении поймы и образовании единого руслопойменного потока.

Приняв для средней скорости русловой части потока $v = C\sqrt{hI}$ и $C = \frac{h^{1/6}}{n}$, получим $v = \frac{h^{2/3}I^{1/2}}{n}$, обозначив $\frac{I^{1/2}}{n} = \beta$, получим $\bar{v} = k h^{2/3}$, где $\beta = \frac{\bar{v}}{h^{2/3}}$.

Допуская, что для каждой скоростной вертикали $v_i = C_i\sqrt{h_i I_i}$ и $C_i = \frac{h_i^{1/6}}{n}$, получаем $v_i = \frac{h_i^{2/3} I_i^{1/2}}{n}$, учитывая, что значения коэффициентов шероховатости и

уклонов свободной поверхности неизвестны. С учетом приведенного выше допущения о их неизменности при изменении уровней воды получим:

$$v_{\text{макс}_i} = v_{\text{р.б}} \left(\frac{h_{\text{макс}_i}}{h_{\text{р.б}}} \right)^{2/3},$$

где $v_{\text{макс}_i}$ и $v_{\text{р.б}}$ – соответственно средние на вертикалях скорости при максимальном из измеренных уровне воды ($v_{\text{макс}_i}$) и при уровне, предшествующем уровню выхода воды на пойму ($v_{\text{р.б}}$); $h_{\text{макс}_i}$, $h_{\text{р.б}}$ – соответствующие им глубины.

В качестве примера в таблице 5.1 приведены результаты расчетов по четырем рекам, взаимодействие руслового и пойменного потоков на которых происходит по различным типам (II, III и V).

Таблица 5.1–Результаты оценки погрешностей расчетов средних на вертикалях скоростей

Река-пост	Данные измерений при уровнях, см				Расчётные значения скоростей при уровне 666 см	Погрешности расчётов	
	глубин		скоростей			м/с	%
	H=529	H=666	H=529	H=666			
р.Пьяна- д.Камкино IV тип (по II-му) $\alpha=45^0$	2,73	4,00	0,36	0,63	0,47	0,16	25,4
	3,52	4,80	0,52	0,99	0,64	0,35	35,3
	3,70	5,10	0,54	0,97	0,67	0,30	30,9
	4,30	5,60	0,61	1,00	0,73	0,28	27,7
	500	6,30	0,56	0,95	0,65	0,30	31,6
					Ср.значение		30,2
					Макс. значение		35,3
Р.Ветлуга Д.Быстри III тип	H=527	H=805	H=527	H=805	При уровне 805 см	м/с	%

$\alpha=50^0$	1,37	4,20	0,54	0,46	0,66	0,20	44
	2,57	5,40	0,80	0,45	1,31	0,86	191
	4,27	7,10	1,06	0,45	1,47	1,02	227
	6,17	9,00	1,12	0,30	1,42	1,12	373
	5,97	8,80	1,15	0,44	1,46	1,02	232
	6,17	9,00	1,14	0,38	1,45	1,07	282
	6,22	9,05	0,84	0,32	1,08	0,76	238
	5,07	7,90	0,32	0,14	0,42	0,18	128
						Ср.значение	215
						Макс. значение	373
Р.Конда- д. Чантырья III тип $\alpha=30^0$	H=487	H=719	H=487	H=719	При уровне 719	м/с	%
	0,58	2,90	0,26	0,50	0,75	0,25	50
	1,13	3,45	0,58	0,50	1,22	0,72	144
	1,69	4,01	0,62	0,47	1,10	0,63	134
	2,78	5,10	0,66	0,44	0,99	0,55	125
	3,03	5,35	0,66	0,44	0,96	0,52	118
	2,68	5,00	0,61	0,38	0,92	0,54	142
	2,08	4,40	0,54	0,31	0,88	0,57	183
	1,33	3,65	0,39	0,22	0,47	0,25	114
	0,45	3,07	0,27	0,18	0,69	0,51	283
						Ср.значение	144
						Макс. значение	283
р.Крыловка -д. Крыловка V тип	H=266	H=505	H=266	H=505	При уровне 505	м/с	%
	2,80	5,19	0,90	0,97	1,78	0,81	84
	3,02	5,41	1,16	1,00	1,71	0,71	71
	3,04	5,43	1,18	1,02	1,74	0,72	71
	2,95	5,34	0,96	0,68	1,42	0,74	109
	2,21	4,60	0,32	0,28	0,52	0,24	86
					Ср.значение		84
					Макс. значение		109

Как показывает анализ данных, полученных в результате расчетов, в том числе и приведенных в таблице 5.1, особенно большие погрешности расчетов,

значительно превышающие допустимые пределы, получены при III типе взаимодействия потоков. При этом установлено, что величина этой погрешности увеличивается с увеличением угла α . В то же время погрешности расчетов средних на вертикалях скоростей при втором типе, хотя так же превышают допустимые пределы, но значительно меньше, чем при третьем типе взаимодействия руслового и пойменного потоков.

Проведенный анализ результатов расчетов позволяет сделать следующие выводы:

- методика расчетов, основанная на формуле Шези, т.е. на теории равномерного движения, неприемлема для расчетов средних на вертикалях скоростей в русловой части потока при прохождении паводков и половодий по затопленной пойме;
- гидростворы следует располагать в местах расширения поймы, а не ее сужения, при наименьших углах расхождения взаимодействующих потоков;
- необходима разработка принципиально новой методики расчетов средних скоростей русловых потоков при их взаимодействии с пойменными, учитывающей влияние эффекта их взаимодействия на трансформацию полей скоростей русловых потоков. Как временная мера целесообразно установить корреляционную зависимость погрешностей расчетов от определяющих факторов и, в частности от угла α .

6 Методика расчётов средних на вертикалях скоростей русловых потоков, находящихся под воздействием потоков поймы

Для разработки методики расчётов средних на вертикалях скоростей русловых составляющих потоков был использован, к сожалению, ограниченный объём натурной информации, а именно сведения об измеренных детальным способом расходах воды на пойменных створах при наивысших

уровнях, когда пойма была затоплена. Используются следующие данные по десяти рекам, находящимся на территории бывшего Советского Союза. На четырёх из них процесс взаимодействия потоков осуществлялся по третьему типу на двух – по пятому и на одном по второму (смотри таблицу 6.1).

Данные по р. Луге использованы для оценки надёжности расчётных зависимостей и не использованы при их построении

На основе данных о максимальных расходах воды и площадях поперечного сечения при соответствующих уровнях воды были определены средние скорости русловых составляющих потоков, $\bar{v} = \frac{Q}{F} = C\sqrt{hI} = \frac{\bar{h}^{2/3}I^{1/2}}{n}$, где C - коэффициент Шези, $\bar{h}$ – средняя глубина, I – уклон водной поверхности, n – коэффициент шероховатости.

Учитывая, что уклоны водной поверхности либо не измеряются, либо погрешности их измерений велики, да и точность определения коэффициентов шероховатости низкая, было решено принять $I^{1/2}/n = \beta$. Тогда $\bar{v} = \beta\bar{h}^{2/3}$. Отсюда $\beta = \frac{\bar{v}}{\bar{h}^{2/3}}$. Далее было сделано допущение, основанное на разработках отечественных исследователей [2,4 и др.], о том, что коэффициент β может быть так же применён к расчёту средних на вертикалях скоростей потоков, т.е. $v_i = \beta h_i^{2/3}$. Здесь v_i и h_i – средние на вертикалях скорости и глубины русловых составляющих потоков. По этой методике были рассчитаны средние на вертикалях скорости v_{pi} и на основе натурных данных определены погрешности их расчётов $\Delta v_i = v_{изм\ i} - v_{pi}$ и $\Delta v_i / v_{изм\ i} \%$. Следует отметить, что максимальные расходы, как правило, не измеряются особенно на пойменных створах, а рассчитываются либо статистическими методами, либо по данным измерений параметров морфостворов. В частности, коэффициент β может быть определён по приведённому выше выражению, т.е. $\beta = I^{1/2}/n$. При этом значения n и I определяются по данным полевых измерений, в частности, по описанию участка расположения морфоствора и

соответствующим таблицам для определения коэффициентов шероховатости (И.Ф. Карасёва, В.Т. Чоу и др.).

Учитывая, что в расчётах были использованы данные измерений расходов воды детальным способом, при котором скоростные вертикали располагались через равные интервалы, то для каждого расчётного створа были вычислены средние и максимальные значения погрешностей. Рассчитанные по этой методике значения погрешностей расчётов приведены в таблице 6.1. Эти погрешности в основном вызваны изменением значений средних на вертикалях скоростей русловых потоков под воздействием на них пойменных потоков, т.е. возникновения при этом эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков [1,5], а так же учитывают погрешности измерений.

Таблица 6.1–Сведения о величинах средних и максимальных погрешностей расчётов средних на вертикалях скоростей русловых потоков при их взаимодействии с потоками поймы при третьем и пятом их типах, на основе методики Шези- Маннинга.

№	Река, пост	Тип взаимодействия	Угол α^0	Погрешности расчётов в %	
				$(\frac{\Delta v}{v_{изм}})_{ср}$	$(\frac{\Delta v}{v_{изм}})_{макс.}$
1	Р. Ветлуга-д. Быстри	III	50	215	373
2	р.Ветлуга –Дубники	III	3	23	82
3	Р.Конда-д. Чантырья	III	30	130	183
4	Р.Амур – д. Кумара	III	4	10	23
5	р. Луги - пос. Толмачево	III	20	26	42
6	р.	V-III	9	84	109

	Крыловка - -д. Крыловка				
7	Р.Нестеро вка – рзд. Таловый	V-III	22	145	311
8	Аремьянка Чукманка	IV-III	10	40	81
9	Бобр куты	IV-III	15	42	90
10	Тяжин Старый Тяжин	III	5	35	72

Учитывая, что объём натурной информации при третьем и, особенно при втором типах взаимодействия потоков ограничен, в качестве дополнительных были использованы данные измерений расходов воды при пятом типе, процесс взаимодействия которых на этих реках преимущественно происходит по третьему типу. При этом осредненные значения угла $\bar{\alpha}$ между динамическими осями взаимодействующих потоков определялось по формуле $\bar{\alpha} = \frac{\sum \Delta h_i \alpha_i}{h_i}$. Здесь Δh_i - интервал глубин соответствующий значению угла α_i .

На основе информации, приведённой в таблице 6.1, были построены графические зависимости $(\Delta v / v_{\text{изм}})_{\text{ср}} = f(\alpha)$ и $(\Delta v / v_{\text{изм}})_{\text{макс}} = f(\alpha)$, приведённые на рисунке 6.1. Как видно на рисунке, эти зависимости достаточно тесные и близки к линейным. Коэффициенты корреляции для них соответственно равны 0,80 и 0,69.

Безусловно, эти зависимости нуждаются в уточнении на основе большего объёма исходной информации и после этого вполне могут быть использованы для корректировки значений средних на вертикалях скоростей, рассчитанных на основе методики А.В. Караушева. Таким образом методика расчётов предлагается в следующем виде. По планово-высотным крупномасштабным материалам определяют угол α и тип взаимодействия потоков. Методика определения угла α основана на работах отечественных исследователей [2,10 и

др.], доказавших, что угол α может быть определён по крупномасштабным планово-высотным материалам как угол между осреднёнными направлениями изобат в русле реки и горизонталей на пойме при отметке расчётного уровня воды. При этом точность определённого таким образом угла α будет составлять $\pm 3^0$ [5]. По значению угла α и графику $(\frac{\Delta v}{v})_{\text{изм}} = f(\alpha)$ определяют величину погрешности расчётов $(\Delta v / v_{\text{изм}})_{\text{ср}}$, обозначим её m , т.е. $(\frac{\Delta v}{v_{\text{изм}}})_{\text{ср}} = m$, которая приравнивается величине изменения скоростей руслового потока под влиянием потока поймы, т.е. величине воздействия эффекта взаимодействия потоков, $(\Delta v / v_{\text{изм}})$ – величина поправки, учитывающая эффект взаимодействия потоков.

По величине m определяется значение $v_{\text{изм}}$, исходя из формулы $m = \frac{v_{\text{изм}} - v_p}{v_{\text{изм}}}$.

После простейших преобразований получают $v_{\text{изм}} = v_p(m + 1)$. Здесь v_p – соответствующее значение средней на вертикали скорости руслового потока, определённой по методике А.В. Караушева [12], т.е. на основе допущения о равномерном движении.

Таким образом, по предлагаемой методике, основанной на введении поправок к рассчитанным по формуле Шези-Маннинга значениям средних на вертикалях скоростей русловых составляющих потоков, получается близкое к фактическому значение этих скоростей.

К сожалению, контрольные расчёты были выполнены по данным только одной реки Луги у пос. Толмачёво. Погрешность расчётов составила 15% против 56% по методике, основанной на формуле Шези-Маннинга.

Зависимости, аналогичные приведённым на рисунке 6.1, можно получить как для второго типа взаимодействия потоков, так и для пойменных вертикалей, учитывая при этом, что качество натурной информации для последних значительно хуже, чем для русловой составляющей потока.

К сожалению, качество натурной информации о пойменных составляющих максимальных расходов воды низкое. При сложном рельефе и

большей чем в русловой части ширине пойменных потоков количество скоростных вертикалей на пойме, как правило, меньше чем в русле. Иногда оно ограничивается одной -двумя вертикалями. Поэтому получить зависимости, аналогичные, приведённым на рисунке 6.1 для пойменной составляющей, в частности, не представляется возможным. Несмотря на это, можно констатировать, что воздействие руслового потока на скоростное поле пойменного по данным экспериментальных исследований на абстрактных моделях русел с гладкими поймами, достигает 5-6 ширин руслового потока [5,10]. Анализ же натурных данных позволяет сделать вывод о том, что это влияние находясь в зависимости от шероховатости и глубины затопления поймы, распространяется на значительно меньшую ширину пойменного потока. На поймах интенсивно заросших кустарником и лесом это влияние ограничивается одной шириной руслового потока.

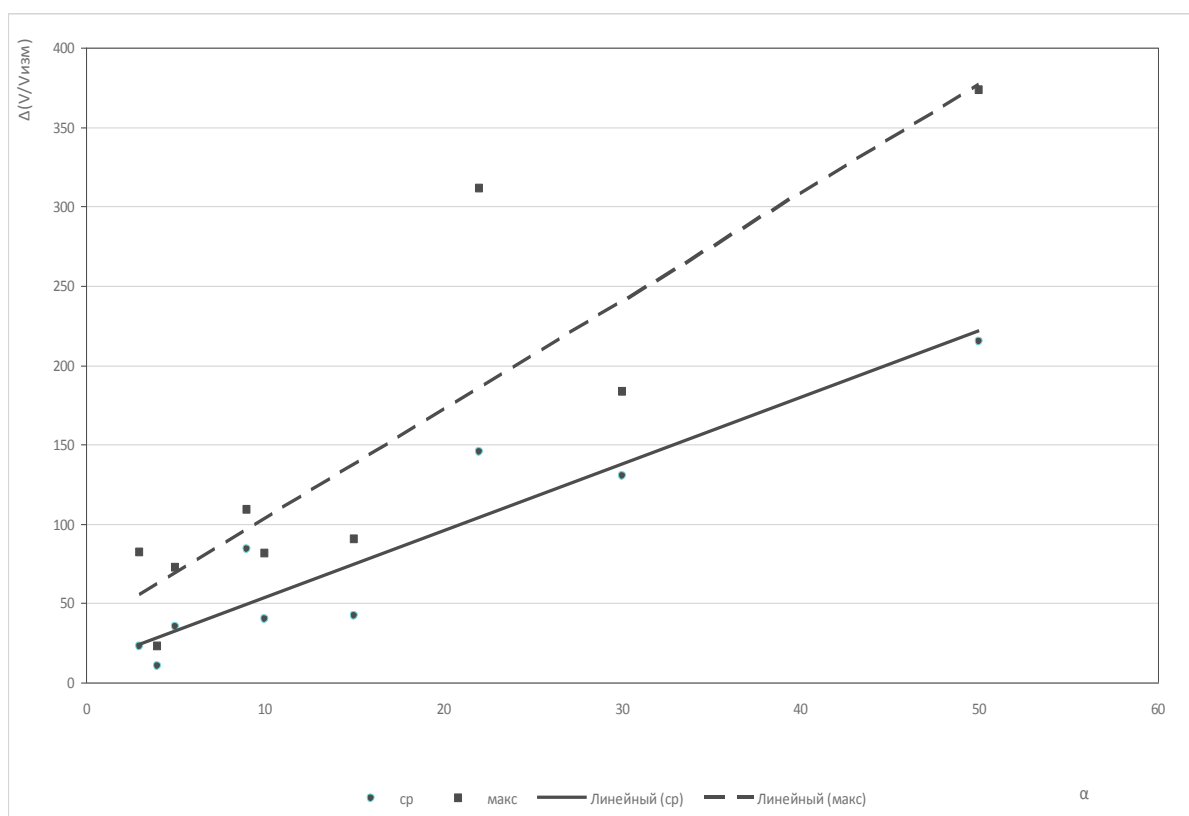


Рисунок 6.1– Зависимости средних и максимальных погрешностей расчётов средних на вертикалях скоростей русловой составляющей потока от углов α (III и V типы взаимодействия потоков)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые расчёты и анализ их результатов позволяют сделать следующие выводы и предложения: это первые шаги в разработке данной расчётной методики. Они выполнены только для условий третьего и пятого типов взаимодействия потоков и то на ограниченном объёме исходной информации. По-видимому, необходимо провести аналогичные расчёты для условий второго типа взаимодействия потоков, характеризующегося расхождением их динамических осей, а также для пойменных составляющих потоков. Эти расчёты можно будет выполнить только при наличии необходимой натурной информации:

- расчёт средних скоростей русловых беспойменных потоков можно осуществлять по методике А.В. Караушева, основанной на теории равномерного движения. Средняя погрешность расчётов составляет 30-35%;

- при наличии руслопойменных потоков их движение является неравномерным, что приводит к погрешностям расчётов на основе методики Шеши значительно превышающим допустимые пределы;

- разработанная методика расчётов средних на вертикалях скоростей позволяет выполнять их расчёты с вполне приемлемой точностью, но только при третьем типе взаимодействия потоков;

- исследования в этом направлении следует продолжить как при втором типе взаимодействия, так и при увеличении объёма натурной информации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Агасиева С. И., Барекян А. Ш. Изменение средних скоростей главного русла и коэффициента Шези при прохождении паводка. //Метеорология и гидрология, 1961, № 9.—С. 36—39.

2 Барышников Н.Б. Проблемы морфологии, гидрологии и гидравлики пойм. - СПб.: изд. РГГМУ, 2012.

3 Барышников Н.Б. О некоторых проблемах в гидрологии// Учёные записки РГГМУ, №5, 2007.—С.19-24.

4 Барышников Н.Б., Субботина Е.С., Бурцев К.С., Поташко Е.А. Влияние прирусловых валов на процесс взаимодействия русловых и пойменных потоков// Учёные записки РГГМУ, №26, 2012.—С.19-24.

5 Барышников Н.Б., Овсейко П.П., Тереньтьев И.С. Гидравлика потоков и гидравлические сопротивления русел с поймами// Сборник научных трудов "Водные пути и порты", 2015, вып.2.—С.63-75.

6 Великанова З. М., Ярных Н. А. Натурные исследования гидравлики пойменного массива в высокое половодье//Труды ГГИ, 1970, вып. 183.—С. 33—53

7 Гнучих В. Г. Морфологические особенности и водный режим речных пойм.—В кн.: Вопросы мелиорации Томского приобья.—Томск: Томское отд. Западно-Сибирского книжного изд-ва, 1974, вып. 1.—С. 84—79.

8 Гончаров В.Н. Динамика русловых потоков . – Л.: Гидрометеиздат, 1962.

9 Гордилов А. В. , Россомахин М. В. Поперечные уклоны водной поверхности затопленной поймы (на примере р. Иртыша).// Труды ГГИ, 1961, вып. 88.

10 Железняков Г.В. Пропускная способность русел рек и каналов. – Л.: Гидрометеиздат, 1981.

11 Карасёв И.Ф. Речная гидрометрия и учёт водных ресурсов. – Л.: Гидрометеиздат, 1980.

- 12 Караушев А. В. Речная гидравлика.—Л.: Гидрометеиздат, 1969.— 416 с.
- 13 Поляков Б. В. Гидрологический анализ и расчеты.—Л.: Гидрометеиздат, 1946.— 480 с.
- 14 Пособие по экстраполяции кривых расходов воды до наивысших уровней.— Л.: Гидрометеиздат, 1966.—102 с.
- 15 Радюк А. Л. Трассирование прорезей на порогах с учетом кинематического эффекта.— Красноярск, 1973.— 28 с. Рукопись деп. в ВИНТИ, № 6750—73с.
- 16 Радюк А. Л. Основы гидравлики лесосплавных сооружений. Дноуглубление.— Красноярск, изд. СТИ, 1978.— 62 с.
- 17 Ржаницын Н. А. Руслоформирующие процессы рек.—Л.: Гидрометеиздат, 1985.—264 с.
- 18 Саликов В. Г. Экспериментальное исследование движения воды и формы рельефа дна в открытом изогнутом русле при выходе потока на пойму.—Известия вузов СССР. Энергетика, 1972, № 1.—С. 109—115.
- 19 Скородумов Д. Е. Вопросы гидравлики пойменных русел в связи с задачами построения и экстраполяции кривых расходов воды. — Труды ГГИ, 1965, вып. 128.—С. 3—96.
- 20 Соколов Ю. Н. Лабораторные исследования пропускной способности русла при пересечении под прямым углом пойменного и руслового потока.— В кн.: Вопросы водохозяйственного строительства. Минск, 1969.—С. 214—224.
- 21 Усачев В. Ф. Анализ изменения уровней-воды для оценки процессов затопления и разгрузки многорукавной поймы,—Труды ГГИ, 1972, вып. 195.—С. 63—76.
- 22 Форхгеймер Ф. Гидравлика.—М.: ОНТИ, 1935.—615 с.

23 Delleuer I. W., Toebes G. H., Udeozo B. C Uniform flow in idealised channel-flood plain geometries.—In: Proc. 12th Congr. IAHR. Vol. 1, Fort Collins, 1967.—P. 218—225.

24 Hegly M. Note sur de l'ean en canal a profil complexe. Paris, 1936.—151 p.

25 Sell in R. H. I. A laboratory investigation into the interaction between the flow in the channel of a river and that over its flood plain.—La Houille Blanche, 1964, N 7.—P. 793—802.

26 Toebes G. H., Sooky A. A. Hydraulics of meandering rivers with flood plains.—J. Waterways and Harbors Div. Civ. Eng., 1967, vol. 93, N 2.—P. 213—236.