

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ – МСХА  
ИМЕНИ К.А. ТИМИРЯЗЕВА»

На правах рукописи

**КАНЬЯРУГЕНДО ЛЕОНИДАС**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ  
ИСКУССТВЕННОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ НА ВОДОСЛИВНОЙ ГРАНИ  
СРЕДНЕ- И НИЗКОНАПОРНЫХ ПЛОТИН**

Специальность 2.1.6 - Гидротехническое строительство, гидравлика и  
инженерная гидрология

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор,  
**Ханов Нартмир Владимирович**

Москва – 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ГАШЕНИЯ ЭНЕРГИИ ПОТОКА В ГИДРОТЕХНИКЕ.....	9
1.1 Устройство элементов сопротивления как гасителей энергии на сопрягающих сооружениях .....	10
1.2 Общие сведения о гасителях энергии в нижнем бьефе плотин .....	29
1.2.1. Гашение энергии потока на водобое водосливных плотин .....	30
1.2.2. Отброс струи.....	32
1.2.3. Устройство гасителей энергии потока непосредственно на сливной грани плотины .....	33
Выводы по первой главе.....	43
ГЛАВА 2. МОДЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА, ОБОРУДОВАНИЯ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	45
2.1 Общие принципы физического моделирования.....	45
2.2 Описание экспериментальной установки и обоснование размеров модели .	46
2.3. Методика лабораторных исследований гидравлических процессов.....	52
2.4. Оценка погрешности измерительной аппаратуры и ошибок полученных результатов.....	56
2.5. Краткое описание порядка проведения опытов.....	58
Выводы по второй главе .....	59
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА РЕЖИМОВ ПОТОКА ПРИ ГЛАДКОЙ И ШЕРОХОВАТОЙ ГРАНИ ВОДОСЛИВНЫХ ПЛОТИН .....	61
3.1 Исследование работы водосброса при гладкой низовой водосливной грани	61
3.1.1 Исследование режима работы низовой водосливной грани при гладкой поверхности и отсутствии подпора .....	61
3.1.2 Определение второй сопряженной глубины .....	66

3.2	Результаты исследований работы водосброса при установке разных типов искусственной шероховатости на водосливной грани .....	80
3.2.1	Двойной зигзаг с двумя изломами против течения .....	80
3.2.2	Бруски в разбежку .....	87
3.2.3	Нормальные бруски.....	90
	Выводы по третьей главе.....	94
	ГЛАВА 4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ МОДЕЛИ ВОДОСБРОСНОЙ ПЛОТИНЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМАХ УСИЛЕННОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ .....	95
4.1	Результаты определения коэффициента расхода модели водосливной плотины .....	95
4.2	Сравнительный анализ эффективности диссипативного эффекта исследуемых видов шероховатости .....	96
4.3	Сравнительная оценка гидравлического сопротивления шероховатой сливной поверхности .....	100
	Выводы по четвертой главе.....	114
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	115
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	117
	ПРИЛОЖЕНИЕ.....	128

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** При возведении крупных гидротехнических сооружений (ГТС), гашение избыточной энергии потока – одна из часто решаемых задач. Выбор рациональных гидродинамических параметров при проектировании бетонных водосливных плотин позволяет конструктивно облегчить ее низовую часть и защитить сооружения от негативных воздействий избыточной энергии потока (вибрации плотины и сооружений в районах территории, в том числе с жилыми домами, примыкающих к плотине; колебаний и переформирования грунта под и за пределами плотины; деформации крепления участка сопряжения в нижнем бьефе и размыва нижнего бьефа, появления трещин в зданиях и пр. дефектов), что делает некомфортным и опасным проживание в зоне влияния режимов работы гидроузла и требует введения соответствующих запретных зон для жилищного строительства.

В соответствии с требованиями СП как водонапорные, так и водопропускные сооружения гидроузлов любого класса опасности, в том числе средне- и низконапорные, должны обеспечить в процессе эксплуатации нормативную безопасность по всем критериям. Кроме того, плотины в основном являются крупными дорогостоящими объектами. При этом основополагающим является устойчивая работа водосбросной части гидроузла, стоимость которой может составлять более 1/3 от затрат на его строительство и эксплуатацию. Поэтому выбор рациональной компоновки элементов водопропускного тракта ГТС, достижение оптимизации гидродинамических и конструктивных параметров водосбросного сооружения может привести к значительной экономии денежных средств, а повышение надежности и безопасности – к большей защищенности населенных пунктов и хозяйствующих субъектов в нижнем бьефе от негативных последствий и возможных аварий на ГТС.

Таким образом, гашение энергии потока не только в нижнем бьефе плотины, но и на её водосливной грани, например, путем повышения шероховатости последней, актуально для современного гидротехнического

строительства, и позволит снизить параметры существующей вибрации при реновации действующих водосбросных плотин, уменьшить капиталовложения при возведении специальных энергогасящих устройств ГТС в их нижнем бьефе при реконструкции и строительстве.

**Степень разработанности темы исследования.** Гашение избыточной энергии потока всегда было одной из неизбежных задач в гидротехнике в целом, и в плотиностроении в частности. Так, несколько тысяч лет уже применяют в мировой гидротехнике для переливных плотин водосбросы со ступенчатой низовой водосливной гранью, совмещающих сразу несколько важных функций ГТС. При строительстве водопроводящих и сопрягающих сооружений в любом ландшафте, рельеф так же часто заставляет возводить такие ГТС на неблагоприятные с точки зрения гидравлики уклоны, таким образом, оставляя задачу проектировщикам – погасить избыточную кинетическую энергию потока. Многие исследователи доказали эффективность различных видов сопротивлений в виде искусственной шероховатости в каналах, быстротоках, перепадах, где их строительство получило большое распространение [1, 4, 6, 41, 61, 71, 88, 95, 96, 99, 100].

Однако в настоящее время в плотиностроении всё-таки по ряду причин чаще всего принимаются конструктивные решения с гашением энергии потока в нижнем бьефе ГТС - на водобое и частично на рисберме (водобойные колодцы, водобойные стенки, гасители энергии потока разной типологии, усиленная шероховатость, отброс струи и т.д.).

**Цели и задачи исследования.** Целью настоящей работы является совершенствование конструкции водосливной грани средне- и низконапорных плотин за счёт установки искусственной шероховатости и изучение кинематической структуры потока на протяжении всего водопропускного тракта.

Для достижения этой цели автором были поставлены следующие задачи:

– изучить существующие методы гашения избыточной энергии потока на разных участках транзитного тракта водопропускных гидросооружений;

- экспериментально изучить влияние искусственной шероховатости водосливной грани на кинематические параметры потока;
- выяснить преимущества и недостатки применения усиленной шероховатости на водосливной грани плотин;
- экспериментально обосновать оптимальную конструкцию энергогасящего устройства водосливных плотин, обеспечивающего надежную работу и минимальные капиталовложения;
- на основе полученных результатов разработать рекомендации по проектированию средне- и низконапорных водосливных плотин с усиленной шероховатостью.

#### **Научная новизна исследования:**

- расширена область применения ребристой искусственной шероховатости в плотиностроении при установке для гашения энергии потока непосредственно на низовой грани средне- и низконапорных бетонных водосливных плотин;
- проведен анализ режимов течения воды над различными видами ребристой искусственной шероховатости, что позволило выяснить их преимущества и недостатки;
- выбраны наиболее эффективные типы искусственной шероховатости, из исследованных, и предложена методика их расчета;
- оценено влияние установки дополнительных сопротивлений на низовой водосливной грани плотин на диссипацию энергии потока, снижение интенсивности гидродинамических нагрузок на все элементы нижнего бьефа, включая низовую грань плотины, водобойный и отводящий участок, когерентно уменьшающих уровень вибрации водосливной плотины и примыкающей территории;
- установлено влияние выбранных типов искусственной шероховатости на кинематические параметры потока в нижнем бьефе водосливных плотин.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Результаты исследования помогут оптимизировать конструктивные параметры водопропускных сооружений, что позволит повысить безопасность работы гидроузлов и снизить капиталовложения при возведении энергогасящих устройств в нижнем бьефе.

**Методология и методы научного исследования.** Исследования проводились в лабораторных условиях на физической модели. Изучены гидравлические условия работы сливной грани плотины: относительно гладкой (без установки) и при наличии различных типов усиленной искусственной шероховатости на ней.

**Положения, выносимые на защиту:**

- результаты обзора ранее проведенных исследований, посвященных гашению избыточной энергии потока, в том числе, и с применением искусственной шероховатости;
- результаты анализа гидравлических режимов течения при обтекании различных видов сопротивлений, устроенных непосредственно на водосливной грани плотины;
- эпюры скоростей в нижнем бьефе и графики зависимостей гидравлических и кинетических параметров при экспериментальном исследовании различных видов сопротивления из разных типов искусственной шероховатости;
- экспериментальные показатели эффективности применения усиленной шероховатости на водосливной грани средне- и низконапорных водосливных плотин.

**Степень достоверности и апробация результатов работы.** При проведении лабораторных опытов использовались современные оборудование и приборы, хорошо известные при выполнении модельных исследований в гидротехнике. Обработка полученных опытных данных проводилась с помощью современных апробированных программных комплексов (Microsoft Excel 2010 и AutoCAD 2020).

Основные результаты лабораторных исследований были опубликованы в двух статьях в журнале из перечня ВАК, докладывались на заседаниях выпускающей кафедры «Гидротехнические сооружения», а также на различных конференциях:

– международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 160-летию В.А. Михельсона. Москва, РГАУ МСХА им. К.А. Тимирязева, 9 - 11 июня 2020 г.;

– всероссийская с международным участием научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 155-летию со дня рождения Н.Н. Худякова. Москва, РГАУ МСХА им. К.А. Тимирязева, 7 - 9 июня 2021 г.;

– международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 135-летию со дня рождения А.Н. Костякова. Москва, РГАУ МСХА им. К.А. Тимирязева, 6 - 8 июня 2022 г.;

– международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 180-летию со дня рождения К.А. Тимирязева. Москва, РГАУ МСХА им. К.А. Тимирязева, 5 - 7 июня 2023 г.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация изложена на 129 страницах машинописного текста и состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и приложений. Основная часть содержит 72 рисунка, 9 таблиц и список литературных источников из 101 наименований, из которых 22 на иностранных языках.

## ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ГАШЕНИЯ ЭНЕРГИИ ПОТОКА В ГИДРОТЕХНИКЕ

Высокий спрос на воду для гидроэнергетики, промышленности, сельского хозяйства и бытовых нужд, особенно в странах с жарким климатом, а также для защиты территорий от негативных воздействий паводков принуждают создавать водохранилища для аккумуляции воды. Для создания водохранилища строят гидроузлы, в состав которых входят плотины, водозаборные сооружения и водосбросы. При этом широко применяют водосбросные сооружения в виде водосливов и быстротоков, где развиваются значительные скорости потока воды, или же приходится прокладывать каналы с большими уклонами, так как иначе они не вписываются в рельеф местности. Всё это придает потоку высокую кинетическую энергию.

Возведение гидротехнических сооружений на водные объекты, как правило, приводит к нарушению естественного режима течения потока. В большинстве случаев следует искусственно погасить энергию потока, чтобы избежать значительных скоростей. Скорость потока может оказаться выше допустимой для материала грунтового основания нижнего бьефа, что в конечном итоге приведет к размыву и разрушению всего объекта [10, 26, 27, 66, 80]. Помимо этого, допустимая скорость может быть ограничена в соответствии с назначением объекта. Так, например, в рыбопропускных сооружениях скорость потока должна позволить рыбам спокойно плавать и мигрировать из верхнего бьефа в нижний бьеф и обратно.

Регулирование параметров потока в искусственных руслах или в месте перехода потока с ГТС на естественное русло всегда было актуальной задачей в гидротехнике. Решение этой задачи не только обеспечивает безопасную эксплуатацию самого сооружения, но и поддерживает экологическое состояние водного объекта в допустимых пределах. В искусственных руслах гидротехнических систем имеется ряд решений по контролю параметров потока:

конструктивные (уклон, размеры ГТС, установка энергогасящих элементов или конструкций); пропускаемого затворами расхода; комбинации нескольких методов эксплуатации ГТС в зависимости от конструктивных и эксплуатационных особенностей проектируемого водопропускного ГТС и т.д. [14, 45, 49, 86].

На мировой гидротехнической практике широко применяются три основных типа гасителей энергии потока: скачкообразного и ударного типа, а также отброс струи [33, 55]. Для гидравлических гасителей прыжкового типа, энергия рассеивается из-за высокой турбулентности потока в гидравлическом прыжке [25, 35, 46, 76, 79], а для гасителей ударного типа поток направляется на препятствия, от которых распределяется в разные направления, что также создает турбулентность и рассеивает энергию воды [48, 53, 84, 93].

В данном исследовании рассматривается диссипация энергии потока на сливной грани средне- и низконапорных плотин.

### **1.1 Устройство элементов сопротивления как гасителей энергии на сопрягающих сооружениях**

Усиленная (искусственная) шероховатость в настоящий момент широко и эффективно применяется при гашении энергии потока, особенно на быстротоках, перепадах сопрягающих сооружений и водоскатах русловых и береговых водосбросов грунтовых плотин (рис. 1.1 – 1.4) [22]. Гипотеза о возможности её эффективности на низовой грани средне- и низконапорных бетонных водосливных плотин опирается на близкие гидродинамические принципы работы быстротоков и водосливных плотин, а также на утвержденную высокую результативность гашения энергии потока путем усиления шероховатости. В этой связи представляется необходимым обратить внимание на отличие между уклонами водосливных граней бетонных плотин по сравнению с уклонами каналов и быстротоков. Высокая наклонность грани водослива по сравнению с быстротоками и каналами препятствует принятию подтверждения о том, что

устройство усиленной шероховатости ведет к таким же результатам в обоих сооружениях, без дополнительных экспериментальных обоснований.

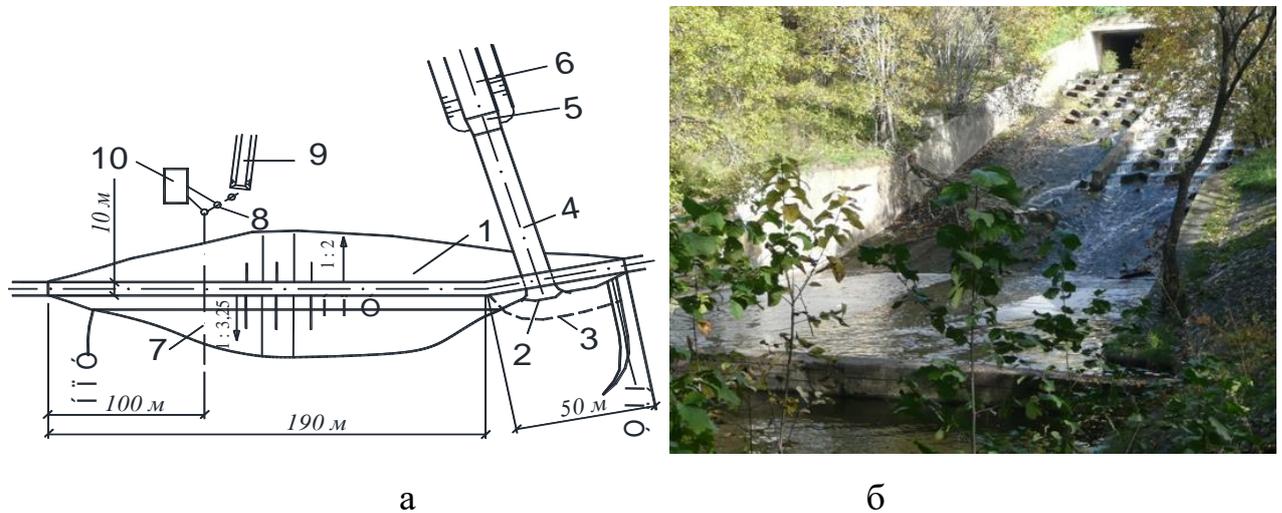


Рисунок 1.1 – Компоновочная схема ГТС пруда на р. Черничке Московской Области (а) и общий вид со стороны нижнего бьефа струйного быстроготока с усиленной шероховатостью (б) 2020 г.: 1 – плотина; 2 – водосливной порог водосброса; 3 – ледозащитная стенка; 4 – быстроток с усиленной шероховатостью; 5 - водобойный колодец; 6 – отводящий канал водосброса; 7 – ось донного водовыпуска; 8 – колодцы управления водовыпуска; 9 – отводящий канал водовыпуска; 10 – насосная станция



Рисунок 1.2 – Многоступенчатый перепад с шашками водосброса из водохранилища Yeoman Neuf, Великобритания

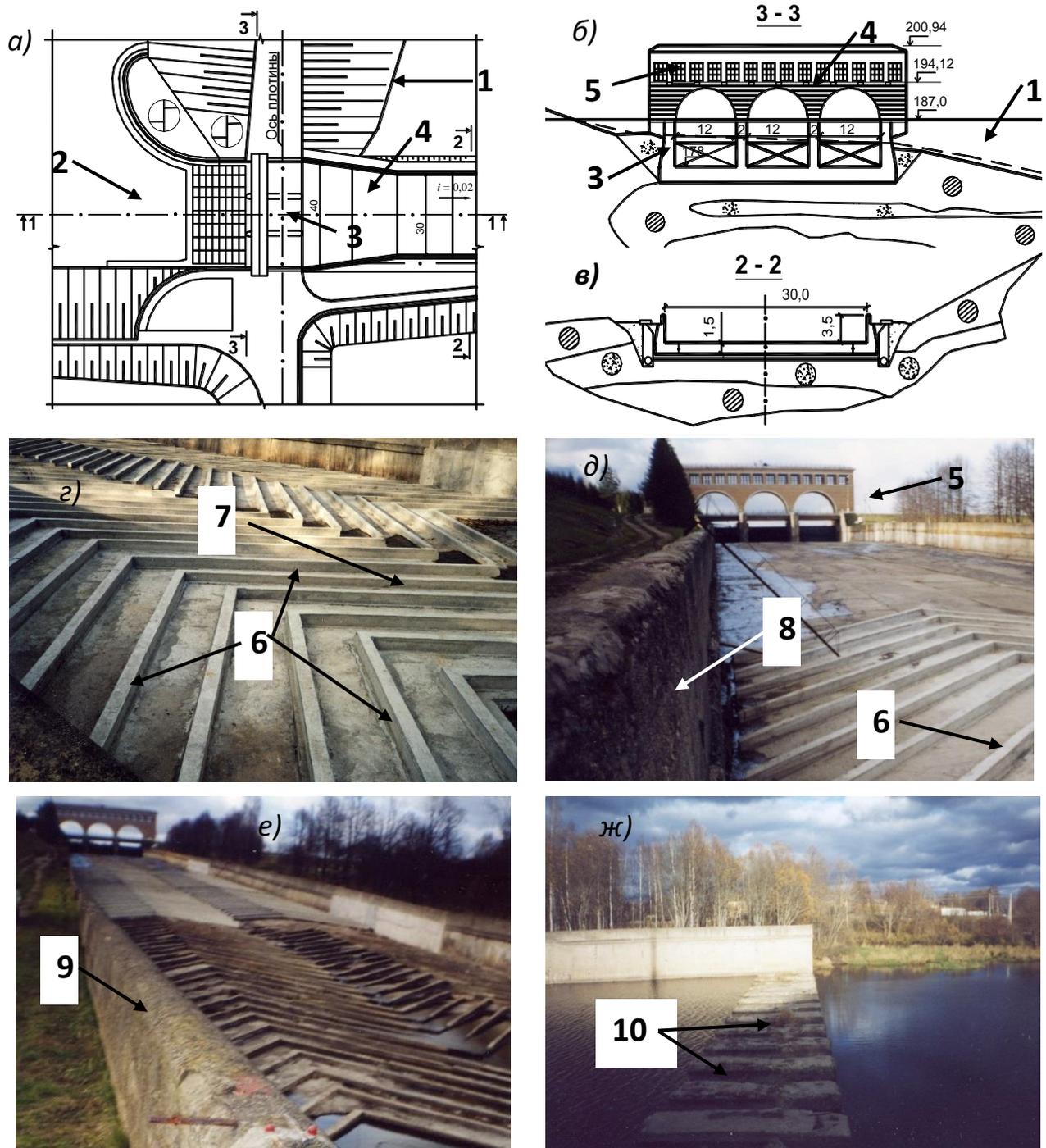
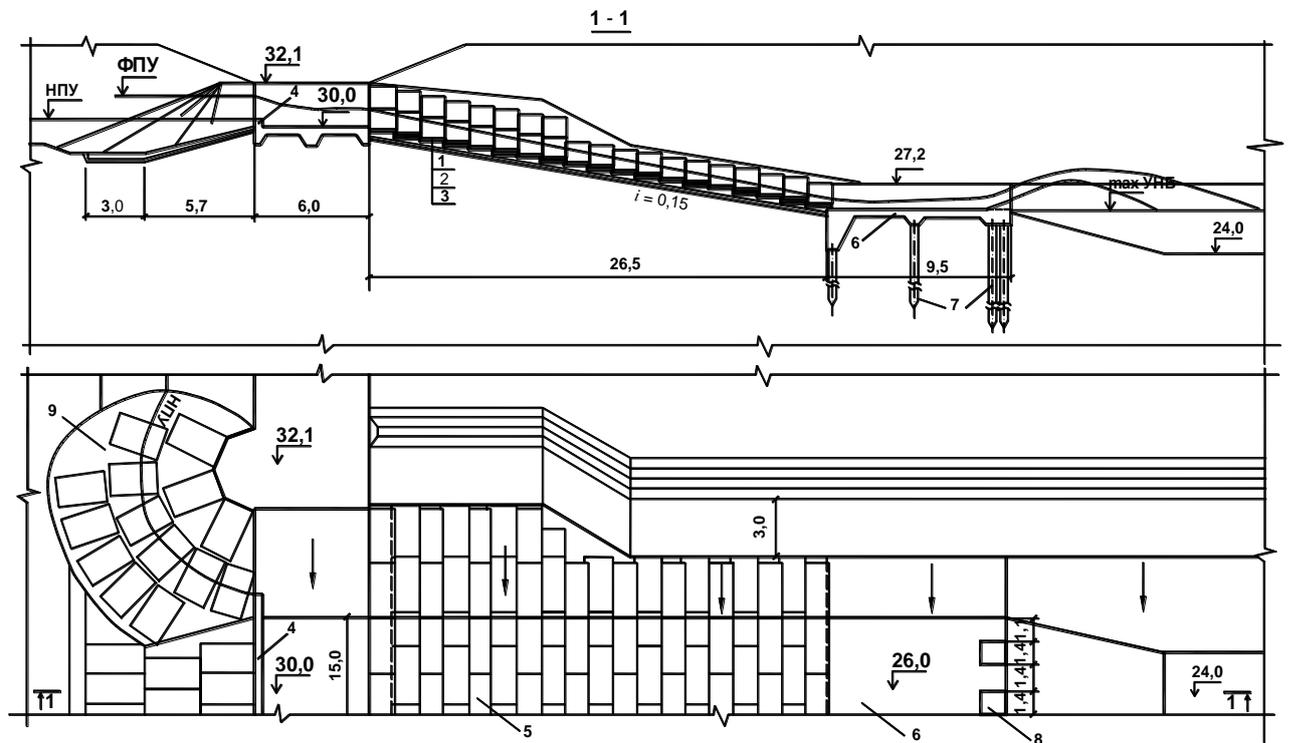


Рисунок 1.3 – Элементы водосброса Можайского гидроузла на р. Москве п. Марфин брод Московской Области: *а* – план шлюза-регулятора водосброса; *б* – поперечный разрез по шлюзу-регулятору; *в* – поперечное сечение быстротока; *г* – искусственная шероховатость типа двойной зигзаг; *д* – вид со стороны быстротока на входной 3-х пролетный регулятор; *е* – парапет боковой стенки быстротока; *ж* – гасители в конце водобоя; 1 – плотина; 2 – подводящий канал водосброса; 3 – шлюз регулятор с сегментными рабочими затворами; 4 – быстроток докового сечения с отрезными боковыми стенками; 5 – эстакада для

маневрирования рабочими и ремонтными затворами; 6 – бруски из монолитного бетона, формирующие искусственную шероховатость; 7 – направление движения потока; 8 – боковые стены быстротока; 9 – парапет; 10 – гасители энергии



а



б

Рисунок 1.4 – Открытый береговой нерегулируемый водосброс с быстротоком из сборных плит (р. Пилис, Луховицкий р-н, Московской области) [22]: а – план и продольный разрез; б – состояние транзитной части водоската в 2015 г.; 1 – сборные железобетонные плиты 3 x 1,5 x 0,2 м; 2 – щебень  $t = 0,3$  м; 3 – песчано-

гравийная смесь  $t = 0,15$  м; 4 – водосливная стенка; 5 – ступенчатая поверхность водоската; 6 – консоль из монолитного бетона на сваях 7; 8 – трамплины; 9 – монолитное крепление в сочетании со сборными плитами.

Многие исследователи уже показали эффективность искусственного усиления шероховатости русел на изменение гидродинамических показателей потоков для различных целей, особенно при установке элементов сопротивления на транзитной части сопрягающих сооружений. Вопрос применения искусственной ребристой шероховатости в каналах впервые был изучен французским гидравликом Базеном в 1865 году. Однако его исследования были проведены при малых уклонах  $i = 0,0015; 0,0055$  и  $0,0089$ , не характерных для быстотоков [3]. В основе различных предложенных гидравлических расчетов лежит условие, что искусственная шероховатость на быстотоках приведет к равномерному течению [4, 19, 59]. Равномерное движение жидкости можно описать уравнением известного французского инженера-гидравлика А. Шези:

$$Q = \omega \cdot C_{\text{сн}} \cdot \sqrt{R \cdot i} \quad . \quad (1.1)$$

где:  $\omega$ - площадь живого сечения потока;  $C_{\text{сн}} = \frac{1}{n} \cdot R^{1/6}$  - коэффициент Шези;  $n$  - коэффициент шероховатости.

В России, большой вклад в исследовании усиленной шероховатости открытых русел внесли Е.А. Замарин, Ф.И. Пикалов [3], которые устанавливали закономерность расчета гидравлических сопротивлений в открытых руслах при уклоне до 0,15 с донной ребристой искусственной шероховатостью.

Исследования Е.А. Замарина были проведены с использованием поперечных прямоугольных ребер высотой 12 и 20 мм в диапазоне уклонов от 0,06 до 0,12 и при условиях при глубине потока 20 ...120мм. Основной вывод Е.А. Замарина заключается в том, что при одной и той же шероховатость, коэффициент шероховатости растет с увеличением глубины.

Исследования Ф.И. Пикалова также проводились с поперечными прямоугольными ребрами в диапазоне уклонов от 0,05 до 0,15 с шагами расстановки  $S = 4, 6, 8, 12\Delta$ ; где  $\Delta$  – высота выступа ребристой шероховатости.

Наибольшее сопротивление получилось при расстоянии между элементами шероховатости  $S = 8\Delta$  и  $\frac{h}{\Delta} = 2 \dots 7$ , подтверждая, таким образом, результаты Е.А. Замарина.

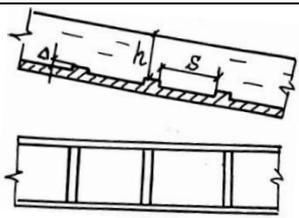
В работе Р.Т. Адигамова [4] представлен обобщенный вид метода Замарина-Пикалова для уклона  $i = 0,15$  в виде формулы (1.2) для различных видов шероховатостей, представленных в таблице 1.1.

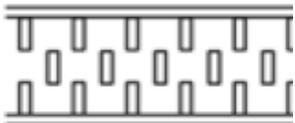
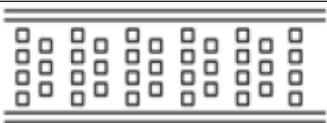
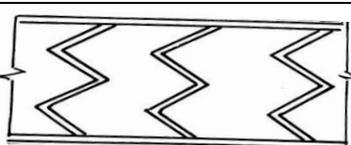
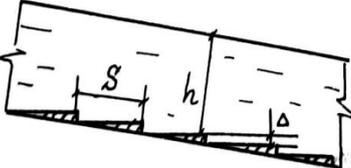
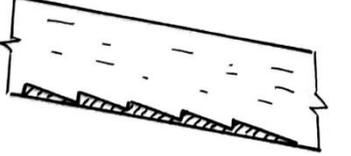
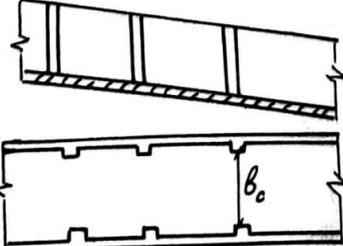
$$C_{сн} = \frac{1000}{A - E \cdot \alpha \pm D \cdot \beta} \quad (1.2)$$

где: А, Е, D – опытные коэффициенты, зависящие от вида шероховатости;

$$\alpha = \frac{h}{\Delta}; \beta = \frac{B}{h}.$$

Таблица 1.1 – Эмпирические коэффициенты к расчету искусственной шероховатости [4]

Название шероховатости	Форма шероховатости	Значение эмпирических коэффициентов для скоростного множителя $C_{сн}$ по Замарину-Пикалову			Условия применения
		A	(6)E	D	
1	2	3	4	5	6
Нормальные бруски		47,5	-1,2	+0,1	$8 \geq \frac{h}{\Delta} \geq 3$

1	2	3	4	5	6
Бруски разбежку		54,2	-2,1	+0,33	$8 \geq \frac{h}{\Delta} \geq 3$
Шашки		52,0	-5,1	-0,8	$5 \geq \frac{h}{\Delta} \geq 2$
Одиночный зигзаг		85,8	-3,9	-0,8	$8 \geq \frac{h}{\Delta} \geq 3,5$
Двойной зигзаг		116,1	-6,1	-1,2	$12 \geq \frac{h}{\Delta} \geq 5$
Ступени по течению		22,0	-0,67	+1000	$7 \geq \frac{h}{\Delta} \geq 3$
Ступени против течения		38	-1,33	+1000	$7 \geq \frac{h}{\Delta} \geq 3$
Бортовая шероховатость		$59\sqrt{m} + 131 \cdot (F - 1)$ При $i = 0,15$ $F = 1,08 \div 1,2$ $S = 10 \div 12$			$m = \frac{h}{b_c}$ $m = 0,12 \div 0,5$ $F = \frac{b}{b_c}$

Работы Е.А. Замарина и Ф.И. Пикалова были дополнены исследованиями О.М. Айвазяна (1962г.) (рис. 1.5), который расширил диапазон уклонов  $0,05 < i < 0,57$  и предложил общий способ расчета быстротоков с ребристыми элементами сопротивления [3, 7, 18].

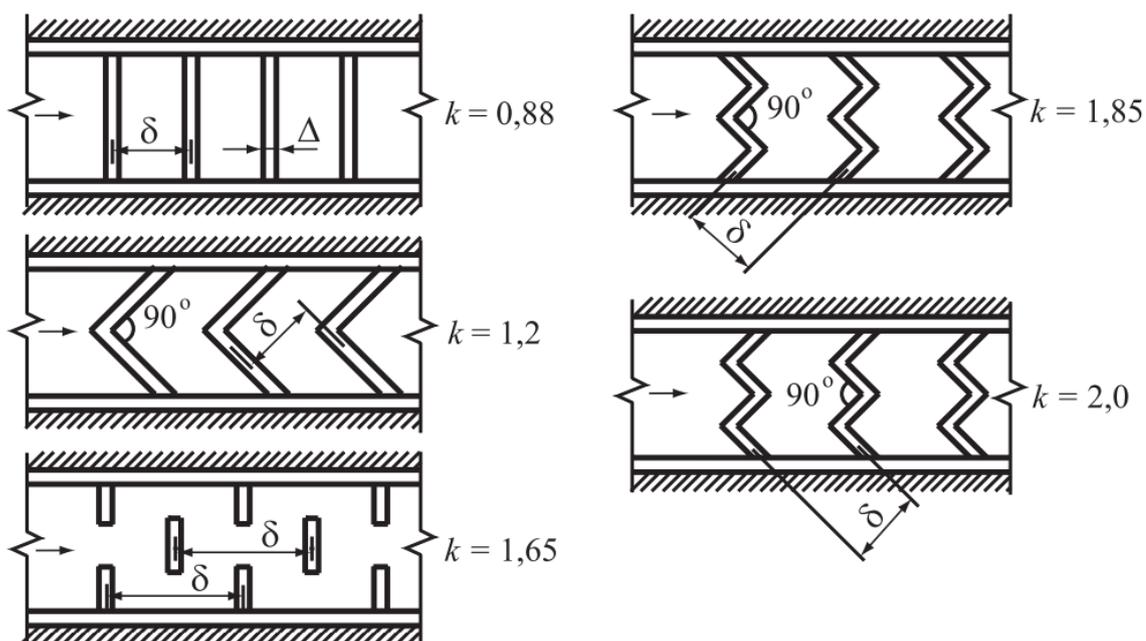


Рисунок 1.5 – Характерные параметры усиленной шероховатости, изученные О.М. Айвазяном [19]

Обзор справочной литературы по гидравлическим расчётам и ряда работ [2, 3, 19, 24, 30] показал, что рекомендуется проектировать ребристые донные элементы сопротивления квадратного сечения ( $\Delta \times \Delta$ ) и  $\delta \approx 7 \dots 8 \Delta$ , где  $\delta$  – расстояние между двумя рядами ребер шероховатости высотой  $\Delta$ .

Следует отметить, что способ расчета быстротоков с донной ребристой искусственной шероховатостью, предложенный О.М. Айвазяном, справедлив при условно равномерном движении, при котором для установившегося движения уклон свободной поверхности  $I$  равен уклону дна  $i$ , т.е.  $I = i$ . Это условие выполняется при относительной глубине потока  $h$  больше трёх высот искусственной шероховатости  $\Delta$ :  $h \geq 3\Delta$ . В этом случае коэффициент Дарси можно выразить эмпирической зависимостью:

$$\lambda = M + 2i^2 - Ni \cdot \lg i \cdot \left( \frac{\Delta}{h} \cdot \frac{b}{\chi} \cdot \frac{1}{\sqrt{\Pi_k}} \right), \quad (1.3)$$

где:  $M$  и  $N$  – числовые параметры, зависящие от типа усиленной шероховатости;  $i$  – уклон дна водоската;  $\Delta$  – высота ребер шероховатости;  $h$  – глубина потока над ребром;  $b$  – ширина водоската по дну;  $\chi$  – смоченный периметр;  $\frac{b}{\chi}$  – отношение,

учитывающее роль ребристой шероховатости во всем смоченном периметре;  $\Pi_k$  – параметр кинетичности.

Одним из наиболее распространённых способов гашения энергии потока воды на низко- и средненапорных гидроузлах является применение водобойных колодцев и стенок в нижнем бьефе водосбросов. При этом на сливной грани водосливных плотин тратится незначительная часть энергии сбрасываемого потока, а основное гашение энергии происходит в водобойном колодце в виде местных потерь энергии. Баланс потерь энергии при этом имеет вид:

$$\Sigma h_w = h_{дл} + h_m, \quad (1.4)$$

где:  $\Sigma h_w$  – сумма гидравлических потерь энергии;  $h_{дл}$  – потери по длине сливной поверхности водослива;  $h_m$  – местные потери энергии в водобойном колодце.

Гидравлические потери по длине сливной поверхности определяются по зависимости [53]:

$$h_{дл} = \frac{\lambda \cdot L \cdot v^2}{4 \cdot R \cdot 2g}, \quad (1.5)$$

где:  $\lambda$  – коэффициент гидравлических потерь по длине, коэффициент Дарси;  $R$  – гидравлический радиус потока;  $L$  – длина рассматриваемого участка потока;  $v$  – средняя скорость движения воды в потоке;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения.

Из (1.5) можем получить выражение для определения  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{8gR}{v^2} \cdot \frac{h_{дл}}{L} = \frac{8gR}{v^2} \cdot i. \quad (1.6)$$

Используя уравнение неразрывности потока на водоскате с ребристой шероховатостью, уравнение (1.5) можно привести к следующему виду:

$$\lambda = \frac{8gRi}{v^2} = \frac{8gi}{Q^2} \cdot \frac{\omega^3}{\chi}. \quad (1.7)$$

Подставляя значение коэффициента  $\lambda$  из уравнения (1.3) в уравнение (1.1), получим:

$$\Delta = \frac{\frac{8g}{Q^2} \cdot \frac{M + 2i^2}{i}}{-lgi} \cdot h \cdot \frac{\chi}{b} \sqrt{\Pi_k}$$

или

$$\frac{\omega^3}{\chi} + \frac{Q^2}{8g} b N \Delta \cdot \lg i \cdot \frac{1}{h \chi \sqrt{\Pi_k}} = \frac{Q^2}{8g} \cdot \frac{M + 2i^2}{i}. \quad (1.8)$$

Заменяя  $\sqrt{\Pi_k}$  на его значение  $\frac{q}{\sqrt{g \cdot h \cdot \sqrt{h}}}$ , уравнение (4) примет вид:

$$\frac{h^3}{\chi} + \frac{1}{8\sqrt{g}} q N \Delta \cdot \lg i \cdot \frac{\sqrt{h}}{\chi} = \frac{1}{8g} \cdot \frac{q^2}{b} \cdot \frac{M + 2i^2}{i}. \quad (1.9)$$

О.М. Айвазян также предлагает формулу (1.10):

$$\frac{8g R i_0 \omega^2}{Q^2} = 0,04 + 2,29 i_0^2 + k i_0^{0,1} \frac{\Delta}{R} \left(\frac{b}{\chi}\right)^2 \quad (1.10)$$

где:  $Q$  – расчетный расход;  $\chi$ ,  $\omega$  и  $R$  – соответственно смоченный периметр, площадь живого сечения потока, и гидравлический радиус, которые определяются по глубине, начиная от верха ребер шероховатости;  $i_0$  – уклон дна;  $k$  – коэффициент, зависящий от типа шероховатости (рис. 1.1);  $b$  – ширина лотка.

В 1999 году, французские исследователи S. RICHARD, J. CHORDA и M. LARINIER из института механики жидкости города Тулузы исследовали призматические элементы шероховатости на снижение мощности и скорости потока в рыбопропускных сооружениях для обеспечения возможности рыб к плаванию [97]. Эксперимент был сделан в лабораторных условиях в стеклянном канале длиной 12 м, шириной 25 см и высотой 35 см с возможностью изменения уклона от 0 до 10%.

В качестве элементов искусственной шероховатости применялись деревянные цилиндрические и призматические шпильки высотой  $K = 8$  см, диаметром 2,8 см или с сечением 2,8 см на 2,1 см с шагом  $L = 0,2$  и  $0,4$  м по длине. Также усилили шероховатость дна мелкими цилиндрическими деталями высотой 1,4 см и диаметром 1,4 см. Детальные условия, в которых проводили эксперименты, описаны на рисунках 1.6 – 1.8 и в таблице 1.2.

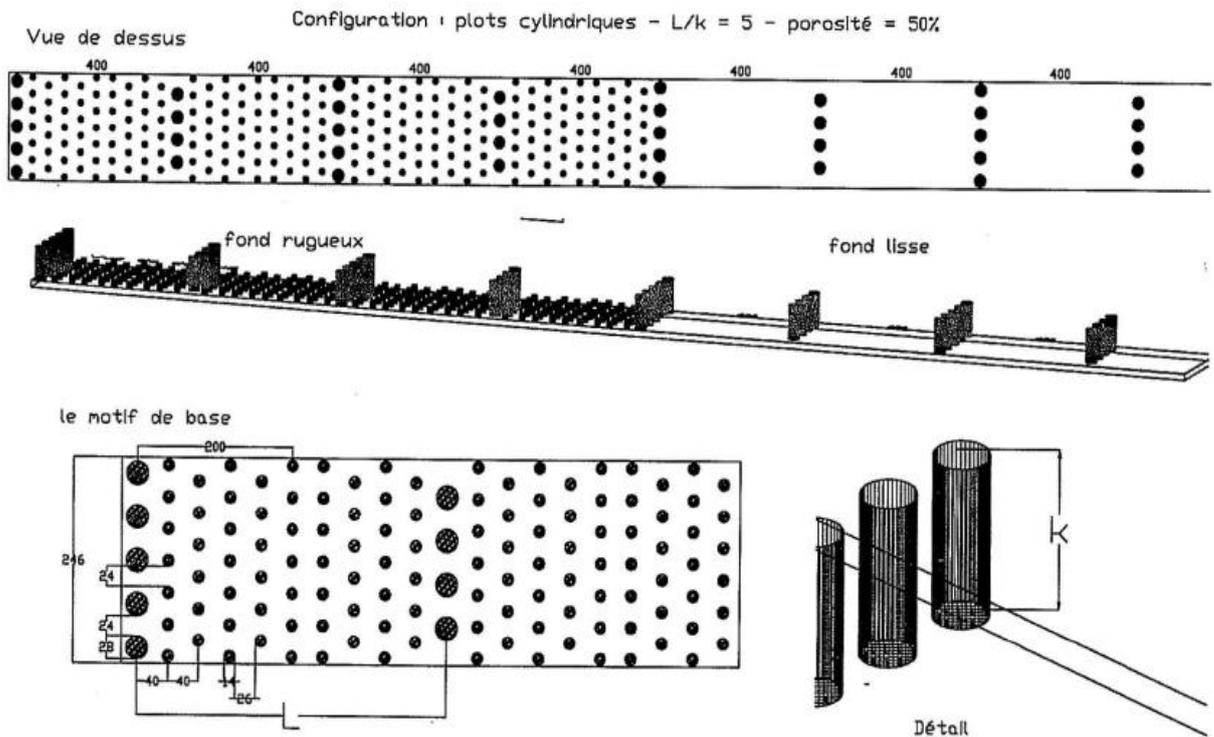


Рисунок 1.6 – Общий вид расположения цилиндрической шероховатости:  $L/k = 5$ ;  $\phi = 50\%$  - соотношение суммы интервалов между элементами шероховатости по ширине к общей ширине.

Таблица 1.2 – Исследуемые конструктивные элементы [97]

Дно	Сечение элементов шероховатости	$\phi$ , %	$L/k$	Размещение в плане штук – число рядов	Уклон канала I, %
Шероховатое	Круглое	50	5	5-4	0,5; 1; 3; 5 и 7
Гладкое	Круглое	50	5	5-4	0,5; 1; 3; 5 и 7
Шероховатое	Круглое	50	2.5	5-4	1; 3; 5 и 7
Гладкое	Круглое	50	2.5	5-4	1; 3; 5 и 7
Гладкое	Круглое	75	2.5	3-2; 2-2	1; 3; 5 и 7
Гладкое	Прямоугольное	50	2.5	5-4	1; 3; 5 и 7
Гладкое	Прямоугольное	42	2.5	5-4	1; 3; 5 и 7
Гладкое	Прямоугольное	62	2.5	5-4	1; 3; 5 и 7

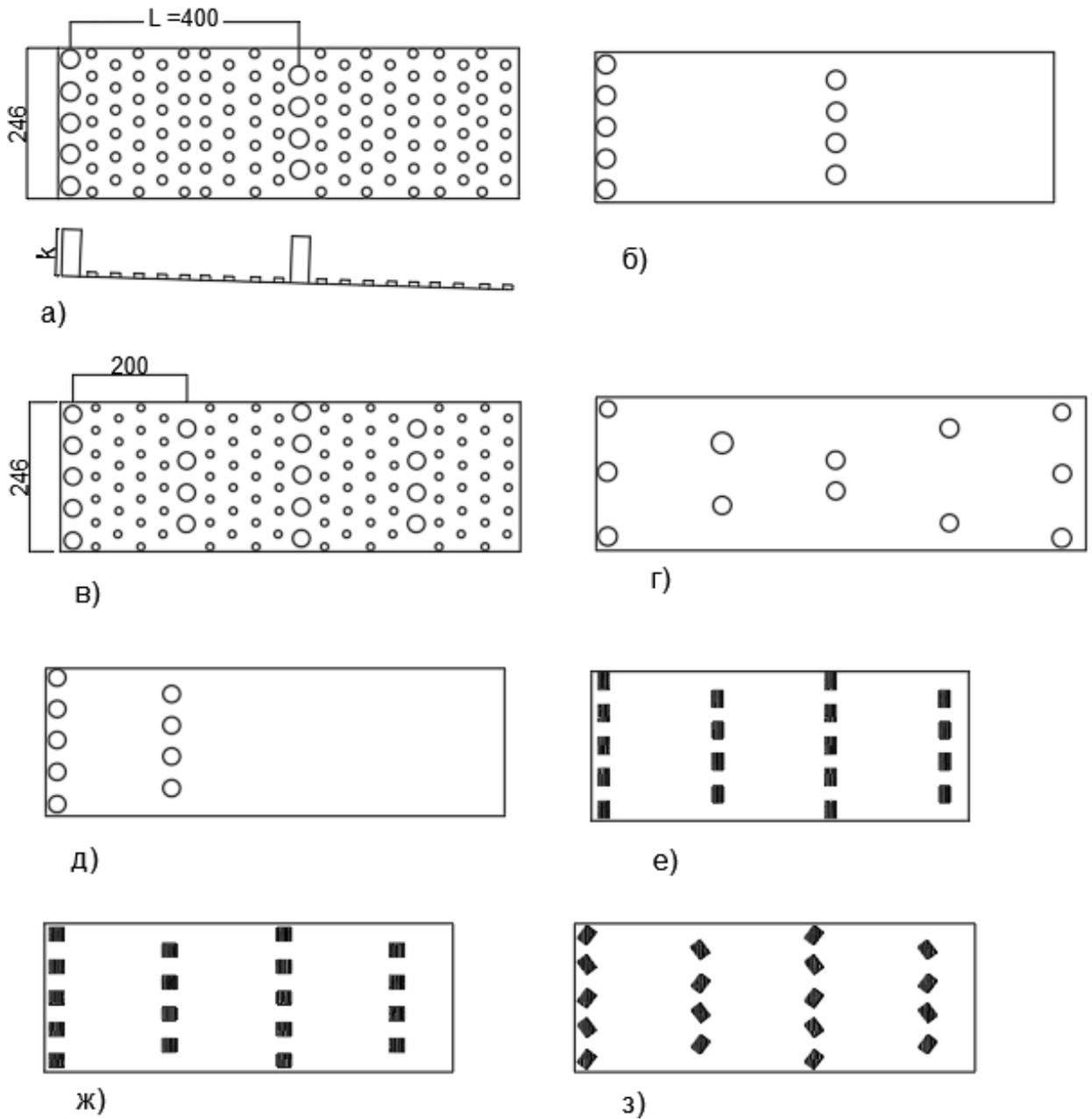


Рисунок 1.7 – Исследованные формы и расположения элементов шероховатости в плане [89]: а) - круглое сечение,  $\theta = 50\%$ ,  $L/k = 5$ , шероховатое дно; б) - круглое сечение,  $\theta = 50\%$ ,  $L/k = 5$ , гладкое дно; в) - круглое сечение,  $\theta = 50\%$ ,  $L/k = 2,5$  шероховатое дно; г) круглое сечение,  $\theta = 75\%$ ,  $L/k = 2,5$ , гладкое дно; д) - круглое сечение,  $\theta = 50\%$ ,  $L/k = 2,5$ , гладкое дно; е) - прямоугольное сечение,  $\theta = 50\%$ ,  $L/k = 2,5$ , гладкое дно; ж) - прямоугольное сечение,  $\theta = 62\%$ ,  $L/k = 2,5$ , гладкое дно; з) - прямоугольное сечение,  $\theta = 42\%$ ,  $L/k = 2,5$ , гладкое дно

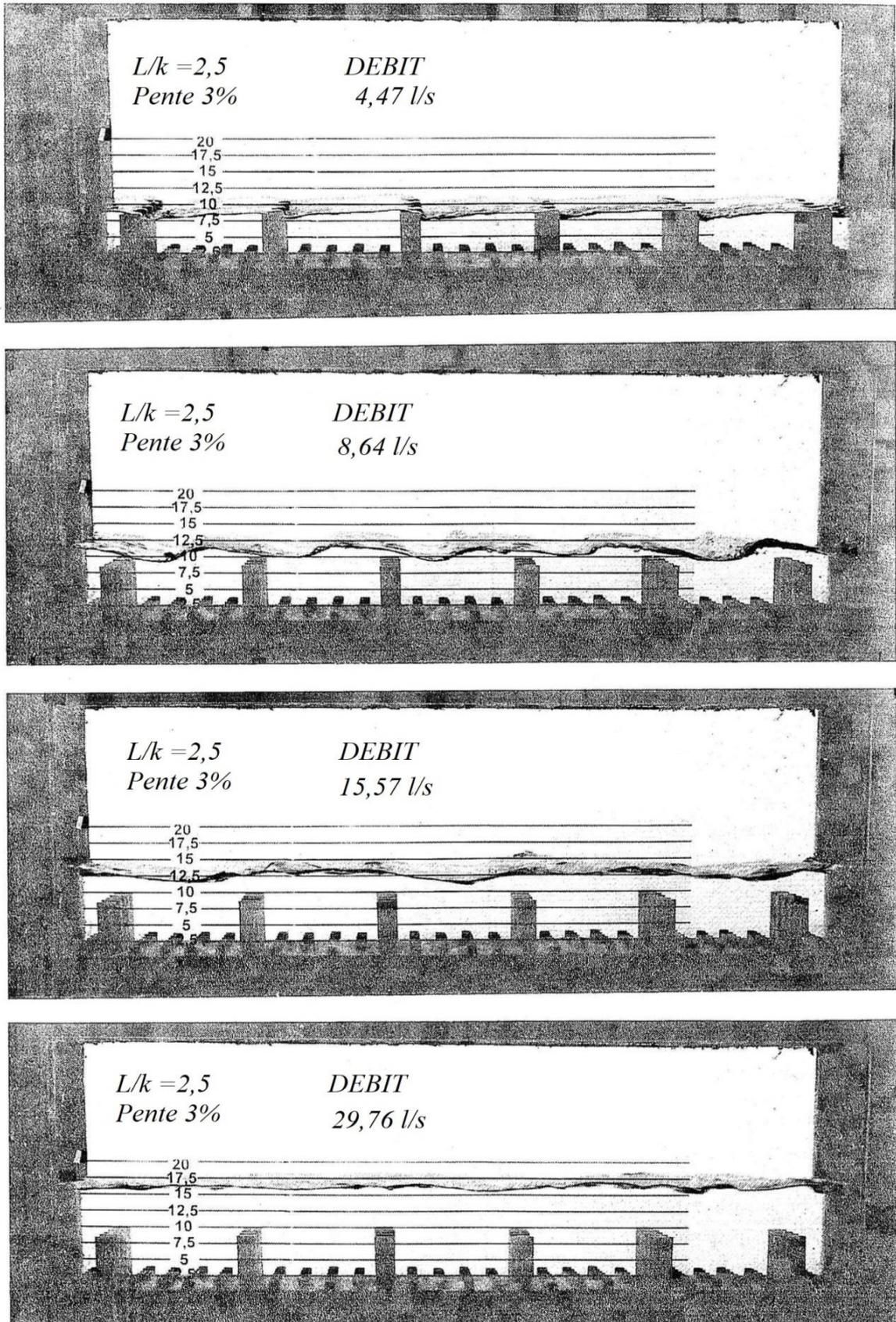
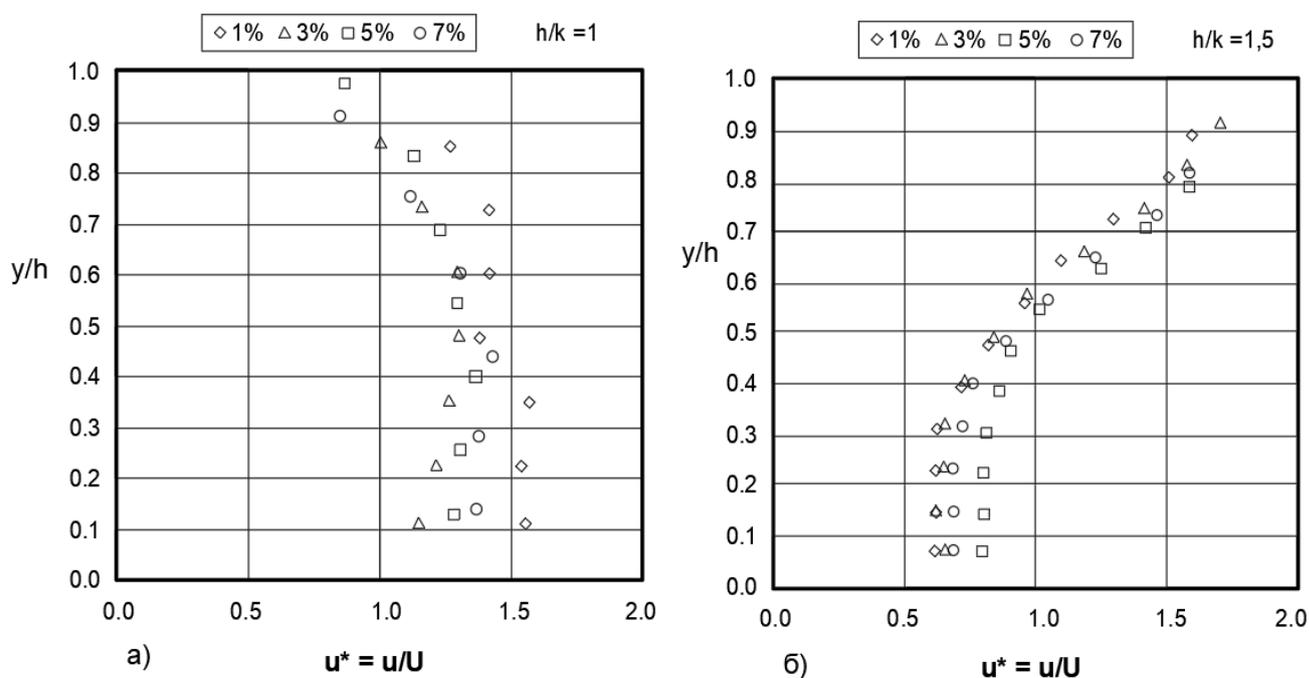


Рисунок 1.8 – Вид течения при разных расходах,  $L/k = 2,5$ ;  $I = 0,03$  [97]

Результаты их исследований в основном выразили графически через относительные безразмерные величины скорости, расхода, погружения и др. (рис. 1.9 – 1.10) , где:  $h^* = h/k$ ;  $y^* = y/h$ ;  $q^* = \frac{Q}{B \cdot g^{0.5} \cdot k^{1.5}}$ ;  $u^* = u/U = u \cdot \frac{B \cdot h}{Q}$ ;  $h$  - глубина воды;  $k$  - высота элементов шероховатости;  $y$  - расстояние от дна до рассматриваемой точки;  $Q$  – расход воды;  $g$ - ускорение силы тяжести;  $u$  – измеренная скорость воды;  $U$  – вычисленная скорость по формуле  $U = \frac{Q}{B \cdot h}$ ;  $L$  – расстояние между элементами шероховатости по длине;  $I$  – уклон дна канала;  $\theta$  - соотношение суммы интервалов между элементами шероховатости по ширине к общей ширине.



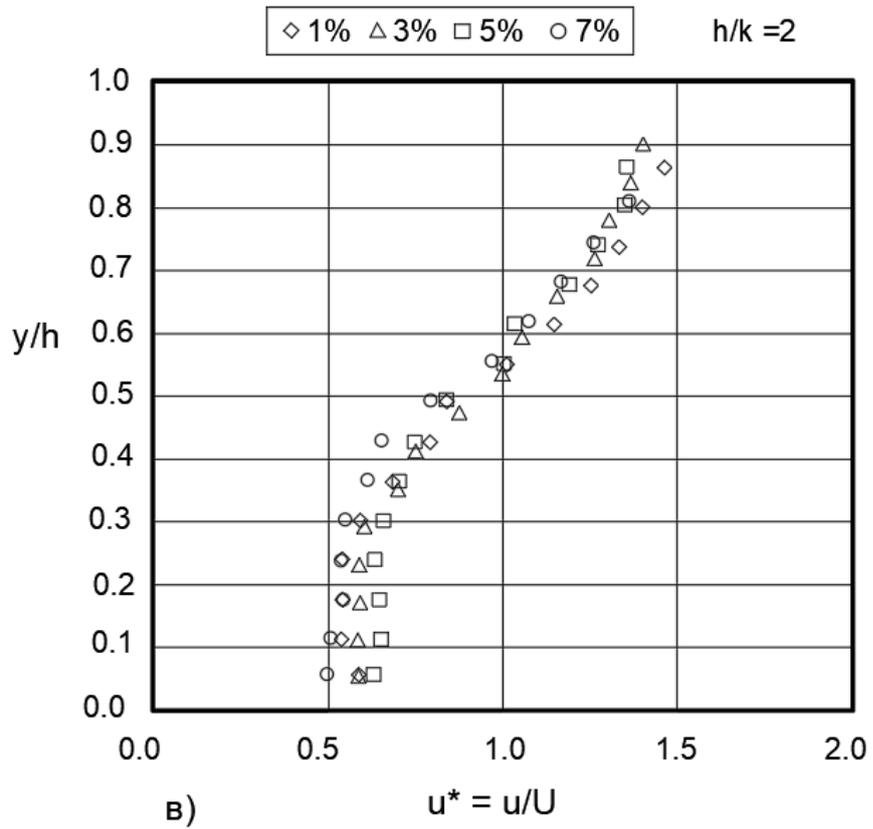


Рисунок 1.9 – Профиль безразмерных скоростей для трех уровней погружения: а) -  $h/k = 1$ ; б) -  $h/k = 1,5$ ; в) -  $h/k = 2$

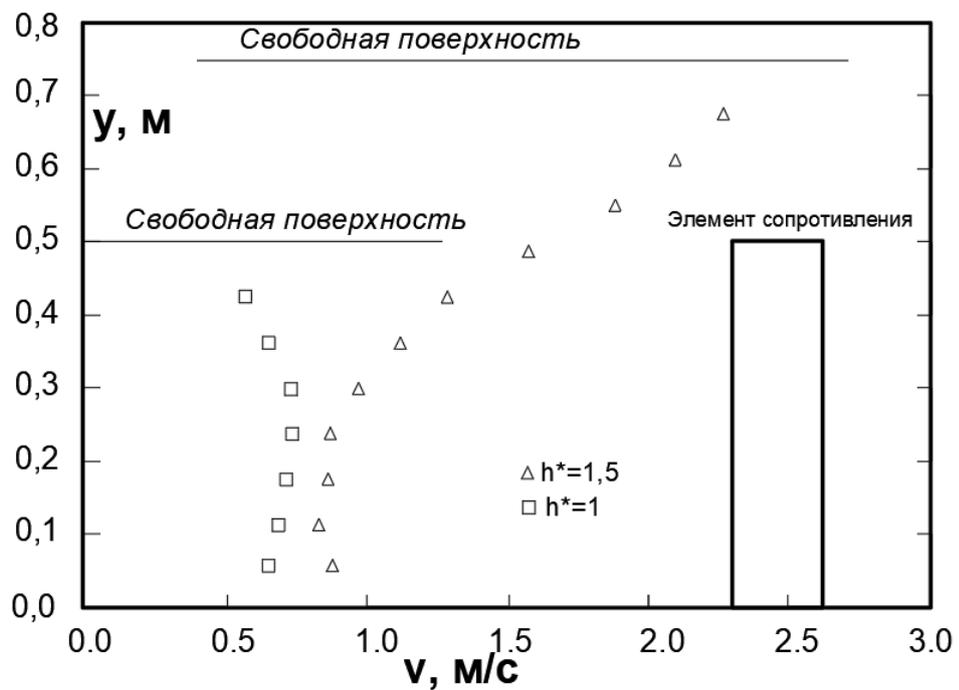


Рисунок 1.10 – Профиль скоростей при  $k = 0,5$  м,  $\theta = 50\%$ ,  $I = 3\%$ ,  $L/k = 2,5$

Авторам удалось установить влияние размеров, формы и шага размещения элементов шероховатости на параметры потока. По итогам исследований они пришли к выводу о том, что при сохранении  $\theta$ , форма сечения элементов искусственной шероховатости в плане не влияет на параметры потока (где  $\theta$  - соотношение суммы интервалов между элементами шероховатости по ширине к общей ширине). Дополнительная низкая шероховатость дна (рис. 1.6 и 1.8) не существенно влияют на скорость потока при небольшом погружении ( $h$ ). Однако при  $h/k = 2$  они влияют на вертикальный профиль скоростей (низкие скорости у дна и большие скорости у свободной поверхности). Плотность элементов шероховатости по ширине имеет значительное влияние на скорость и уровни воды. Повышение  $\theta$  на 20% приводит к снижению уровня воды на 20%.

Результаты исследования профессора Афинского национального технического университета (Греция) Жорж С. Кристодуру (George С. Christodoulou) частично расходятся от выше процитированных выводов. По его выводам, форма сечения элементов сопротивления играет большую роль [89]. Christodoulou исследовал несколько видов элементов сопротивления в канале с уклоном 0,165 (рис. 1.11). Результаты его исследований представлены на рисунке 1.12. По его выводам следует отметить, что при одной и той же фронтальной плотности расстановки элементов шероховатости по течению, высокую эффективность гашения энергии потока показали конструкции с острыми краями, такие как вертикальные пластины, блоки и кубы.

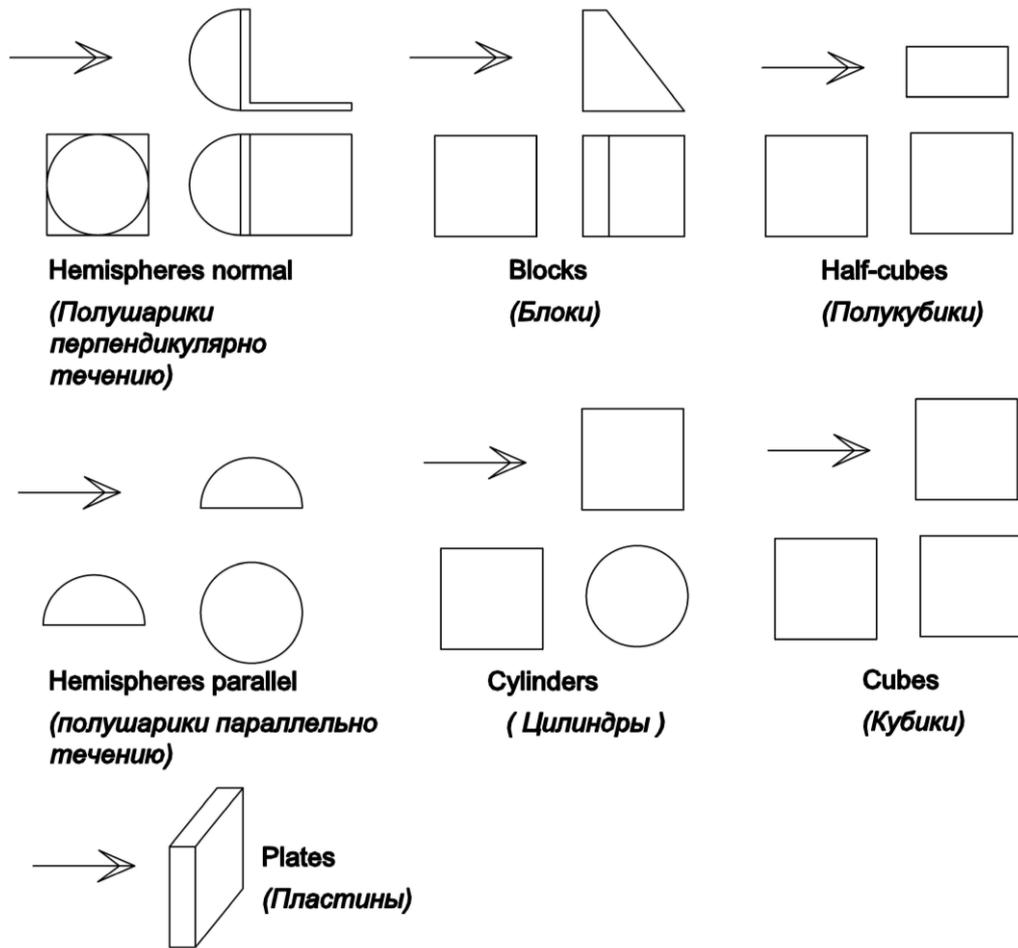


Рисунок 1.11 – Схемы исследованных сопротивлений Жоржем С. Кристодулу [89]

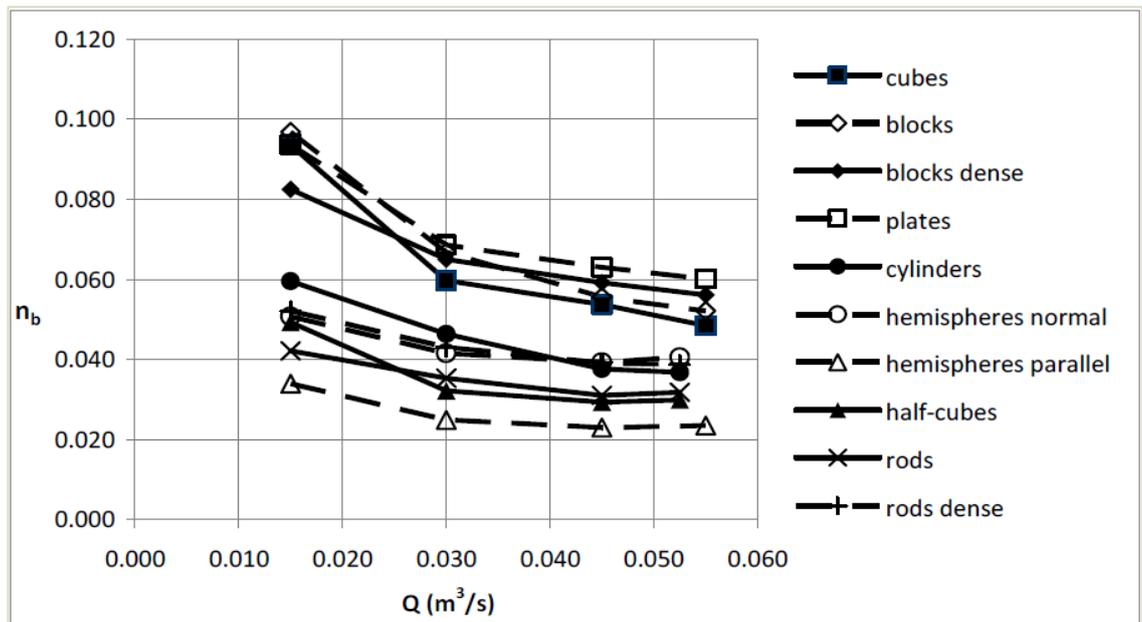


Рисунок 1.12 – Зависимость коэффициента шероховатости  $n_b$  от вида элементов усиленной шероховатости и пропускаемого расхода  $Q$

Установка шероховатости с острыми краями приводила к большим значениям коэффициента шероховатости  $n_b$  по сравнению с элементами аналогичного размера с закругленными краями. Таким образом, сопротивление цилиндров и полушарий, нормальных к потоку с той же высотой и площадью проекции в плане, что и кубы, было значительно ниже.

В 2006 году в лаборатории университета «University of Witwatersrand», Йоханнесбург (ЮАР), Самсон Машау (Samson Mashau) исследовал влияние элементов шероховатости средней крупности на сопротивление потоку в открытых каналах [91], основываясь на шкалы шероховатости по классификации Батерста (Bathurst) [83], который подразделяет шероховатость на три группы по крупности: малая, средняя и крупная шероховатость (табл. 1.3).

Таблица 1.3 – Шкалы шероховатости по Bathurst [83]

Малая шероховатость*	Средняя шероховатость	Крупная шероховатость
$\frac{y}{D_{50}} > 7,5$	$2 < \frac{y}{D_{50}} < 7,5$	$\frac{y}{D_{50}} < 2$
$\frac{y}{D_{84}} > 4$	$1,2 < \frac{y}{D_{84}} < 4$	$\frac{y}{D_{84}} < 1,2$

\*Примечание:  $D_{50}$  — средний размер частиц,  $D_{84}$  — 84-процентный диаметр частиц,  $y$  — глубина воды от дна

Эксперименты были выполнены в стеклянном лотке с уклоном дна 0,0047, длиной 10 м и шириной 0,38 м, а в качестве элементов шероховатости применялись полушарики диаметром 112, 72 и 46 мм, которые располагались в шахматном виде, а в некоторых экспериментах и параллельно (рис. 1.13).

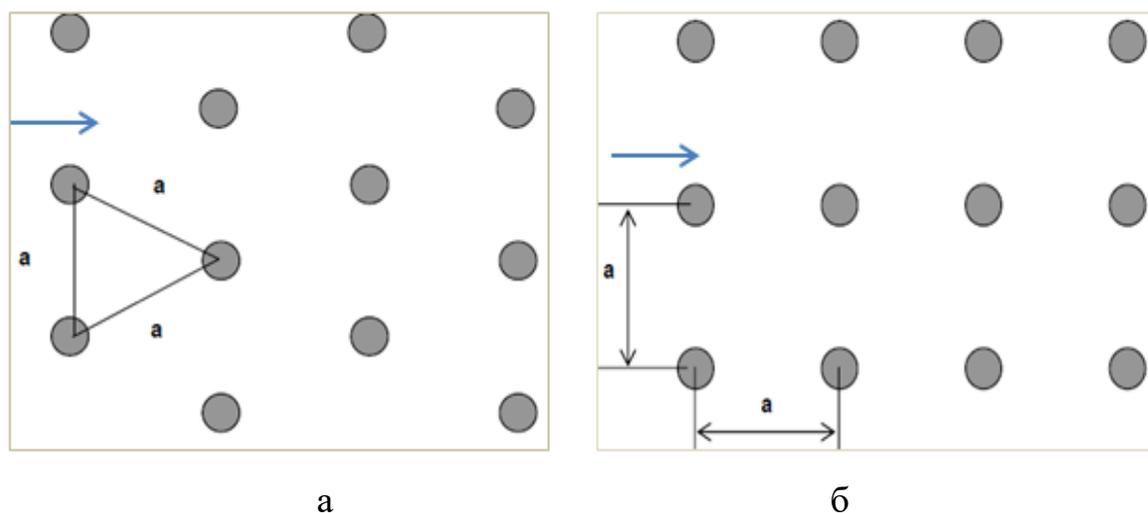


Рисунок 1.13 – Схема расстановки полушариков в плане на лотке [83]: а - в шахматном виде; б – параллельно

Самсон Машау проводил все эксперименты в условиях равномерного потока. Расстановка шероховатости (в шахматном и параллельном порядке) была создана в наклонном лотке с использованием полушариков диаметром 112 мм, 72 мм и 46 мм. Скорость потока рассчитывалась экспериментально (см. таблицу 1.4).

Таблица 1.4 – Экспериментальные условия для серии опытов [91]

№ п/п	Количество запусков	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$y, \text{ м}$	*АС, %	$D, \text{ мм}$	$h, \text{ мм}$	$a, \text{ мм}$	№./ шт.	Расстановка
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	3	0.0241 - 0.0379	0.0715 - 0.1135	0	-	-	-	-	-
2	7	0.0044 - 0.0546	0.0865 - 0.2585	62	112	56	134	24	шахматное
3	6	0.0011 - 0.0552	0.0540 - 0.2555	30	112	56	177	12	шахматное
4	5	0.0026 - 0.0427	0.0575 - 0.2005	26	112	56	190	10	параллельно
5	5	0.0027 - 0.0430	0.0350 - 0.1635	11	72	36	190	10	параллельно

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6	5	0.0027 - 0.0422	0.0360 - 0.1630	15	72	36	177	14	шахматное
7	5	0.0060 - 0.0421	0.0747 - 0.2030	29	72	36	123	27	шахматное
8	6	0.0026 - 0.0498	0.0515 - 0.2320	64	72	36	77	60	параллельно
9	4	0.0026 - 0.0260	0.0310 - 0.1030	6	46	23	177	14	шахматное

\*Примечание: AC – площадь, покрытая полушариками, D - диаметр, h - высота полушариков, a - шаг, No./m -число полушариков на 1м длины, y - глубина воды

Автор пришёл к выводу, что для элементов шероховатости средней крупности (по классификации Батерста) коэффициент шероховатости (коэффициент Гоклера — Маннинга) имеет вид:

$$n = 0.113 \left( \frac{D}{Sp} \right)^{0.999} \left( \frac{y}{h} \right)^{-0.012D+0.376} \quad (1.11)$$

Где: D – диаметр элементов шероховатости; Sp – расстояние между элементами шероховатости; y – глубина воды; h – высота элементов шероховатости.

## 1.2 Общие сведения о гасителях энергии в нижнем бьефе плотин

Для надежной работы водопропускных сооружений необходимо запроектировать устройство нижнего бьефа, которое эффективно обеспечивает гашение избыточной кинетической энергии потока и безопасное сопряжение бьефов. Многие исследователи со всего мира продолжают до сих пор работать над вопросом оптимального сопряжения бьефов гидроузлов.

Ф.Х. Аубакирова проводила обобщенный анализ наиболее распространенных способов гасящих устройств нижнего бьефа [11]. Ею показано, что выбор той или иной формы сопряжения бьефов диктуется множеством факторов (тип грунта основания, высота плотины, уровень воды в нижнем бьефе

и т.д.). Одной из возможных конструкций концевой части относительно длинных водосбросов является водобой с гасителями, на подходе к которому предусматривается короткий, но достаточно плавный участок спуска, рассчитываемый по координатам падающей струи, водослива или по эвольвенте, что обеспечивает донный режим сопряжения.

В зависимости от условий входа сбросного потока в нижний бьеф, характера взаимодействия сбросного и бытового потоков могут возникнуть различные режимы сопряжения. Форма и конструкция концевого участка водосбросного тракта зависит от схемы сопряжения бьефов. Не редко применяют сегодня при условии относительно прочного основания конструктивное решение перехода от быстотока к водобоем в виде низкого уступа с отлётом струи, однако часто при этом возникает поверхностный режим, создающий значительные колебания уровня нижнего бьефа. Для гашения избыточной энергии потока всё чаще в нижнем бьефе водосливных плотин применяют: отброс струи, соударение струй, специальные камеры гашения энергии потока, сочетание разных видов гасителей на водобое, либо комбинацию двух или нескольких способов. Однако, из-за высокой подверженности гасителей ударного действия кавитационной эрозии [13, 15, 25, 70, 82], их применение всё-таки чаще всего рассматривается при проектировании средне- и низконапорных водопропускных сооружений.

### **1.2.1. Гашение энергии потока на водобое водосливных плотин**

Из наиболее известных конструктивных решений, обеспечивавших гашения энергии потока на гидроузлах, и создающее благоприятные условия для интенсивного развития внутренних сопротивлений, широкое распространение получило применение *простейших* гасителей энергии (водобойных колодцев и стенок) и *специальных* гасителей (пирсы, шашки, зубчатые пороги, растекатели, балочные гасители, носки-расщепители различной формы и различных комбинаций) [21]. В мелиоративном гидротехническом строительстве средне- и низконапорных сооружений нашли широкое применение специальные

конструкции гасителей, предотвращающих образование сбойных течений в нижнем бьефе, обеспечивая отсутствие сбоя потока при разных схемах маневрирования затворами водопропускных отверстий водосброса [12, 14, 15, 22, 35, 47, 48, 71, 73, 74]. Такие гасители устанавливаются либо на гладком водобое, либо в водобойном колодце, предназначенного для гашения всей или части кинетической энергии потока в нижнем бьефе, превращающуюся в нём в энергию турбулентного перемешивания. Его устройство целесообразно при недостаточной бытовой глубине в отводящем канале за водосбросом. При этом незначительная часть энергии сбрасываемого потока теряется благодаря гидравлическим потерям на трение по длине сливной грани водосбросного тракта, а основная часть энергии сбрасываемого потока гасится в водобойном колодце в виде местных потерь энергии.

Суммарная потеря энергии  $\Sigma h_w$  при этом имеет вид:

$$\Sigma h_w = h_{дл} + h_m, \quad (1.12)$$

где:  $h_{дл}$  – потери по длине сливной поверхности водослива;  $h_m$  – местные потери энергии в гидравлическом прыжке.

Гидравлические потери по длине сливной поверхности водослива определяются по зависимости [15;16]:

$$h_{дл} = \frac{\lambda \cdot L \cdot v^2}{4 \cdot R \cdot 2g}, \quad (1.13)$$

где:  $\lambda$  – коэффициент гидравлических потерь по длине (коэффициент Дарси);  $R$  - гидравлический радиус потока;  $L$  -длина рассматриваемого участка потока;  $v$  - средняя скорость движения воды в потоке;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения.

Гидравлические потери энергии в гидравлическом прыжке можно найти по выражению [3]:

$$h_m = \frac{(h'' - h')^2}{4 \cdot h' \cdot h''}, \quad (1.14)$$

где:  $h'$  – глубина потока в начале прыжка в сжатом сечении;  $h''$  – вторая сопряжённая глубина в конце гидравлического прыжка.

В свою очередь, вторая сопряжённая глубина гидравлического прыжка определяется по зависимости [3, 68]:

$$h'' = \frac{h'}{2} \cdot (\sqrt{8 \cdot Fr_1 + 1} - 1), \quad (1.15)$$

где  $Fr_1 = \frac{v^2}{gh'}$  - число Фруда в сжатом сечении.

Для увеличения местных потерь энергии на водобое нередко предусматривают дополнительные конструктивные элементы сопротивления различного вида (растекатели, зубчатые пороги, пирсы, шашки и др.), способные улучшить работу нижнего бьефа [12, 47, 48, 54, 73].

Исследование нижнего бьефа с гасителями ударного действия показало, что искусственная шероховатость, помимо гашения энергии потока, играет большую роль и в распределении скорости воды по ширине [48; 71]. Элементы сопротивления позволили снизить коэффициент Кориолиса с диапазона  $\alpha = 1 \dots 1,5$  на  $\alpha = 1,0 \dots 1,2$ . Снижение диапазона коэффициента Кориолиса свидетельствует о приближении скорости потока к более равномерному распределению по ширине. Достижение снижения скорости потока и ее более равномерного распределения позволяет снизить риски размыва нижнего бьефа.

### 1.2.2. Отброс струи

Отброс струи в нижнем бьефе любых водосбросных сооружений способствует расширению струи с последующей ее аэрацией в воздухе (рис. 1.14). В струю проникает воздух, который смешивается с частицами воды и образует двухфазную среду – смесь вода-воздух. Скорость частиц воды уменьшается из-за трения о воздух [28, 32, 55].

Согласно нормативным документам Российской Федерации, в частности СП 40.13330.2012 [65], при сопряжении бьефов отбросом струи в конце водосброса следует предусматривать носок-трамплин, отбрасывающий поток воды в нижний бьеф на безопасное для сооружений расстояние, а в узких створах

– исключая опасное воздействие потока на берега и т.п. Для высоконапорных плотин, построенных на скальном основании, проектирование водосбросов с носком-трамплином в ряде случаев оказывается рациональным вариантом сопряжения бьефов, а для низко- и средне напорных чаще предусматривают водобойные колодцы. Однако на водосбросе плотины Саяно-Шушенского гидроузла ( $H_{пл} = 242$  м) был устроен водобойный колодец, что не исключило ряда аварийных ситуаций ещё при возведении гидроузла.



Рисунок 1. 14 – Плотина Суапити (Souapiti) в республике Гвинея

### **1.2.3. Устройство гасителей энергии потока непосредственно на сливной грани плотины**

Гашение энергии потока в нижнем бьефе требует надежных, массивных конструкций и соответственно больших затрат на их возведение. Проектировщики гидроузлов по возможности ищут вариант строительства водосливных плотин таким образом, чтобы сэкономить на гашение энергии потока, но при этом, не нарушая установленные нормы безопасности.

В дополнении к выше рассмотренным способам сопряжения бьефов, некоторые гидротехники при проектировании предусматривают варианты установки гасителей непосредственно на водоскате бетонных водосливных

плотин. Уже имеется множество, в том числе и современных водосливных низко-, средне- и высоконапорных плотин по всему миру, имеющих гасители непосредственно на водосливной грани транзитной части водосбросов, как грунтовых, так и бетонных плоти (рис. 1.15, 1.16).



а



б

Рисунок 1.15 – Этапы строительства плотины Хидасэ на р. Голубой Нил в Эфиопии: а – 2020г.; б – 2021 г.



Рисунок 1.16 – Водосливная плотина Богучанской ГЭС со ступенями на сливной грани

В работах М.И. Мирзоева [49] и Нань Фэна [50, 51, 52] приведён анализ работы ряд плотин со ступенями на низовой грани, построенных по всему миру, начиная с древних веков (около 3000 лет) по настоящее время (в России, Китае, США, Великобритании, Южной Африке, Австралии, Украине, Индии и др.). Анализ исследований, касающихся диссипации потока на водосливах со ступенчатой или имеющей рёбра усиленной шероховатости сливной гранью при разных значениях уклона сливной грани, относительных размеров ступеней, высоты плотин и т.п. показал, что процент гашения энергии находится в пределах от 75% (Chanson, 2000 г.) до 95% (Al-Ali, 1993 г.) [60]. При этом общее мнение исследователей было: потеря энергии формируется за счёт взаимодействия потока с горизонтальными вихрями. При этом влияние шероховатостей элементов водоската, в том числе и самих ступеней, не учитывалось. Мирзоевым было экспериментально установлено, что возрастание потери энергии потока на негладком водоскате со ступенями, границы смены режимов и параметрических величин течений взаимосвязаны с удельными расходами, габаритами ступеней и уклоном транзитной части низовой грани бетонной плотины. Было доказано, что наличие наиболее эффективной конструкции сопротивлений на водоскате позволяет значительно уменьшить энергию потока на носке водослива или на участке сопряжения водоската с горизонтальным дном нижнего бьефа.

Нань Фэн [52] изучая ступенчатую бетонную водосливную поверхность определил эффективность гашения избыточной энергии потока с помощью закона сохранения энергии (рис. 1.17).

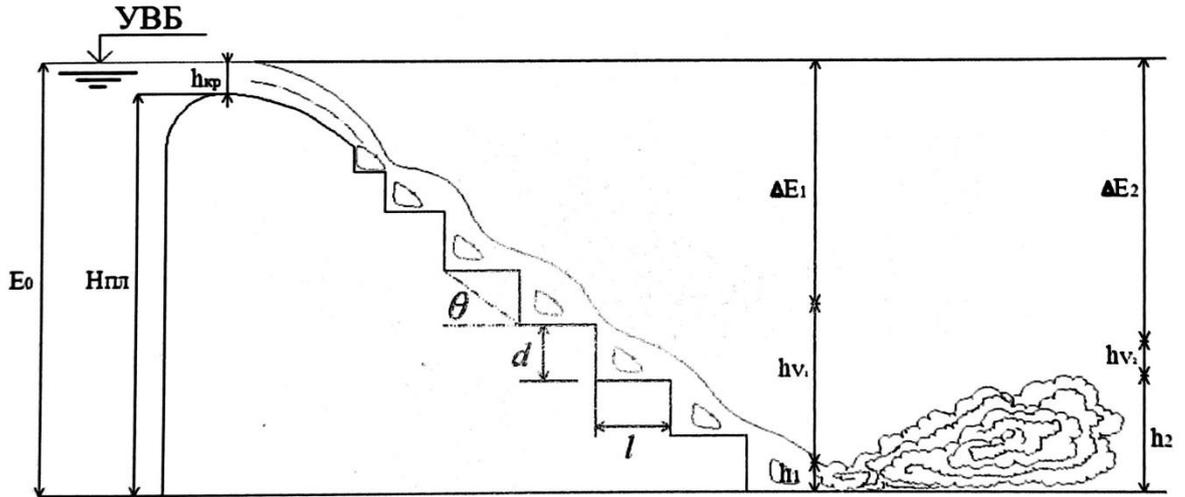


Рисунок 1.17 – Ступенчатая водосливная плотина [52]

$$E_0 = H_{\text{пл}} + 1,5h_{\text{кр}} = E_1 = (h_{v1} + h_1) + \Delta E_1 = \left( \frac{\alpha V_1^2}{2g} + h_1 \right) + \Delta E_1 \quad (1.16)$$

$$E_0 = H_{\text{пл}} + 1,5h_{\text{кр}} = E_2 = (h_{v2} + h_2) + \Delta E_2 = \left( \frac{\alpha V_2^2}{2g} + h_2 \right) + \Delta E_2 \quad (1.17)$$

В общем виде получаем:

$$E_0 = E_1 = E_2 = \dots = E_n = \left( \frac{\alpha V_n^2}{2g} + h_n \right) + \Delta E_n \quad (1.18)$$

где:  $\alpha$  – коэффициент кинетической энергии,  $\alpha = 1$ ;  $E_0$  – полный напор в верхнем бьефе относительно дна нижнего бьефа;  $H$  – напор без учета скорости подхода потока;  $H_0$  – напор с учетом скорости подхода;  $H_{\text{пл}}$  – высота водосливной плотины,  $h_{v_n}$  – скоростной напор в поперечном створе  $n$ ;  $\Delta E_n$  – потери напора в поперечном створе  $n$ .

Суммарные потери избыточной энергии при входе и по длине оголовка водослива практического профиля бетонных водосбросных плотин очень малы. Можно считать, что все потери энергии происходят по длине сливной части. Существует ряд конструктивных решений по гашению избыточной энергии потока. Для оценки эффективности той или иной конструкции необходимо определить коэффициент гашения в поперечном створе  $n$  [51, 81].

$$k_n = \frac{\Delta E_n}{E_0} = \frac{E_0 - E_n}{E_0} \quad (1.19)$$

Исследования Мирзоева М.И. доказали, что основные коэффициенты (формула 1.21), отражающие сопротивления, зависят от удельного расхода  $q$ , высоты плотины и от высоты ступеней [91]. Относительный удельный расход определился по зависимости:

$$\bar{q} = \frac{q}{P \cdot \sqrt{gd}} \quad (1.20)$$

Таким образом,

$$\kappa, \xi, \varphi = f\left(\frac{q}{g^{0.5} d^{0.5} P}\right). \quad (1.21)$$

где:  $\kappa$  - коэффициент гашения;  $\xi$  – коэффициент сопротивления;  $\varphi$  – коэффициент скорости;  $q$  – удельный расход;  $d$  – высота ступеней;  $P$  – высота водосливной плотины;  $\bar{q}$  – относительный удельный расход.

Бандунгский технологический институт (Индонезия) [90] исследовал искусственную шероховатость кубической формы на водосливной грани модели плотины. Исследования позволили доказать влияние шага расстановки между элементами сопротивления и расстояния от гребня до первого ряда сопротивлений. Изделия шероховатости изготовили из древесного материала размером 1x1x1 см (рис. 1.18). Расстояние между перегородками в продольном направлении составляло 2 см и 4 см. Расстояние между ними по ширине составляло 1 см.

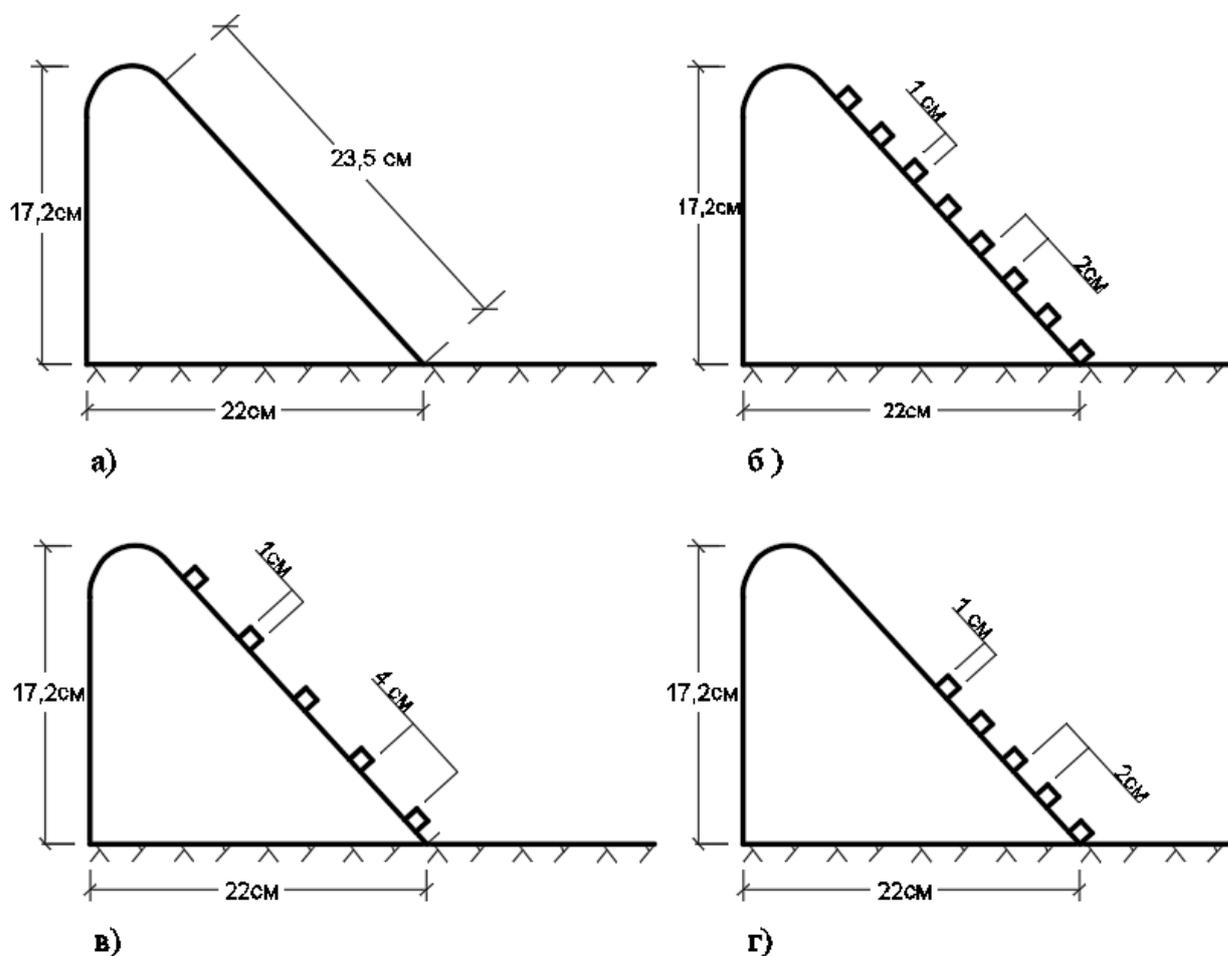


Рисунок 1.18 – Расстановка шероховатости по направлению потока при установке шашек на второй половине водоската [90]: а – гладкая водосливная грань; б – шаг 2 см ; в – шаг 4 см; г – шаг 2 см

Исследователи пришли к выводу, что при незначительных расходах расстановка по схеме г является наиболее эффективным из-за отброса струи с первого ряда шероховатости (рис. 1.19), а при больших расходах размещение шашек по схеме в приводит к наибольшей потере энергии. При увеличении расхода, поток плавно переходит к неаэрированному (рис. 1.20).

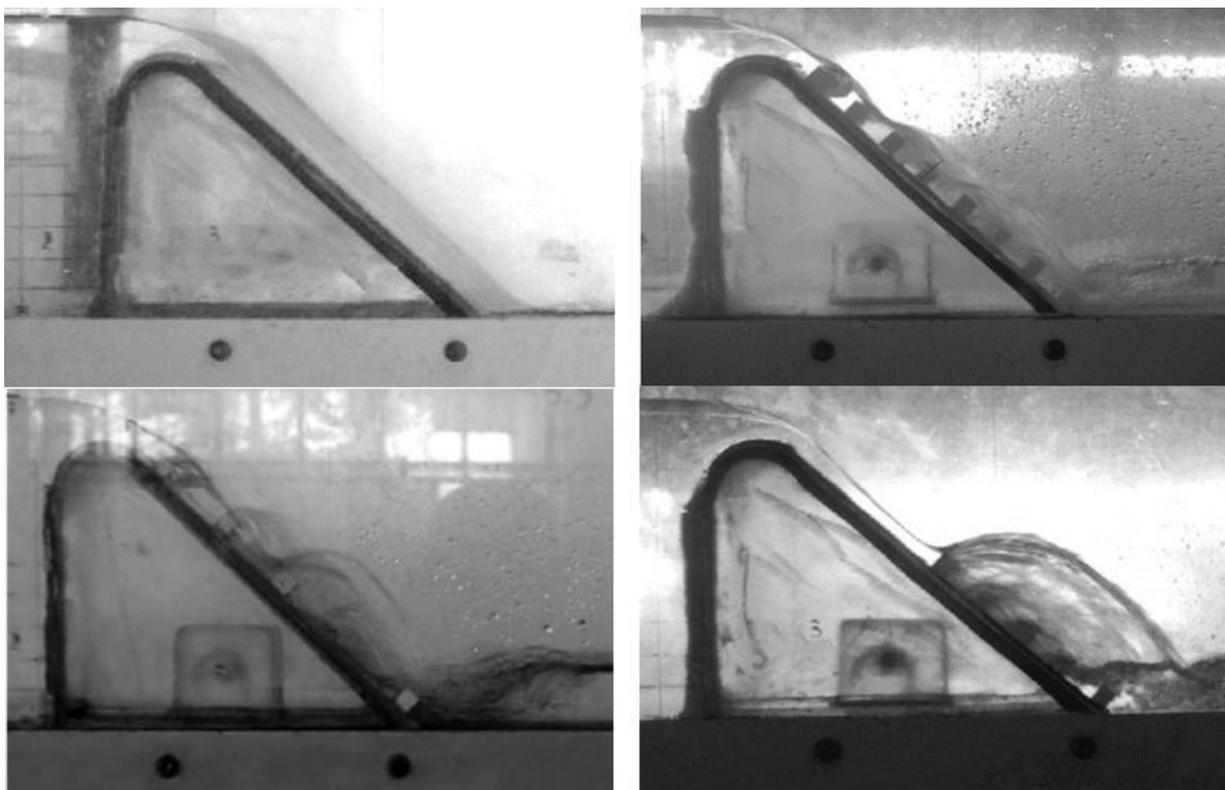


Рисунок 1.19 – Режимы работы модели плотины при  $Q = 1$  л/с [61]

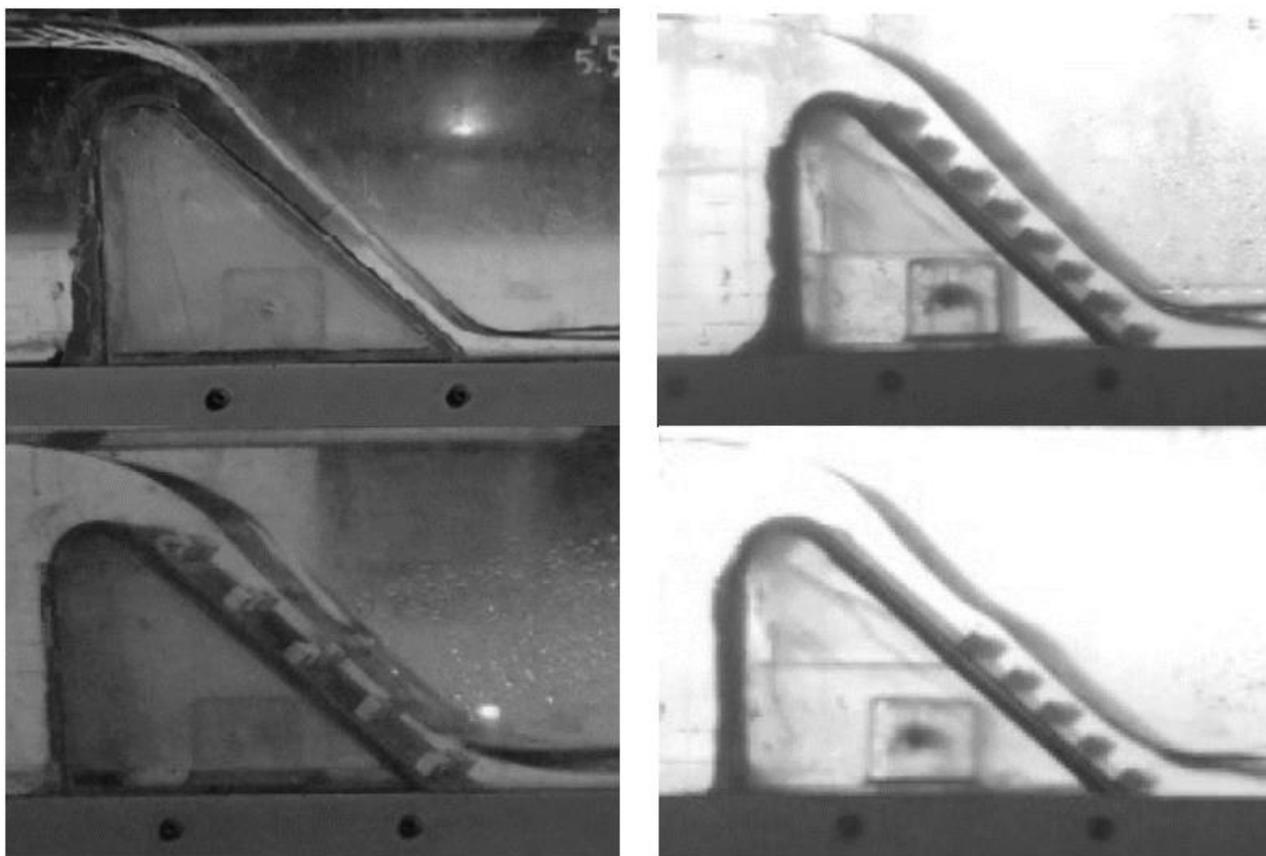


Рисунок 1.20– Гидравлика работы модели водосливной плотины при  $Q = 1,9$  л/с [82]

Хотя авторы не установили четкой закономерности определения необходимого шага размещения шашек, но из основных выводов отмечается важность правильного выбора поперечного и продольного шагов. Большие расстояния между рядами сопротивлений уменьшают эффективность гашения, так как поток набирает скорость между ними, а при малых шагах истечение происходит над сопротивлениями, что в итоге уменьшает диссипацию энергии потока.

### **1.3. Гидродинамическое воздействие на элементы транзитной части водосбросной плотины**

Таким образом, можно констатировать, что на сегодня в плотиностроении существует множество вариантов гашения избыточной энергии потока и сопряжения бьефов. Выбор того или иного варианта зависит не только от формы и размеров плотины, типа грунта основания, проектных расходов, но и условий её эксплуатации и того воздействия либо ущерба, который оказывает работающая плотина на примыкающую к водному объекту территорию.

Исправлению неблагоприятной картины гашения энергии потока может служить увеличение потерь энергии сбрасываемого потока на сливной поверхности водослива, что обеспечит уменьшение энергии сбрасываемого потока в сжатом сечении за счёт увеличения его глубины и уменьшения потребной второй сопряжённой глубины. В соответствии с [3] искусственная шероховатость в десятки раз может увеличить потери по длине по сравнению с естественной шероховатостью бетонной поверхности. Это повышение глубины в сжатом сечении потока на водоскате водосливной плотины с минимальными затратами и максимальной эффективностью можно достичь именно устройством искусственной шероховатости на водоскате.

В качестве примера рассмотрим ситуацию, сложившуюся на Жигулевском гидроузле. Строительство Жигулёвской ГЭС (ранее Волжской ГЭС имени В. И. Ленина) завершилось в 1957 г. Жигулевское море (нижняя часть

Куйбышевского водохранилища) было создано для комплексного использования водных ресурсов. Его основные задачи – питьевое и хозяйственно-бытовое водоснабжение, выработка электроэнергии, обеспечение судоходства, сельскохозяйственное и промышленное водоснабжение, рыбное хозяйство. Оно также выполняет противопаводковые и рекреационные функции и позволяет осуществлять сезонное, недельное и суточное регулирование стока.

По проекту пропуск паводковых вод предполагался сначала через совмещённые водосбросы здания ГЭС, а после исчерпания их пропускной способности должны были включаться пролёты водосбросной плотины (рис.1.21).

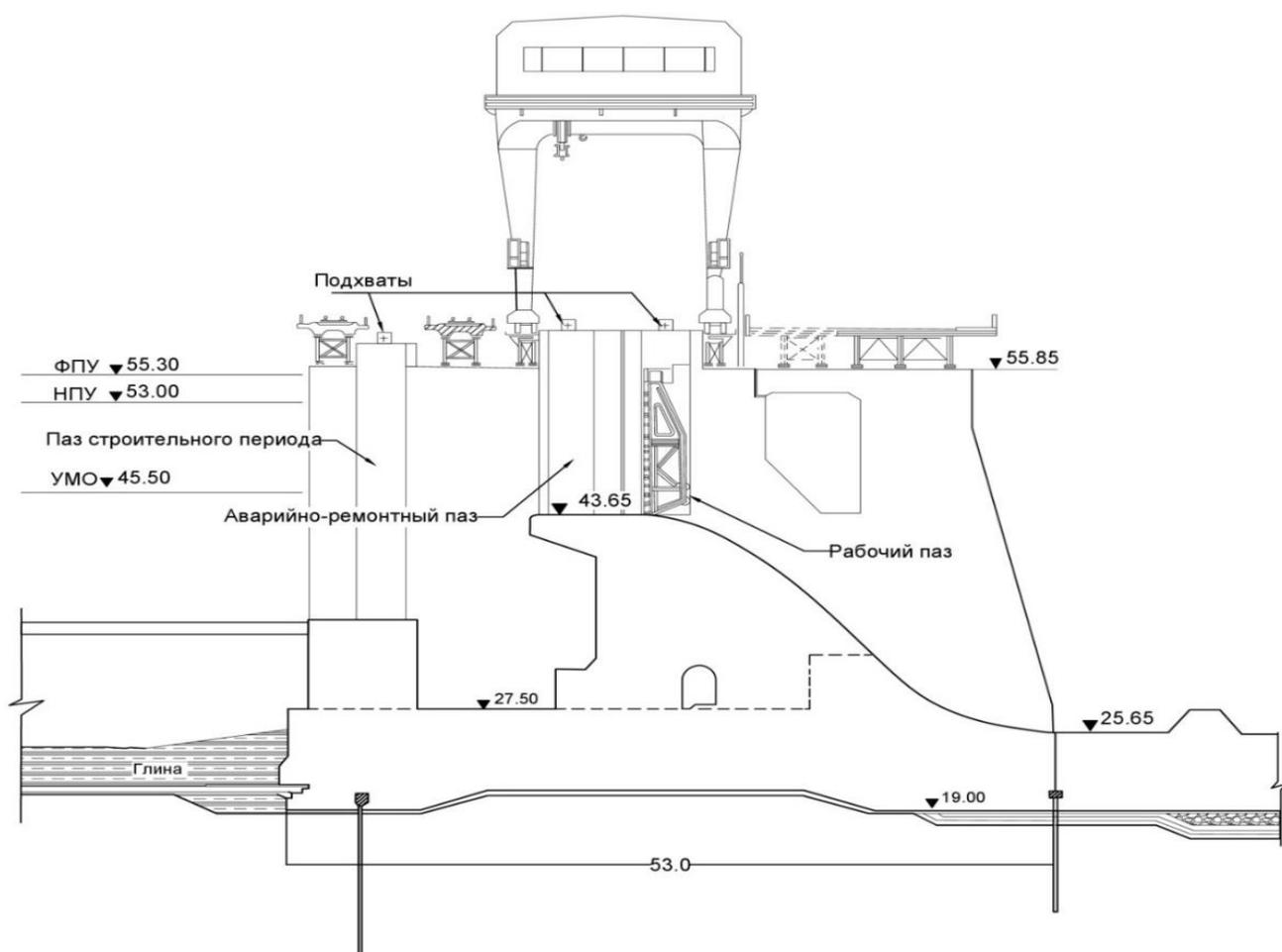


Рисунок 1.21 – Продольный разрез водосливной плотины Жигулевской ГЭС (ранее Волжского гидроузла)

Однако, в первые годы эксплуатации гидроузла был нарушен порядок маневрирования затворами водосбросных отверстий здания ГЭС, что привело к

значительным деформациям нижнего бьефа за зданием ГЭС и отказу в дальнейшем от использования его водосбросных отверстий. В результате этого пропуск излишков воды начал осуществляться через водосбросную плотину, что привело к возникновению отогнанного гидравлического прыжка на рисберме и повышенных нерасчётных вибрационных нагрузок на гасителях энергии в нижнем бьефе, вибрации водобоя и секций плотины [43].

Эти вибрации создавали на окружающую гидроузел территорию как источники локальных землетрясений, которые при высоких расходах по настоящее время создают условия, недопустимые с точки зрения безопасности сооружений гидроузла и объектов промышленно-гражданского назначения, расположенных вблизи гидроузла. Наиболее значительная вибрация наблюдалась в 1979 г., 2011 г., 2017 г. Исследования ОАО «НИИЭС» по изучению ощутимой вибрации жилых районов г. Тольятти, примыкающего к плотине Жигулёвской ГЭС, и её связи с вибрацией водосбросной плотины при различных условиях пропуска сбросных расходов [43 - 46], показали, что вибрация зданий, и появление трещин в их облицовке, тревожное и некомфортное проживание жителей прибрежной зоны водного объекта, испытывающих «сейсмические» - вибрационные воздействия связано с прохождением через гидроузел высокого паводка или залповых сбросов воды (не всегда санкционированных) службой эксплуатации гидроузла. Например, при сбросе расходов через плотину больших  $16000 \text{ м}^3/\text{с}$ , в части домов колебания превышают санитарную норму даже при оптимальном режиме маневрирования затворами, а при минимальном удельном расходе на рисберме стандарт вертикальной вибрации плотины может достигнуть 20 мкм. При синхронизированных колебаниях заметные вибрации могут наблюдаться на расстоянии до 6...7 км от плотины. Поэтому остаётся только вводить запрет на строительство высокоэтажных домов в крупном городе в радиусе от 2 до 4,6 км от створа плотины в зависимости от их этажности.

Обострилась ситуация с уровнями режимами на Куйбышевском водохранилище, и в 2023 г., в связи с потеплением климата и мировой засухой в августе 2023 г., особенно ярко проявившейся в низовьях Волги, когда уровни в

верхнем и нижнем бьефах гидроузла резко понизились, достигая критических значений (рис. 1.22). Единственным средством в таких условиях для исправления этой ситуации является затопление гидравлического прыжка на рисберме водосбросной плотины.



Рис. 1.22 – Состояние Куйбышевского водохранилища (а) и р. Казанки (б), питающей его, из-за снижения притока воды на 60% в августе-сентябре 2023 г. (фото «БИЗНЕС Online»)

Можно предположить, что в случае Жигулевского гидроузла, применение искусственной шероховатости на водосливной грани может компенсировать отклонения эксплуатации водосбросных сооружений гидроузла от проектных решений. Такой приём можно также, в общем, принять как один из вариантов повышения эффективности гашения энергии потока на ряде других средне- и низконапорных бетонных плотин при их реновации.

### **Выводы по первой главе**

Проведенный анализ работ, посвященных изучению энергогасящих конструкций в гидротехнике, позволил понять актуальность состояния вопроса гашения энергии потока в целом. Гидротехника, как и другие науки, активно развивается со временем. Проведенные исследования различными учеными позволили проектировщикам постепенно найти способы борьбы с негативными воздействиями кинетической энергии потока воды.

Искусственная шероховатость всё более широко применяется в гидротехнике в различных видах водопропускных сооружений. На сегодня имеется целый ряд изученных видов и типов элементов сопротивления, устанавливаемых на разных участках транзитного тракта водопропускных сооружений. Большинство исследований, посвященных изучению ребристых элементов сопротивления, были проведены на быстротоках или на водобоях с относительно небольшими уклонами, за исключением устройства ступеней на водоскатах водосливных плотин.

Несмотря на значительные достижения науки, технологии и усилия ученых со всего мира, вопрос гашения кинетической энергии ещё актуален для гидротехники, особенно низко- и средненапорных плотин.

На основе этого была сформулирована задача:

- экспериментально изучить влияние искусственной шероховатости водосливной грани на кинематические параметры потока;
- выяснить преимущества и недостатки применения усиленной шероховатости на водосливной грани плотин;
- экспериментально обосновать оптимальную конструкцию энергогасящего устройства водосливных плотин, обеспечивающего надежную работу и минимальные капиталовложения;
- на основе полученных результатов разработать рекомендации по проектированию средне- и низконапорных водосливных плотин с усиленной шероховатостью.

## **ГЛАВА 2. МОДЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА, ОБОРУДОВАНИЯ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Эксперименты проводились на физической модели в лаборатории водопропускных сооружений кафедры гидротехнических сооружений Российского Государственного Аграрного Университета - МСХА имени К.А Тимирязева. Исследования проводились в два основных этапа: с гладкой поверхностью и с установкой различных элементов усиленной искусственной шероховатости на низовой грани водосливных плотин или водоскатах водосбросов при грунтовых плотинах.

### **2.1 Общие принципы физического моделирования**

Существенное развитие гидротехнического строительства позволило усилить теоретические и численные методы расчетов ГТС. Несмотря на это, при проектировании крупных гидрокомплексов, многие вопросы приходится решить на основе лабораторных исследований на соответствующих физических моделях [5, 21]. Физическая экспериментальная модель обычно представляет собой уменьшенную копию реального сооружения. При физическом моделировании решаются три основных вопроса [29]:

- как построить физическую модель;
- какие величины необходимо измерять при проведении экспериментов;
- как получить достоверные результатов и перенести данные с модели на натурный объект.

На эти вопросы отвечает теория подобия, являющаяся основой физического моделирования [41, 77]. Из теории подобия следует, что модель нужно построить так, чтобы она была геометрически подобна натуре и выполнена в масштабе. Для обеспечения динамического подобия, требуется, чтобы в соответствующих точках натуре и модели силы находились в постоянном соотношении, достаточным является равенство безразмерных комплексов, составленных из величин,

определяющих характер процесса в натурном объекте и на модели, т.е. чисел Рейнольдса ( $Re$ ), Фруда ( $Fr$ ), Струхаля ( $Sh$ ), Эйлера ( $Eu$ ) и др. [5, 29, 44].

## **2.2 Описание экспериментальной установки и обоснование размеров модели**

Экспериментальные исследования модели водосливной плотины с разным оформлением низовой грани выполнялись на установке, выполненной из оргстекла (рис. 2.1).

Высота модели от уровня нижнего бьефа до гребня составляла 70 см. Модель была установлена в лотке прямоугольного сечения постоянной ширины  $b = 20,8$  см. В концевой части модели было размещено затворное устройство, а на сливной грани располагались элементы разных конструктивных схем искусственной шероховатости. Водосливная грань была выполнена с углом наклона  $49,6^\circ$  к горизонтальной плоскости.

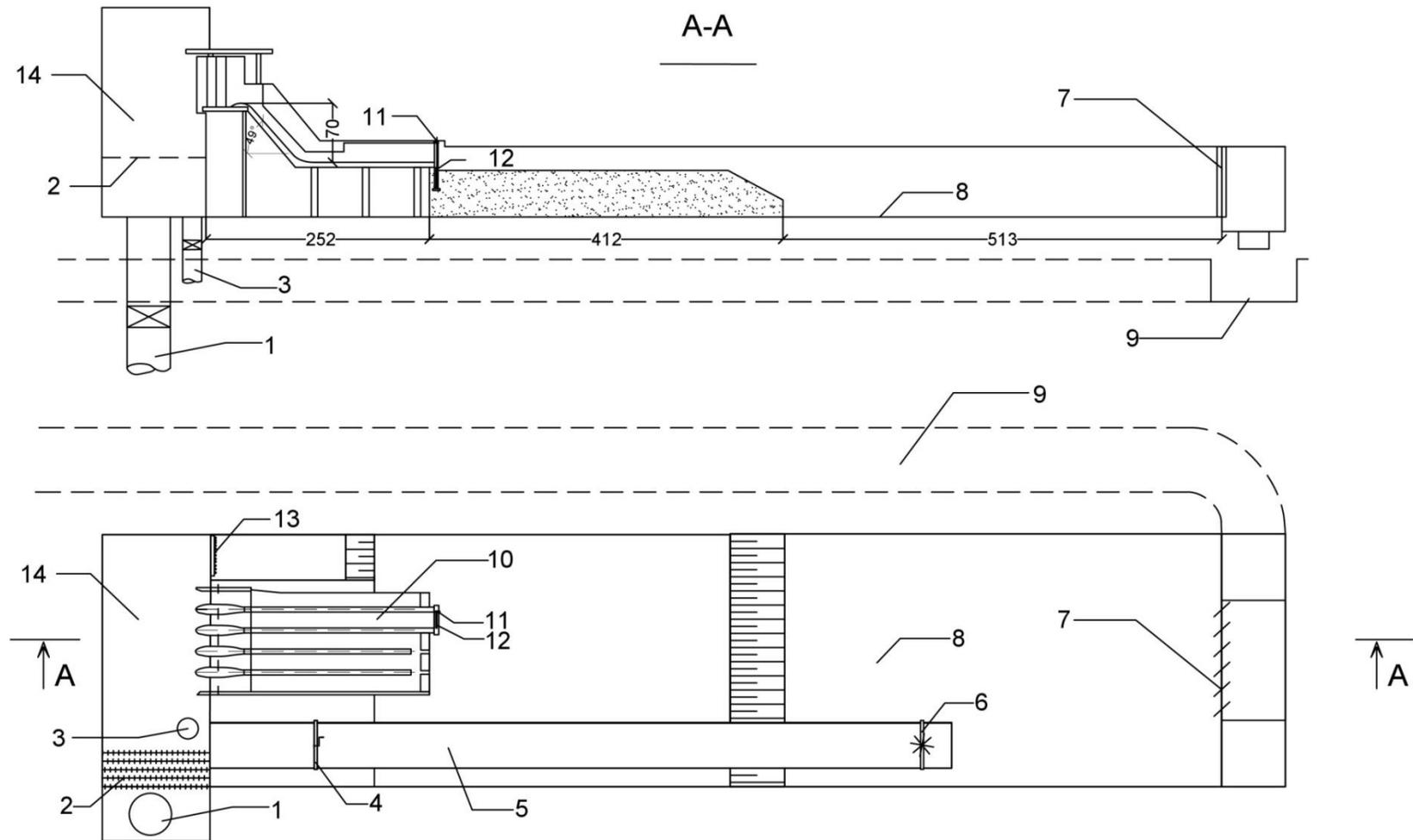


Рисунок 2.1 – Общий вид экспериментальной установки: 1 – подающая труба; 2 – решетки; 3 – сливной трубопровод; 4 – затвор; 5 – канал; 6 – подъемный механизм для регулирования уклона канала; 7 – жалюзийный затвор; 8 – пространственный лоток; 9 – отводящий лоток; 10 – используемый пролет в опытах; 11 – подъемный механизм; 12 – затворное устройство; 13 – пьезометрический щит; 14 – приемный бак

Вода поступает в приемный бак модели из централизованного резервуара, куда насосы качают воду с подземного резервуара (рис. 2.1). Поддержание нужного напора на модели обеспечивается путем регулирования затвора для слива избытка воды через канал. Все модели в данной лаборатории водопропускных сооружений построены таким образом, чтобы используемая вода возвращалась самотеком в подземный резервуар.

Для оценки характеристик потока после обтекания гасящих устройств участок нижнего бьефа за водосливной плотиной был разбит на четыре поперечных измерительных створа (А, В, С, D), расположенных соответственно на расстоянии 10 см, 50 см, 90 см и 140 см от места сопряжения наклонной и горизонтальной частей модели ГТС (рисунок 2.2). Продольные створы располагались неравномерно с учётом влияния боковых стенок на параметры потока: а и б –соответственно на расстоянии 12 мм и 40 мм от левой по течению боковой стенки лотка; с – 104 мм от боковых стенок (в центре лотка); d и e – 40 мм и 12 мм от правой боковой стенки лотка.

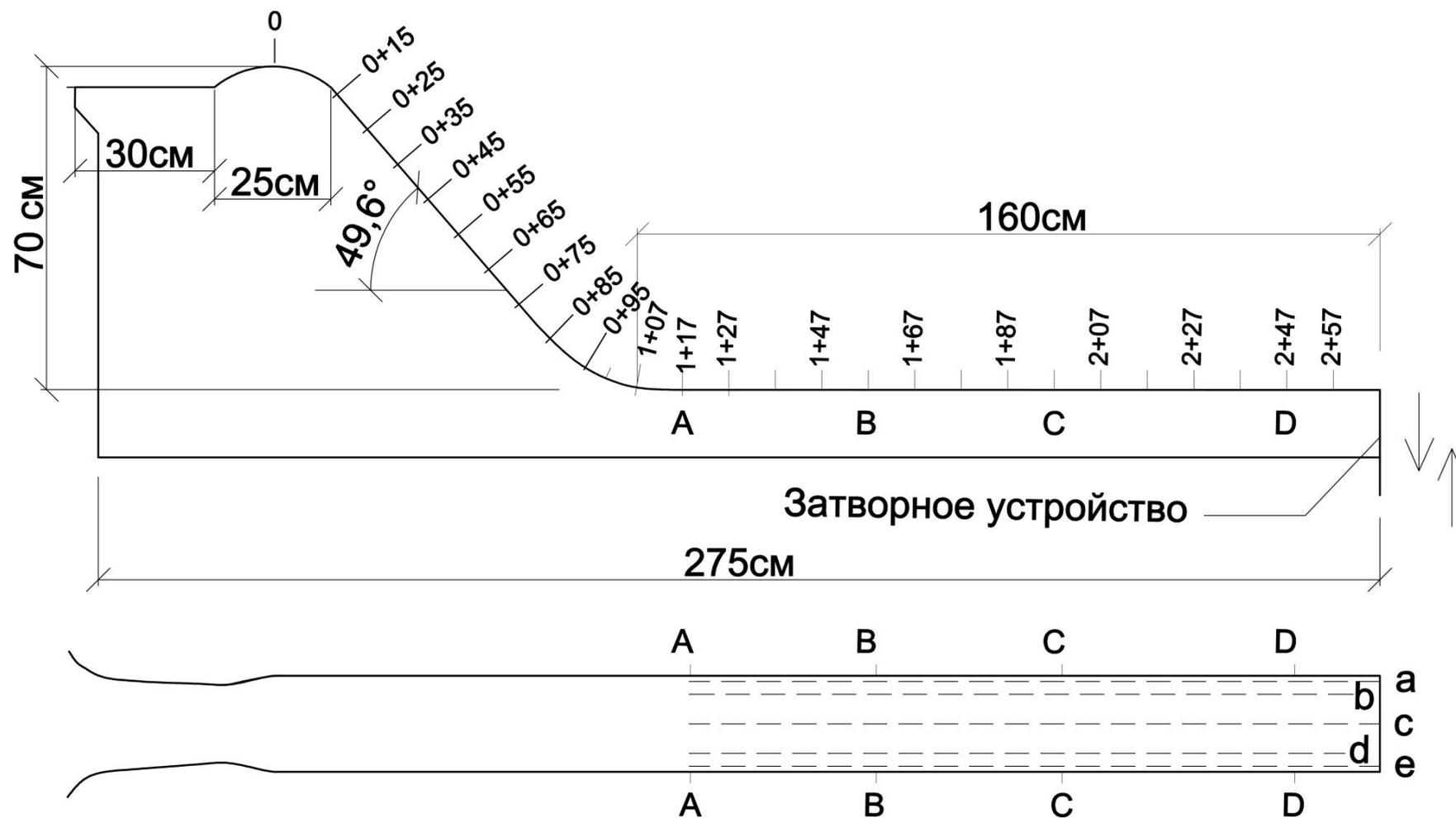


Рисунок 2.2. – Размеры основной часть модельной установки

Исследование работы модели при гладкой поверхности предшествовало изучению влияния шероховатости. Первые эксперименты были проведены для определения коэффициента расхода модельной установки, а затем, для изучения гидродинамических характеристик потока на гладкой низовой поверхности.

После проведения испытаний при гладкой поверхности, на сливной грани были установлены разные виды ребристой шероховатости (рис. 2.4), изготовленные из оргстекла. Шаг 8 см был принят для всех исследуемых ребер сопротивления с учетом уже установленных рекомендаций по проектированию быстротоков с ребристыми шероховатостями [3, 11, 54]. Ребра шероховатости были установлены только на водосливной грани.

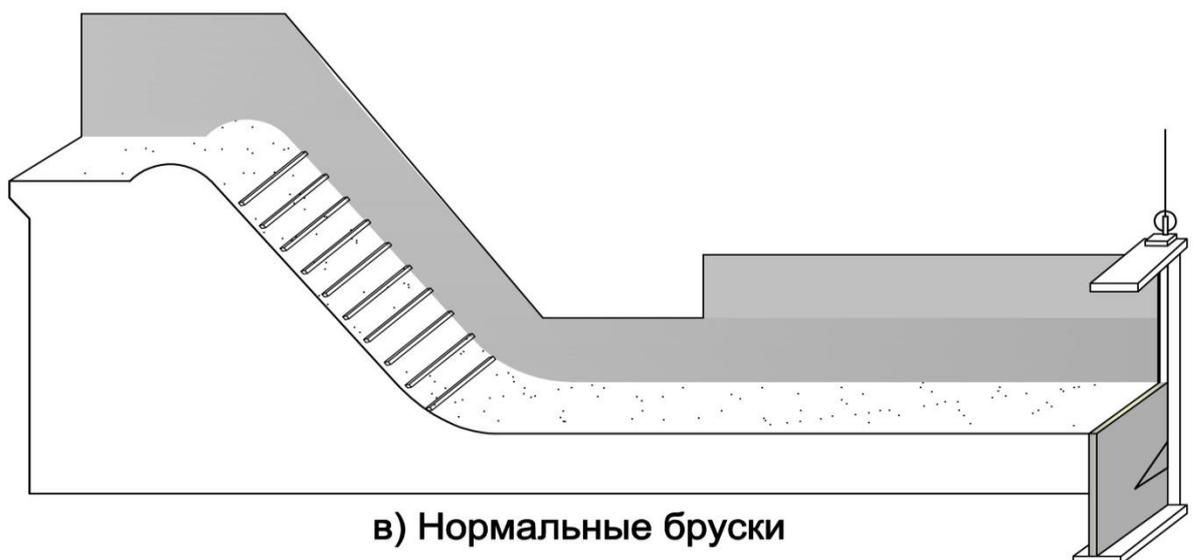
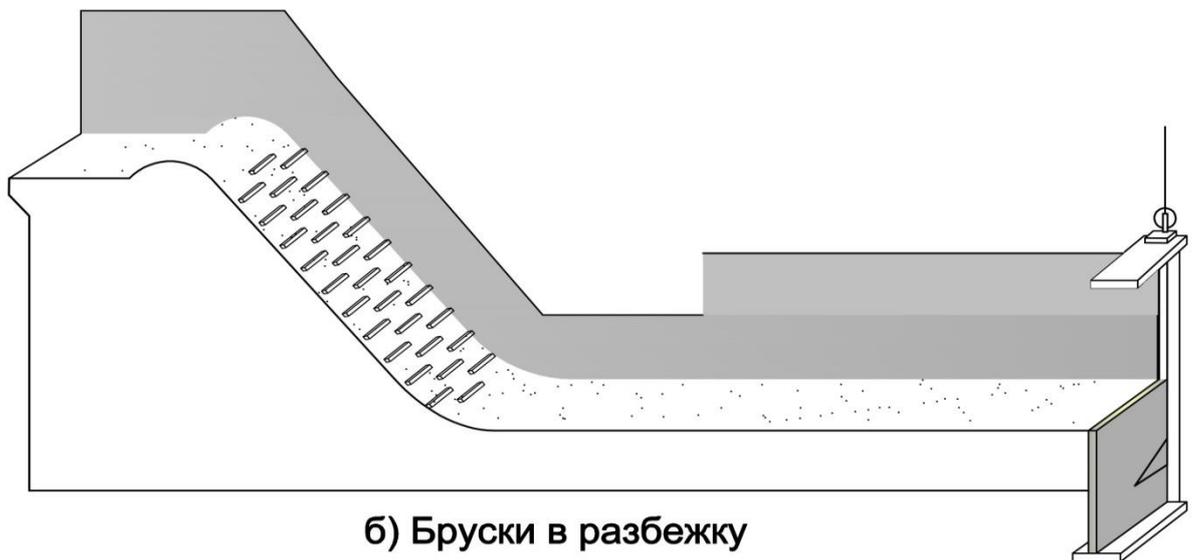
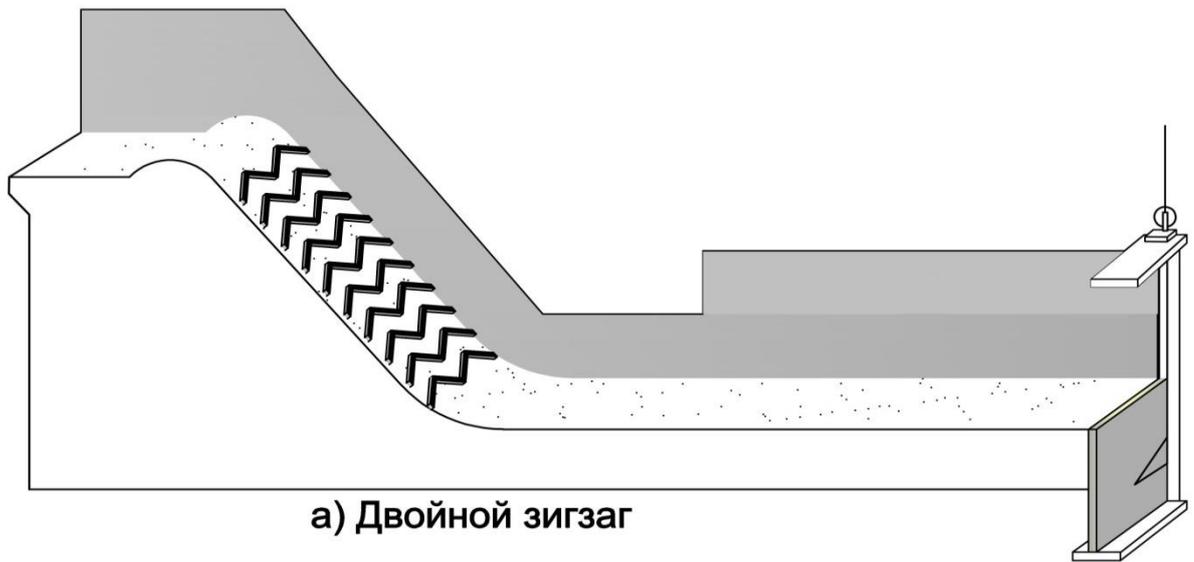


Рисунок 2.3 – Исследованные виды ребристой шероховатости

### 2.3. Методика лабораторных исследований гидравлических процессов

Модельные исследования гидротехнических сооружений (ГТС) в лабораторных условиях, как и другие инженерные модельные исследования, дают возможность определять поведение будущего ГТС в натуре, что позволяет заранее принимать соответствующие конструктивные решения при их проектировании.

Пересчет полученных результатов опытов с модели на натуру представляется возможным при выполнении ряда законов подобия.

Истечение воды через водослив или в водотоке с гладкой поверхностью происходит под действием сил тяжести, которые не зависят от формы сооружения или её отдельных составных элементов и конструкций. Таким образом, исследования гидродинамических процессов требуют максимально возможное соблюдение подобия кинематических и гидродинамических характеристик сооружения и его модели.

Подобие модели и природы требует, чтобы было равенство в них отношений всех сил, под действием которых протекает исследуемое явление. Модель также должна быть построена с соблюдением основных геометрических характеристик исследуемого объекта, которые имеют влияние к исследуемому процессу.

Истечение жидкости в натуре протекает под действием сочетаний различных сил (тяжесть, трение, упругость, давление и сила поверхностного натяжения). Влияние вышперечисленных сил не имеют одинаковой степени влияния в зависимости от характера рассмотренного процесса.

Физические особенности действующих сил практически не позволяют одновременно выполнять равенства отношения всех сил на модели и в натуре [18, 59, 64, 69].

Сброс потока воды через водослив осуществляется преимущественно под действием силы тяжести. Наиболее подходящим критерием подобия сил тяжести является число (критерий) Фруда. Оно представляет собой отношение

кинетической энергии потока в рассмотренном сечении к половине потенциальной энергии массы жидкости. При этом, масштаб сил определяется выражением:

$$m_F = \frac{F_H}{F_M} = \frac{m_H a_H}{m_M a_M} = \frac{\rho_H W_H L_H T_H^2}{\rho_M W_M L_M T_M^2} = \frac{\rho_H L_H^2 V_H^2}{\rho_M L_M^2 V_M^2}, \quad (2.1)$$

где:  $F$  – сила;  $m$  – масса;  $a$  – ускорение;  $\rho$  – плотность жидкости;  $L$  – длина;  $W$  – объём жидкости;  $T$  – время;  $V$  – средняя скорость потока; индексы «М» и «Н» означают «модель» и «натура» соответственно.

Так как в качестве модельной жидкости была использована вода,  $\rho_M = \rho_H$ .

Критерий Фруда для свободных потоков чаще всего выражают через среднюю скорость жидкости:

$$\frac{V_H^2}{gH_H} = \frac{V_M^2}{gH_M} = Fr = idem, \quad (2.2)$$

где:  $H$  – характерная глубина потока.  $g$  – ускорение свободного падения.

Исследование гидравлических явлений на физической модели возможно при выполнении гидродинамического подобия, которое заключается в соблюдении следующих условий [15, 16, 17, 58, 67, 98]:

– **геометрическое подобие.** Оно заключается в соблюдении соотношений линейных размеров, в том числе площадей и объемов на модели и в натуре. Оно описывается следующим образом:

$$\frac{L_H}{L_M} = a_l = const; \quad \frac{\omega_H}{\omega_M} = a_l^2 = const; \quad \frac{W_H}{W_M} = a_l^3 = const \quad (2.3)$$

где:  $a_l$  – линейный масштаб;  $L$  – длина;  $\omega$  – площади элемента;  $W$  – объемы элементов,

– **кинематическое подобие.** Под кинематическим подобием подразумевается наличие подобия полей скоростей и ускорения потока на модели и в натуре.

$$\frac{V_H}{V_M} = a_v = const; \quad \frac{V_{cp.H}}{V_{cp.M}} = a_{v,cp} = const; \quad \frac{g_H}{g_M} = a_g = const; \quad \frac{q_H}{q_M} = a_q = const \quad (2.4)$$

где:  $a_v$  – масштаб скорости;  $a_{v.cp}$  – масштаб средних скоростей;  $a_g$  – масштаб ускорения;  $a_q$  – масштаб удельного расхода,

– **динамическое подобие** представляется возможным при одновременном выполнении геометрического и кинематического подобия [42, 58, 85]. Оно характерно постоянным соотношениям между соответствующими силами:

$$\frac{F_H}{F_M} = a_f = const \quad (2.5)$$

где:  $a_f$  – масштаб силы.

Чтобы получить натурные значения расхода, скорости, ускорения и времени существуют масштабные коэффициенты [31, 48]:

– для пересчёта скоростей:

$$a_v = \sqrt{a_l} \quad (2.6)$$

– для пересчёта расхода:

$$a_Q = a_l^{5/2} \quad (2.7)$$

– для пересчёта удельного расхода:

$$a_q = a_l^{3/2} \quad (2.8)$$

– для пересчёта давления, выраженного в метрах водяного столба:

$$a_p = a_l \quad (2.9)$$

– для пересчёта ускорения:

$$a_g = 1 \quad (2.10)$$

– для пересчёта времени:

$$a_t = \sqrt{a_l} \quad (2.11)$$

Истечение воды через водосливные плотины происходит с большой турбулентностью в квадратичной области сопротивления. При наличии значительного местного сопротивления автомодельность проявляется при  $Re \geq 10^3 \dots 10^4$  [48, 63].

Истечение через водослив, в общем, протекает преимущественно под действием силы тяжести, и при значительной турбулентности, поэтому

моделирование проводилось по гравитационному подобию ( $Fr = idem$ ) при автомодельности по числу Рейнольдса ( $Re > Re_{гр}$ ).

Условие  $\lambda = idem$ , когда коэффициент гидравлического сопротивления  $\lambda$  перестает зависеть от числа Рейнольдса, должно выполняться для обеспечения подобия в автомодельной области. Минимальная граница автомодельности для открытого русла определяется по зависимости:

$$Re_{гр} = \frac{14 \cdot R_M}{K \cdot \sqrt{\lambda}} \quad (2.12)$$

Где  $K$  - абсолютная шероховатость. Для оргстекла  $K = 0,012$  мм;  $R_M$  - гидравлический радиус модели;  $\lambda$  - коэффициент гидравлического сопротивления.

Коэффициент  $\lambda$  определялся по формуле А.Д. Альтшуля [9, 55, 57, 70]:

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{\Delta\Xi}{4R} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25} \quad (2.13)$$

где:  $\Delta\Xi = 0,01$  мм – эквивалентная абсолютная шероховатость.

Минимальное значение числа Рейнольдса на модели находилось по уравнению:

$$Re_{min \cdot M} = \frac{V_M \cdot R_M}{\nu} \quad (2.14)$$

где:  $\nu$  – кинетическая вязкость воды,  $m^2/c$ , принимается равной  $\nu = 0,0132 \cdot 10^{-4} m^2/c$  при температуре от  $9^\circ C$  до  $10^\circ C$ ;  $V_M$  – скорость потока на модели в сжатом сечении;  $R_M$  – гидравлический радиус.

$$R_M = \frac{b \cdot h}{b + 2h} \quad (2.15)$$

где:  $b$  – ширина лотки модели, см;  $h$  – глубина потока на модели, см.

При истечении на гладкой поверхности водослива и при диапазоне напора от 7,5 см до 25 см, средняя скорость потока находилась в диапазоне от 332,3 см/с до 406,47 см/с.

$$Re_{min \cdot M} = 3,021 \cdot 10^4 \quad , \quad a \quad Re_{max \cdot M} = 11,07 \cdot 10^4.$$

Значение коэффициента гидравлического трения составило  $\lambda = 0,0245$ , граничное значение числа Рейнольдса  $Re_{гр} = 8,9 \cdot 10^4$ . На модели условие, из которого устанавливается минимальный геометрический масштаб, соблюдается, так как  $Re > Re_{гр}$ .

#### 2.4. Оценка погрешности измерительной аппаратуры и ошибок полученных результатов

При измерении расхода, подаваемого на модель, с целью определения коэффициента расхода применялся стационарный ультразвуковой расходомер Днепр-7 (рис. 2.6), датчики которого установлены на подающую трубу.



Рисунок 2.4 – Стационарный ультразвуковой расходомер Днепр-7

На отводящем канале модели была установлена трубка Пито и шпитценмасштаб таким образом, чтобы они смогли перемещаться вдоль течения

и по ширине лотка при измерении местных скоростей и глубин потока в определённых сечениях.

К основным измеренным параметрам в ходе исследования относятся расход, уровни, глубины и скорость потока. При проведении модельных лабораторных исследований, местная скорость потока по выбранным сечениям была измерена с помощью трубки Пито, прикреплённой к шпитценмасштабу, что позволило сравнить эпюры скоростей в нижнем бьефе при гладкой и шероховатой водосливной грани. Отметка свободной поверхности потока определилась отдельным шпитценмасштабом с точностью измерения до 0,1...0,3 мм в зависимости от силы колебания свободной поверхности на участке измерения. В соответствии с техническими характеристиками расходомера Днепр-7, пределы приведенной погрешности при преобразовании объемного расхода жидкости в выходной токовый сигнал составляли  $\pm 1,5$  %. Уровень воды в верхнем бьефе определялся по пьезометру с точностью 0,5 мм. Привязка отметки порога к шкале пьезометра производилась нивелиром с точностью 0,1 мм, что приводит точность определения уровня верхнего бьефа на модели к 0,6 мм.

Поскольку при проведении экспериментальных исследований возможны грубые и систематические ошибки [23, 72, 74, 78], то для исключения грубых ошибок, регистрация уровней свободной поверхности потока или показаний пьезометров выполнялись многократно (до 7...10 раз) и в журнал измерений заносились средние значения. Глубина потока находилась как разница отчётов по шпитценмасштабу, снятых у свободной поверхности потока и у дна [98]. Точность отсчёта по шпитценмасштабу, с учётом волнующейся свободной поверхности потока на участке сопряжения, составляла 0,2...0,3 мм. «Место нуля» шкалы шпитценмасштаба определялось нивелиром с точностью отсчёта 0,1 мм. Суммарная точность измерения глубины потока в нижнем бьефе составляет 0,3...0,4 мм. Конечно, при больших расходах возрастали и колебания уровней воды, а поэтому возрастала и абсолютная ошибка. Но измеряемые глубины тоже увеличивались, а учитывая, что одинаковые отметки измерялись многократно и

принималось среднее значение, то, в общем, относительная ошибка не увеличивалась по сравнению с ошибкой, подсчитанной для малых расходов и глубин. Минимальная глубина, измеренная шпитценмасштабом, в экспериментах равнялась 16 мм. Минимальная относительная ошибка при этом составляла  $\frac{0,1}{16} \cdot 100 = 0,63\%$ , а максимальная – 1,88%. Скорости течения измерялись трубкой Пито с точностью до 2...3%.

## 2.5. Краткое описание порядка проведения опытов

Основная задача проведенных экспериментов состоит в оценке эффективности искусственного усиления шероховатости. Для этого были проведены анализ параметров потока на гладкой водосливной грани, а затем те же параметры были проанализированы с тремя видами ребристых элементов сопротивления: двойные зигзаги против течения, бруски в разбежку и нормальные бруски.

Для создания подпора со стороны нижнего бьефа, необходимого для образования гидравлического прыжка в предельном положении использовалась регулируемая подпорная стена, установленная в концевой части отводящего канала.

Было принято решение использовать ребристые детали квадратного сечения высотой и шириной 1 см для всех исследуемых шероховатостей за исключением двух первых рядов, на которые был принят высота шероховатость 5 мм и 8 мм для обеспечения плавного начала обтекание над ребрами сопротивления.

Значения напора на модели и расхода, полученного по расходомеру, позволили определить коэффициент расхода экспериментальной модели. При обработке данных было допущено, что  $H_0 = H$ , а коэффициент расхода был определен исходя из формулы расхода водослива:

$$Q = \sigma_{\Pi} \cdot \varepsilon \cdot m \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot H_0^{3/2} \quad (2.16)$$

Отсюда получаем:

$$m = \frac{Q}{\sigma_{\Pi} \cdot \varepsilon \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot H_0^{3/2}} = \frac{q}{\sigma_{\Pi} \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{2g} \cdot H_0^{3/2}} \quad (2.17)$$

где:  $m$  – коэффициент расхода;  $q$  – удельный расход;  $\sigma_{\Pi}$  – коэффициент подтопления, равен 1, так как водослив не подтоплен;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\varepsilon$  – коэффициент бокового сжатия, определяемый по формуле Е.А.

Замарина

$$\varepsilon = 1 - a \cdot \frac{H_0}{H_0 + b} \quad (2.18)$$

Где:  $a$  – коэффициент, учитывающий формы быков и устоев.

Начальные части разделительных быков имеют эллиптическое очертание. Для данной формы принимаем  $a = 0,06$ ;  $b$  – ширина пролета, равная 20,8 см.

$H_0 = H + \alpha V^2 / 2g$ . В расчетах принимаем  $H_0 = H$  так как скорость воды у входа ближе к нулю.

Кроме того, местная скорость потока по выбранным сечениям была измерена трубкой Пито, прикрепленной к шпитценмасштабу, что позволило сравнить эпюры скоростей в нижнем бьефе при гладкой и шероховатой водосливной грани. Отметка свободной поверхности потока определилась отдельным шпитценмасштабом.

### Выводы по второй главе

Во второй главе проведен обобщенный анализ методов и методологии исследования гидравлических процессов на экспериментальной установке. Здесь же были обоснованы принятые размеры модели и ее составных частей. Были определены основные переводные коэффициенты, которые в дальнейшем помогут перевести модельные результаты в натуру. Полученные величины погрешности обеспечивают достоверность результатов исследований. Также были описаны

масштабные коэффициенты, необходимые для переноса модельных результатов на натуру.

## ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА РЕЖИМОВ ПОТОКА ПРИ ГЛАДКОЙ И ШЕРОХОВАТОЙ ГРАНИ ВОДОСЛИВНЫХ ПЛОТИН

### 3.1 Исследование работы водосброса при гладкой низовой водосливной грани

#### 3.1.1 Исследование режима работы низовой водосливной грани при гладкой поверхности и отсутствии подпора

До начала проведения экспериментов было принято решение провести теоретический анализ работы модели без установки элементов сопротивления (рис. 3.1). Как известно, расход воды, протекающей через водослив, можно также определить выражением (2.16)

Удельный расход  $q = \frac{Q}{b}$  в начале водобойного участка можно определить по известной формуле [18]

$$q = h_c \cdot \varphi \cdot \sqrt{2g(E_0 - h_c)} \quad (3.1)$$

где:  $\varphi$  – Коэффициент скорости;  $h_c$  – глубина потока в сжатом сечении;  $E_0$  – полная удельная энергия сечения;  $P$  – высота водосливной плотины.

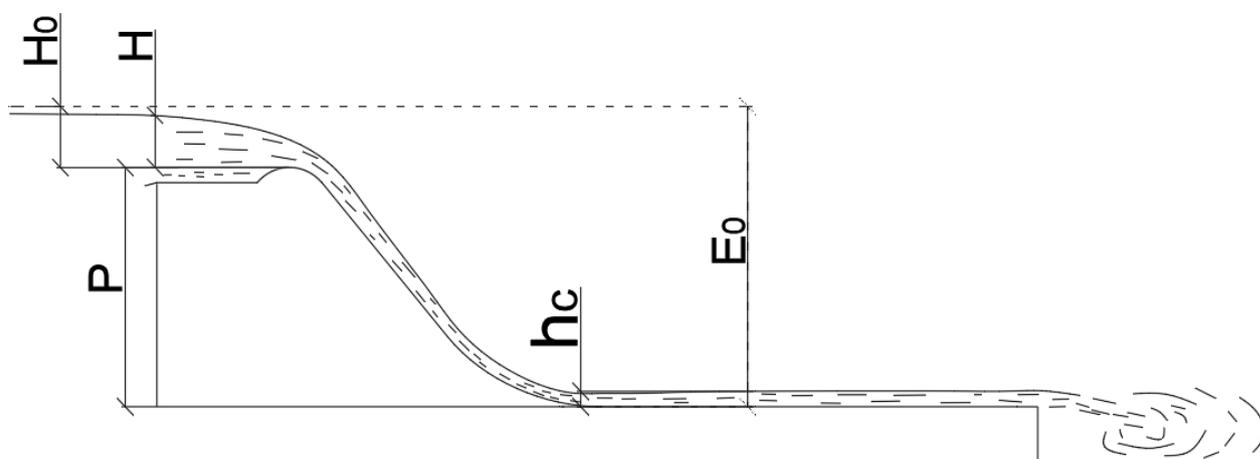


Рисунок 3.1 – Расчетная схема к определению удельного расхода

Коэффициент расхода, входящий в формулу (2.16), был определен экспериментально. Модельная установка была оборудована ультразвуковым расходомером, который дал возможность определить расход воды, подаваемый на модели. По полученным результатам замера расхода водослива ультразвуковым методом, был построен график зависимости расхода от напора (рис. 3.2).

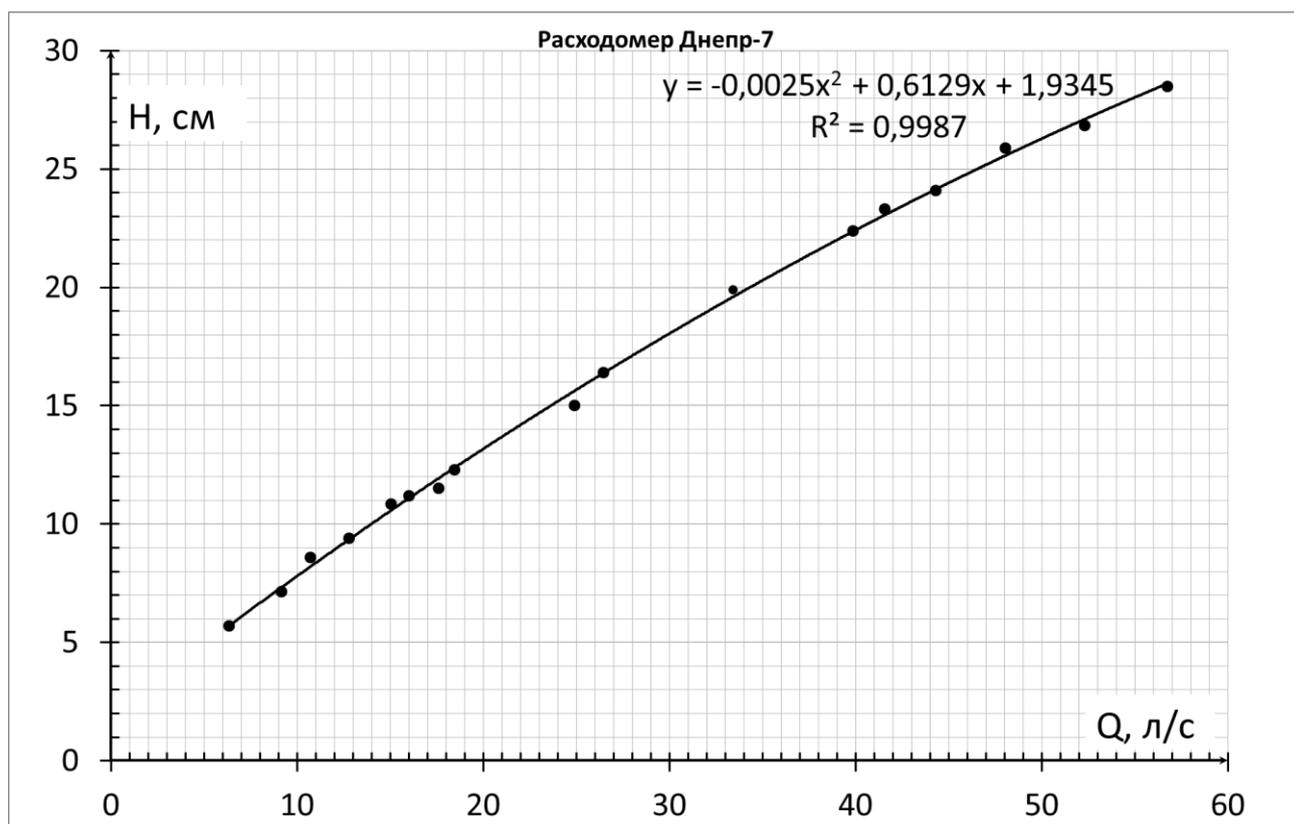


Рисунок 3.2 – Зависимость расхода водослива от напора

Следует отметить, что дальнейшее прикрепление искусственной шероховатости на водосливной грани не влияет на результаты, представленные на рисунке 3.2, так как ребра сопротивления были установлены так, чтобы не создавали подпор в верхнем бьефе и, следовательно, не влияют на пропускной способности входного оголовка. Основные опыты были проведены при напоре 7,5; 10; 15; 20 и 25 см. Соответствующие удельные расходы приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Определение относительного удельного расхода

Напор Н, см	Q, л/с	Ширина пролета b, см	Удельный расход q, см <sup>2</sup> /с
7,5	9,40	20,8	452
10	13,95	20,8	671
15	23,60	20,8	1135
20	34,33	20,8	1650
25	46,50	20,8	2236

При проведении экспериментов на гладкой поверхности происходил плавный переход потока из бурного течения в спокойное лишь при очень низком напоре до 2,5 см. При увеличении напора выше 3 см, наблюдалось бурное течение по всей длине лотка модели без существенного увеличения глубины воды по длине лотка. Такой режим сохранялся при постепенном увеличении напора. Это приводит к выводу о необходимости устройства гашения энергии на водобойной части.

Местные скорости потока были измерены трубкой Пито в поперечных створах А, В, С и D. Горизонтальные линии на эпюрах, за исключением свободной поверхности, проведены на глубинах, на которых проводились замеры скоростей.

Для экстраполяции эпюр к твёрдым боковым стенкам и на дне лотка применялся метод Н.М. Щапова [78]: на эпюре криволинейная площадь заменялась равновеликой трапецией с основанием  $u_1$  и неравными сторонами  $v_1$  и  $v_0$ , где  $v_0$  есть фиктивная скорость у самой стенки, определяемая как:

$$v_0 = \frac{n-1}{n+1} v_1. \quad (3.2)$$

При этом предполагается знание показателя  $n$ , который можно определить из опытных результатов скоростей в двух ближайших к стенке точках  $v_1$  и  $v_2$  на расстояниях  $y_1$  и  $y_2$  от стенки:

$$n = \lg \frac{y_1}{y_2} : \lg \frac{v_1}{v_2}. \quad (3.3)$$

Пояснительная схема представлена на рисунке 3.3

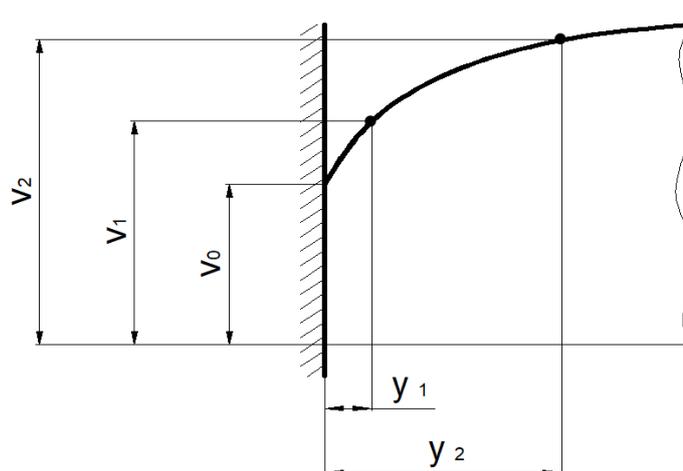


Рисунок 3.3 – Схема экстраполяции эпюр скоростей к твёрдым стенкам лотка

Местная скорость потока в нижнем бьефе измерялась при напоре 10 см, 15 см, 20 см и 25 см. Полученные результаты представлены в виде эпюр скоростей на рисунке 3.4 ниже.

Максимальная местная скорость наблюдается в первом поперечном створе А (4,11м/с).

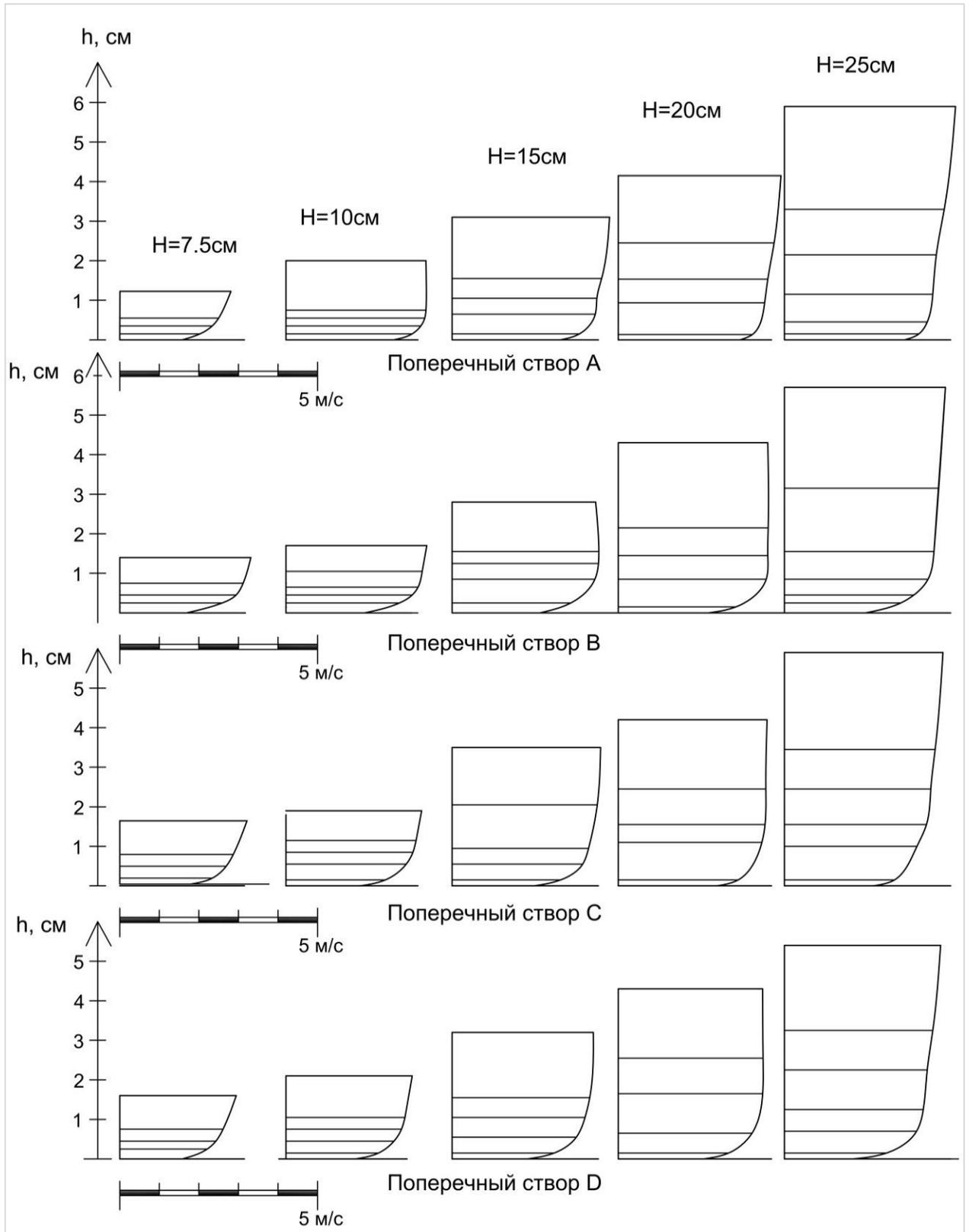


Рисунок 3.4 – Эпюры скорости в центральном продольном створе «с» в поперечных створах А, В, С и D при разных напорах на гребне водослива

### 3.1.2 Определение второй сопряженной глубины

Для создания подпора в лабораторных условиях, концевая часть лотка физической модели была оборудована затворным механизмом (рис. 3.5), состоящим из щита, прикреплённого к шпитценмасшабу для регулировки высоты по вертикали, до достижения нужной бытовой глубины.

Для каждого напора (от 5 до 22,5 см с шагом 2,5 см), опытным путем была определена глубина воды в отводящем канале, необходимая для приведения начала гидравлического прыжка в предельном положении.

Для облегчения процесса записи показателей, снятых на модели, была проведена продольная градуировка водосливной грани от гребня до конца отводящего канала. За предельное положение было принято сечение 1+07.

При гладкой поверхности водослива высота боковых стенок построенной модели позволяла довести начало прыжка до предельного положения (створ 1+07) и измерить соответствующую бытовую глубину при напоре до  $H = 22,5$  см.

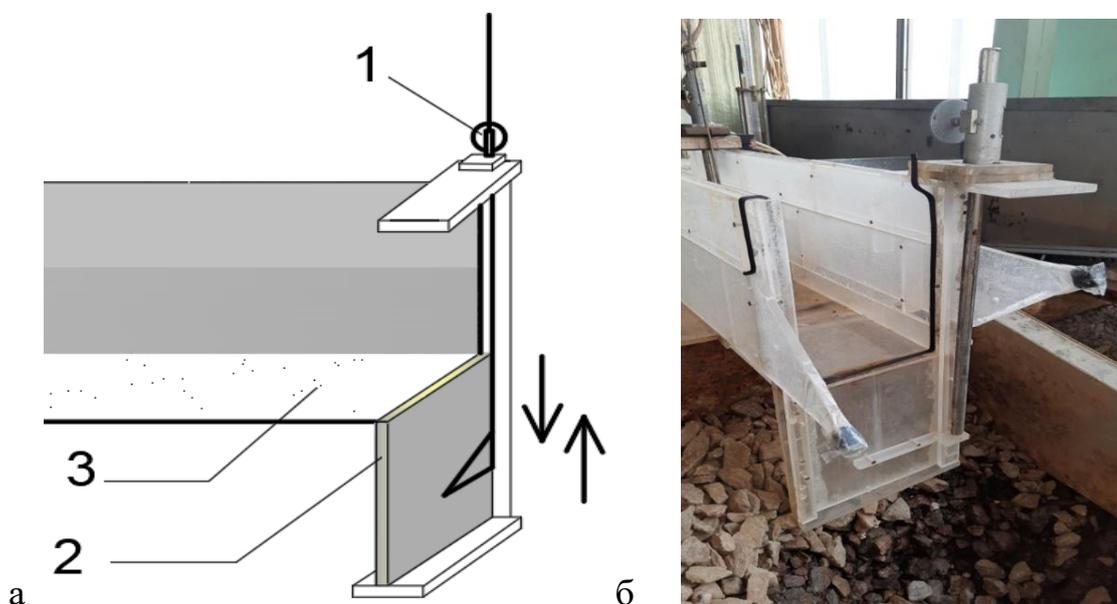


Рисунок 3.5 – Схема (а) и общий вид (б) затворного устройства: 1 – подъемный шпитценмасштаб; 2 – щитовой затвор; 3 – отводящий канал

В качестве подпорного устройства был предусмотрен в концевой части отводящего канала щитовой затвор из оргстекла, регулируемый по высоте с помощью подъемного механизма 1. Манипулирование им позволяло регулировать уровень воды в канале, создавать необходимую бытовую глубину и надвигать гидравлический прыжок. На рисунке 3.6 представлена зависимость между напором и бытовой глубиной, необходимой для гашения избыточной энергии потока.

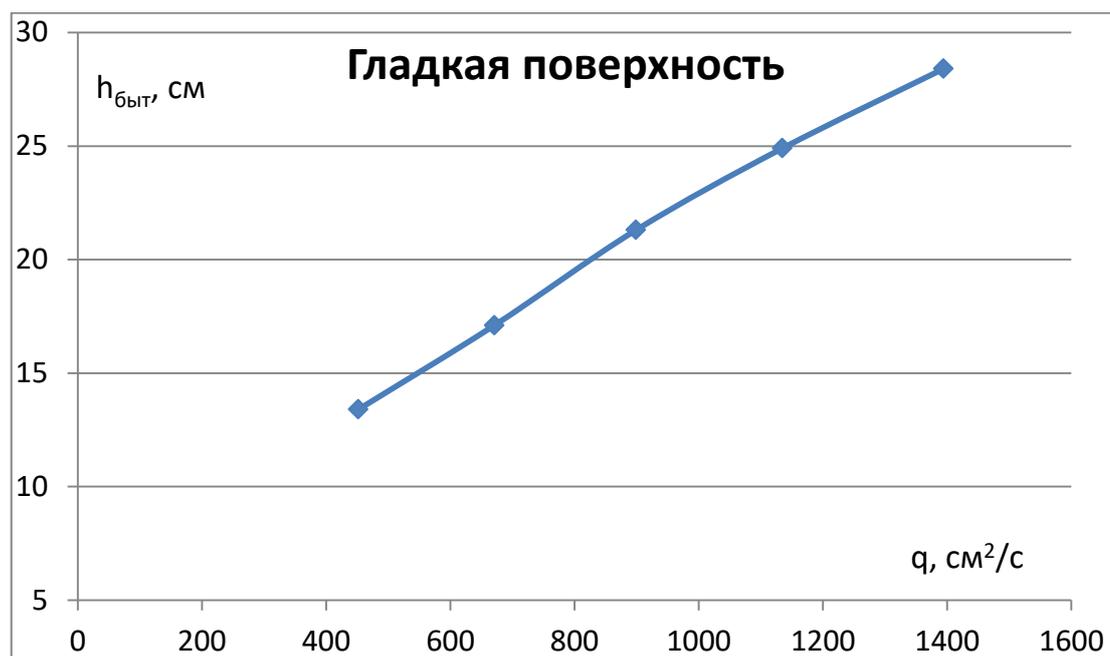


Рисунок 3.6 – Связь между удельным расходом  $q$  и бытовой глубиной  $h_{\text{быт}}$

На рисунке 3.7 приведены формы сопряжения бьефов в зависимости от высоты открытия затвора. Особое внимание во время проведения экспериментов обращалось на величину бытовой глубины, необходимой для нахождения гидравлического прыжка в предельном положении.

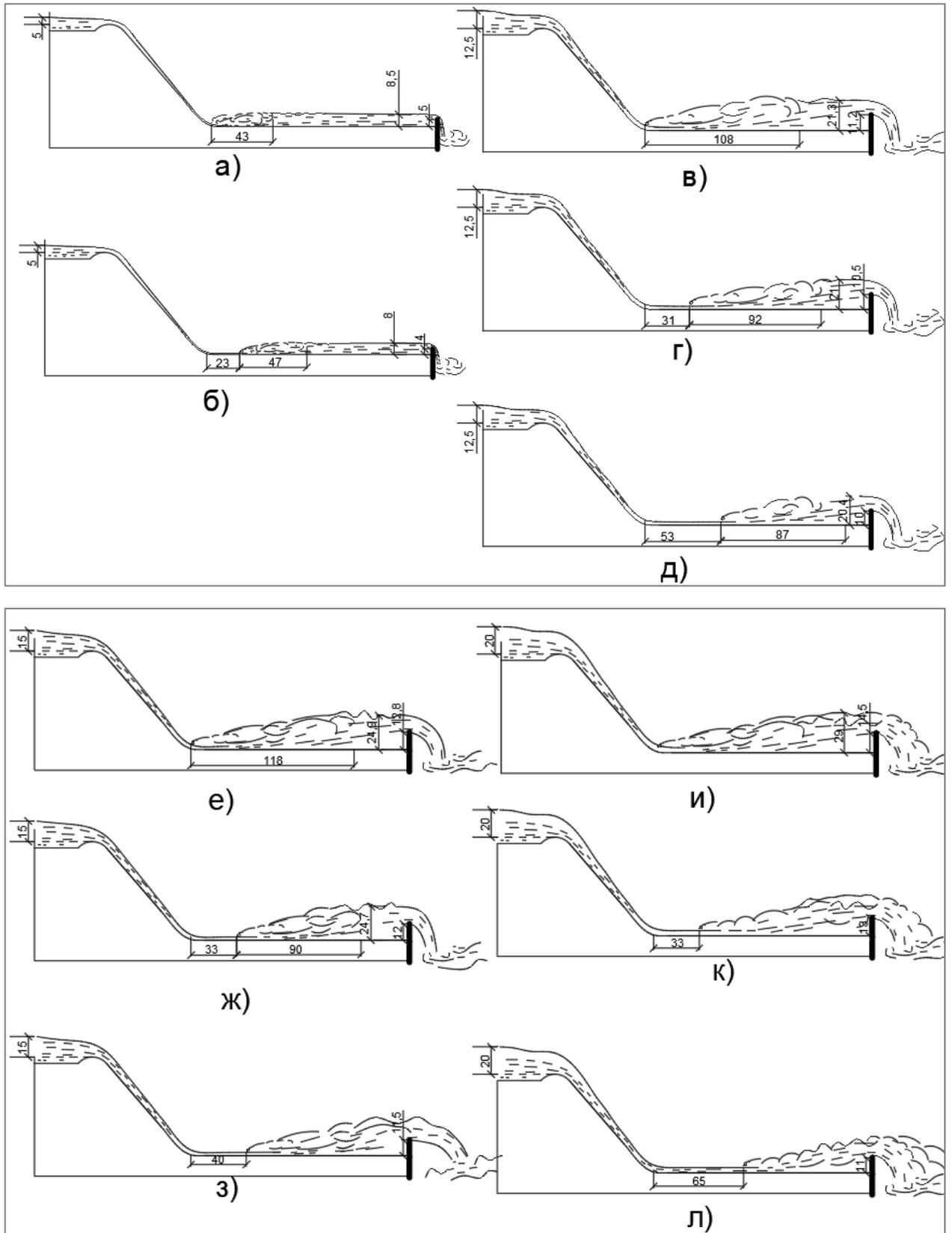


Рисунок 3.7 – Схемы расположения гидравлического прыжка (а – л) при различной степени открытия концевого затвора и напорах на гребне водослива

Экспериментальный анализ параметров гидравлического прыжка приведен в таблице 3.2, а изменение его характера в зависимости от бытовой глубины представлено на рисунке 3.8.

Таблица 3.2 – Результаты замера параметров гидравлического прыжка

H, см	H <sub>стенки</sub> , см	Прыжок			h <sub>быт.</sub> , см
		L отгона, см	h', см	L прыжка, см	
5	5	0	0,75	43	9,6
	4	23	0,8	47	8,6
7,5	7	0	1,2	68	13,4
	6	40	1,2	58	12,4
10	9	0	1,8	83	17,1
	8	31	1,8	72	15,9
12,5	11,2	0	2,4	108	21,3
	10,8	20	2,4	98	21,2
	10,5	31	2,4	92	21
	10	53	2,4	87	20,4
15	12,8	0	2,8	118	24,9
	12	20	2,8	102,4	24,7
	11,5	40	2,8	96,7	23,4
	11	51	2,8	95,8	23,2
17,5	13,5	0	3,3	128,0	28,4
	13	17	3,4	123,0	27,4
	12,5	28	3,45	108,4	26,4
	12	43	3,5	104,3	25,5
20	14,5	0	3,8	138,8	38,5
	13,5	23	4,1	131,9	36,9
	13	33	4,2	129,8	36,4
	12	50	4,3	127,7	35,9

Вторую сопряженную глубину также можно определить исходя из величины первой сопряженной глубины. При условии начала гидравлического прыжка в предельном положении  $h' = h_c$ . Определить вторую сопряженную глубину можно по формуле [20]:

$$h'' = 0.5h'(\sqrt{1 + 8Fr_1} - 1) \quad (3.4)$$

Где:  $Fr_1$  – число Фруда при  $h'$ .

$$Fr_1 = \frac{v^2}{gh'} \quad (3.5)$$

$$v = \frac{Q}{\omega} = \frac{\sigma \cdot \varepsilon \cdot m \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot H_0^{3/2}}{h' \cdot b} = \frac{m \cdot \sqrt{2g} \cdot H_0^{3/2}}{h'} \quad (3.6)$$

тогда

$$Fr_1 = \frac{2m^2 \cdot H_0^3}{h'^3} \quad (3.7)$$

Подставляя (3.7) в (3.4) получаем выражение для второй сопряжённой глубины  $h''$

$$h'' = 0.5h' \left( \sqrt{1 + 16 \cdot \frac{m^2 \cdot H_0^3}{h_1^3}} - 1 \right) \quad (3.8)$$

Длина прыжка может быть определена по формуле М. Д. Чертоусова [12]

$$l_{\text{пр}} = 2,5(1,9h'' - h') \quad (3.9)$$

Длина подпертых прыжков сокращается на 70...80 % по сравнению с длиной совершенных прыжков [12]. Используя формулу Н.Н. Павловского, можно записать:

$$l_{\text{п.пр}} = 0,8 \cdot 2,5(1,9h'' - h') \quad (3.10)$$

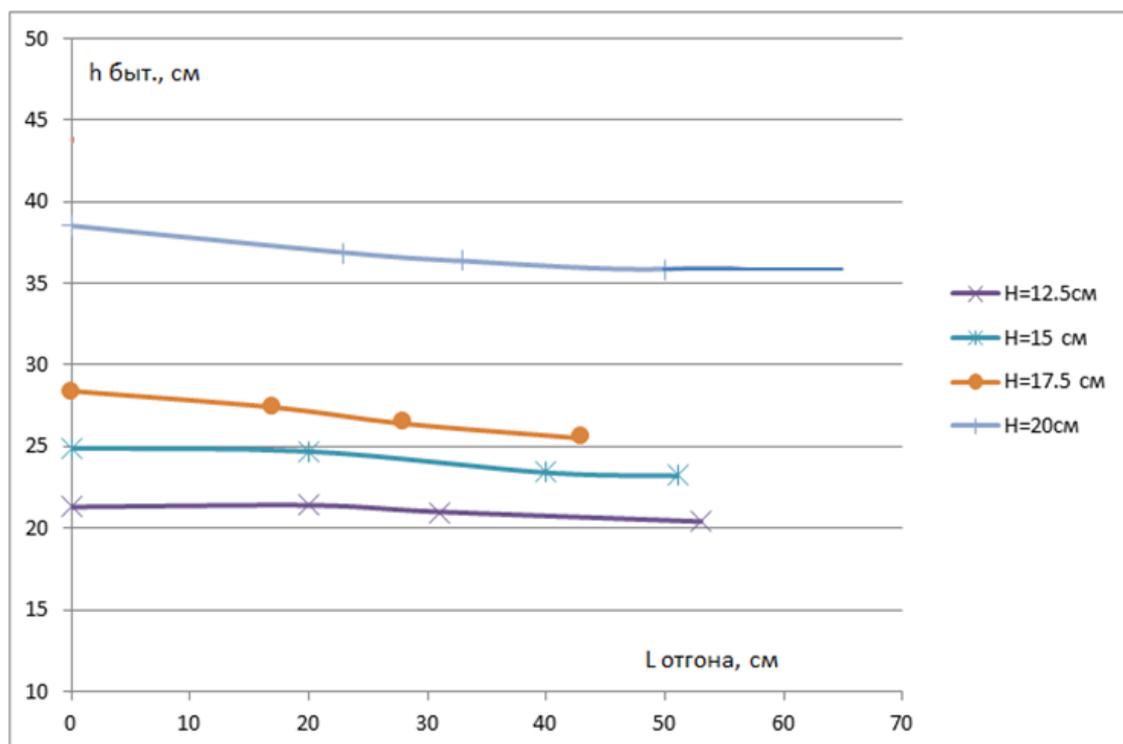


Рисунок 3.8 – Графики зависимости длины отгона  $L_{\text{отгона}}$  гидравлического прыжка от бытовой глубины при разных значениях  $H$

Начало гидравлического прыжка в предельном положении соответствует  $L_{\text{отгона}} = 0$  см. Соответственно, на этих точках бытовая глубина равна второй сопряженной глубине. Незначительное снижение бытовой глубины может привести к значительному отгону гидравлического прыжка (рис. 3.8).

На рисунке 3.9 представлены несколько фотографий экспериментальных опытов при гладкой поверхности водоската:



а) Напор  $H = 5\text{ см}$ ,  $h_{\text{быт}} = 9,6\text{ см}$



б) Напор  $H = 7,5\text{ см}$ ,  $h_{\text{быт}} = 13,4\text{ см}$



в)  $H = 10\text{ см}$ ;  $h_{\text{быт}} = 15,9\text{ см}$



г)  $H = 10\text{ см}$ ;  $h_{\text{быт}} = 17,1\text{ см}$

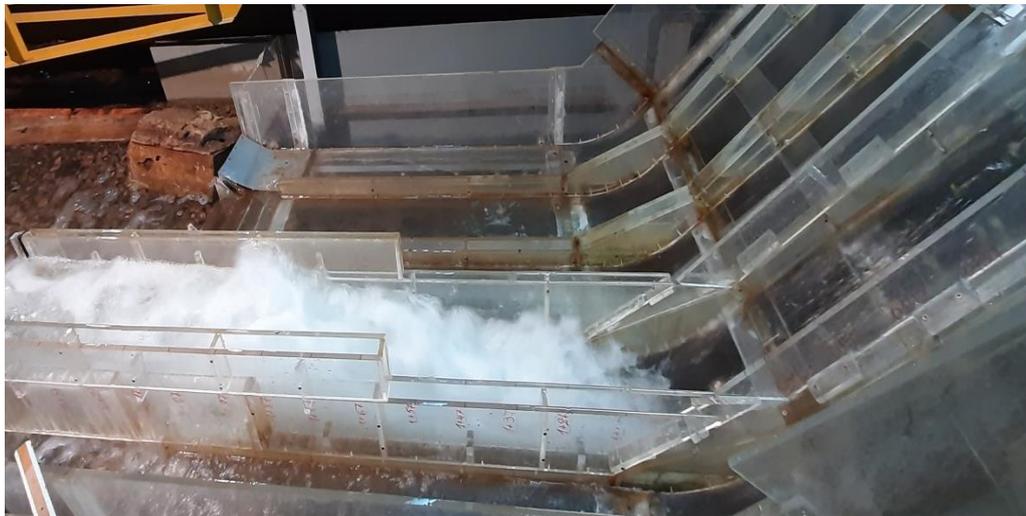
д)  $H=12,5$  см;  $h_{\text{быт}}=21$  сме)  $H=12,5$  см;  $h_{\text{быт}}=21,3$  смж)  $H=15$  см;  $h_{\text{быт}}=24,9$  см

Рисунок 3.9 – Фотореференц картины сопряжения бьефов при гладкой поверхности низовой грани плотины

Как свидетельствуют экспериментальные данные, поток воды поступает в нижнем бьефе с большой энергией. В данной работе будем рассматривать установку гасителей энергии непосредственно на сливной грани в дополнении к традиционным методам гашения энергии потока в нижнем бьефе.

### 3.1.3. Оценка гидродинамического воздействия на гладкий водоскат

Изучение распределения гидродинамического давления на водосливной поверхности позволяет выявить зоны, которые испытывают максимальную

гидродинамическую нагрузку, что даёт возможность в дальнейшем принимать необходимые меры для их защиты, а также оценить надёжность работы водосброса в целом.

В качестве примера рассмотрим модель водосливной плотины с гладкой водосливной низовой гранью средненапорного водосброса №2 Богучанской ГЭС [39], гидравлические исследования которого были выполнены под руководством проф., д.т.н. Н.В. Ханова и А.П. Гурьева для строительного периода на этом же экспериментальном лотке с линейным масштабом 1:60. Статическая составляющая давления в точках по оси водосливного пролёта определялась с точностью до 2% пьезометрированием, а в отдельных случаях при помощи статического отверстия трубки Пито. Схема установки пьезометров приведена на рисунке 3.10.

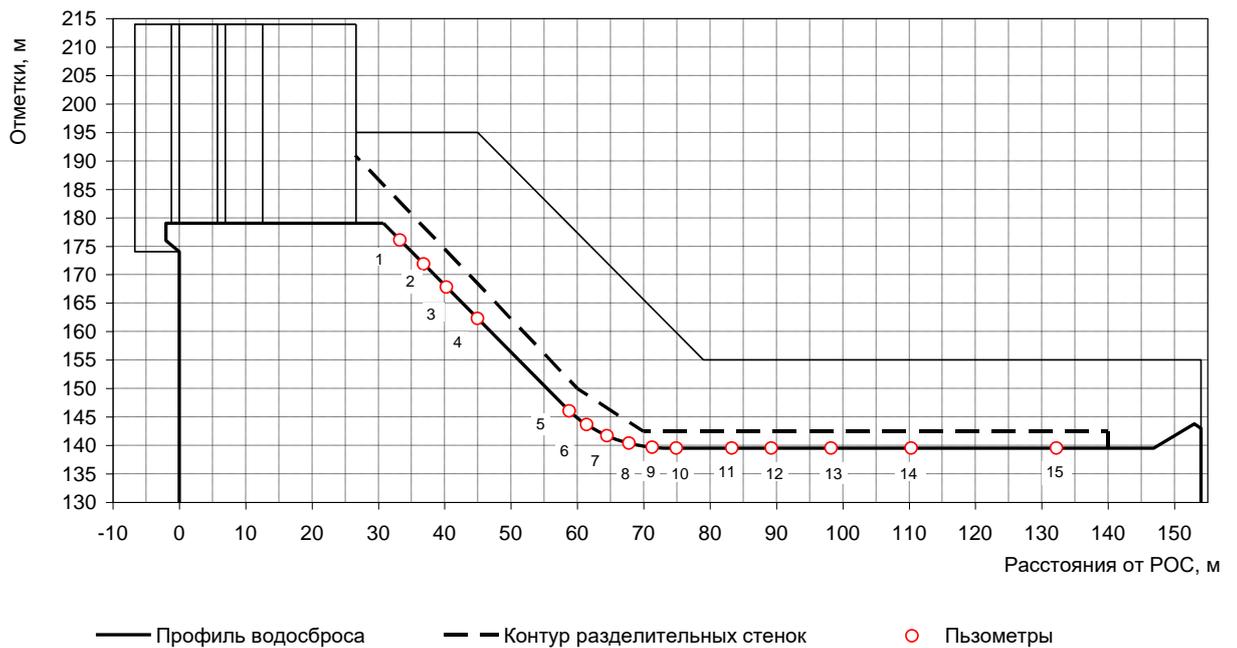


Рисунок 3.10 – Размещение пьезометров по оси водосливного пролёта

По результатам изучения распределения осреднённого давления, как и предполагалось, было установлено, что зоны с максимальным давлением расположены в конце водоската - на криволинейном участке сопряжения

наклонной сливной части водосброса с водобоем, в начальных сечениях гидравлического прыжка, формирующегося на участке сопряжения (рис.3.11).

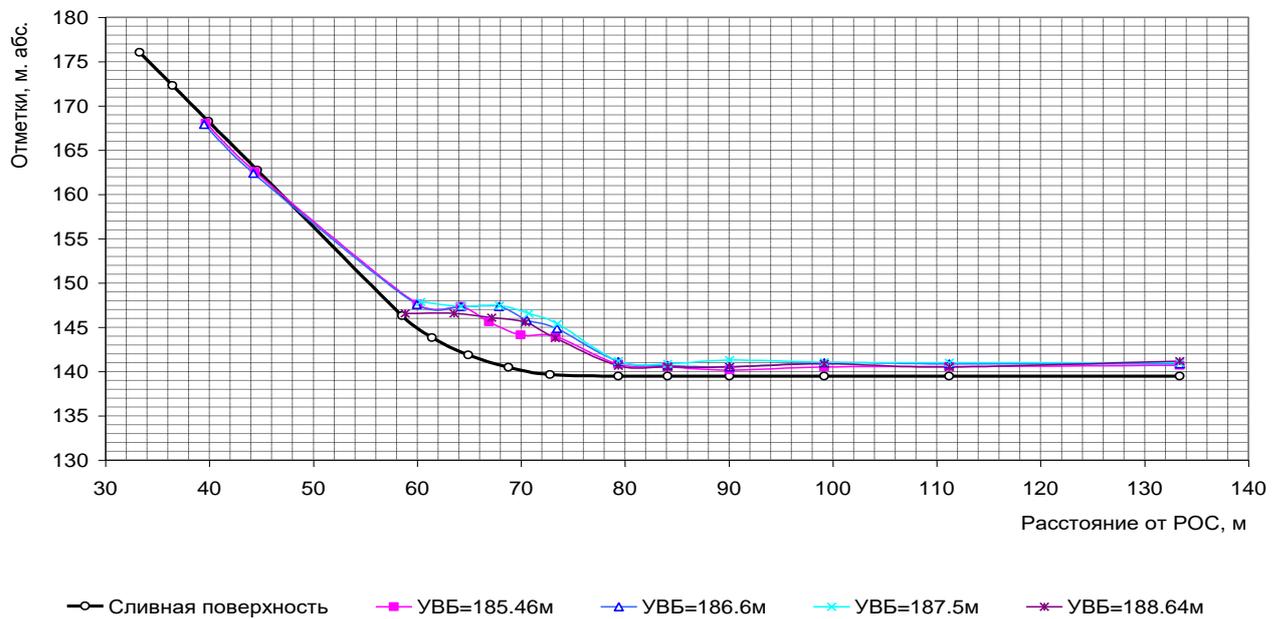


Рисунок 3.11 – Пьезометрическая линия на поверхности низовой грани водосброса при разных глубинах нижнего бьефа (натурные значения отметок и уровней воды нижнего бьефа соответствуют параметрам Богучанского гидроузла)

Для выявления области с максимальным значением пульсационной составляющей давления на гладком водоскате показания регистрировались 4-мя точечными датчиками давления индуктивного типа, с собственной частотой колебаний мембраны в воде около 2 кГц, схема установки которых приведена на рисунке 3.12. Их расстановка должна была дать наиболее полное представление о пространственной корреляции пульсации давления и частотных составляющих воздействий. При обработке записей реализаций процесса и амплитудном анализе определялись размах колебаний  $2A$ , а затем в предположении нормального закона и стандарт (среднеквадратичное отклонение)  $\sigma$ , наибольшим образом характеризующие интенсивность и неравномерность наблюдаемого процесса. Обработываемый период на осциллографической записи составлял около 100...200 с.

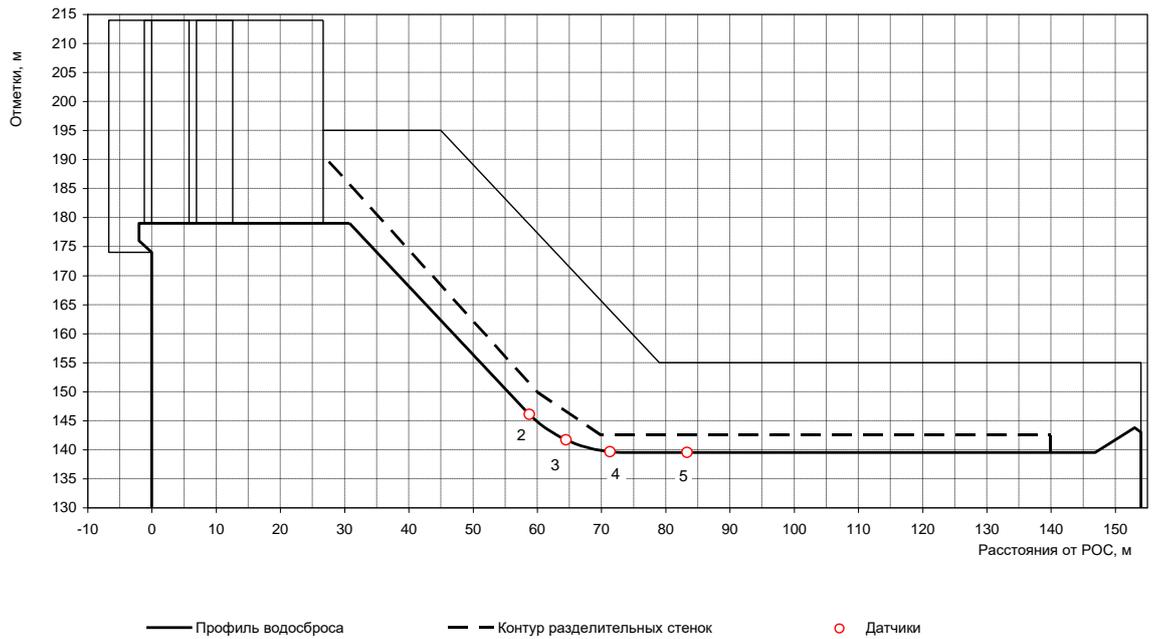


Рисунок 3.12. - Размещение датчиков пульсации давления на модели водосливной плотины

Определению гидродинамических характеристик потока (амплитуды и стандартов пульсации давления), предшествовала предварительная оценка возможных величин амплитудно-частотных параметров водного потока (коэффициентов корреляции, автокорреляционных функций и спектральных плотностей пульсаций давления). Проводилась оценка возможных значений самых низких частот пульсаций потока в отдельных точках модели и их зависимость от скоростей водного потока по оси пролёта водопропускного сооружения ( $V_{\min}$  и  $V_{\max}$ ).

Исходя из параметров модели и диапазона гидравлических режимов, был определен возможный диапазон частот пульсаций давления, который обычно находится в пределах от 1,0 Гц до 300 Гц. Используя схематехническое моделирование, проведенное с помощью программы Micro Cap-8, была составлена макромодель исследуемого водосбросного сооружения, представленного своим диапазоном возможных амплитудных и частотных характеристик. Исходя из проведенного предварительного анализа исследуемого сооружения, была разработана электронная схема преобразователя (измерителя)

давлений, а также отладка его с использованием MicroCap-8. Блок-схема измерительной аппаратуры представлена на рисунке 3.13, используемой в подобных исследованиях в лаборатории водопропускных сооружений кафедры гидротехнических сооружений РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева [69].

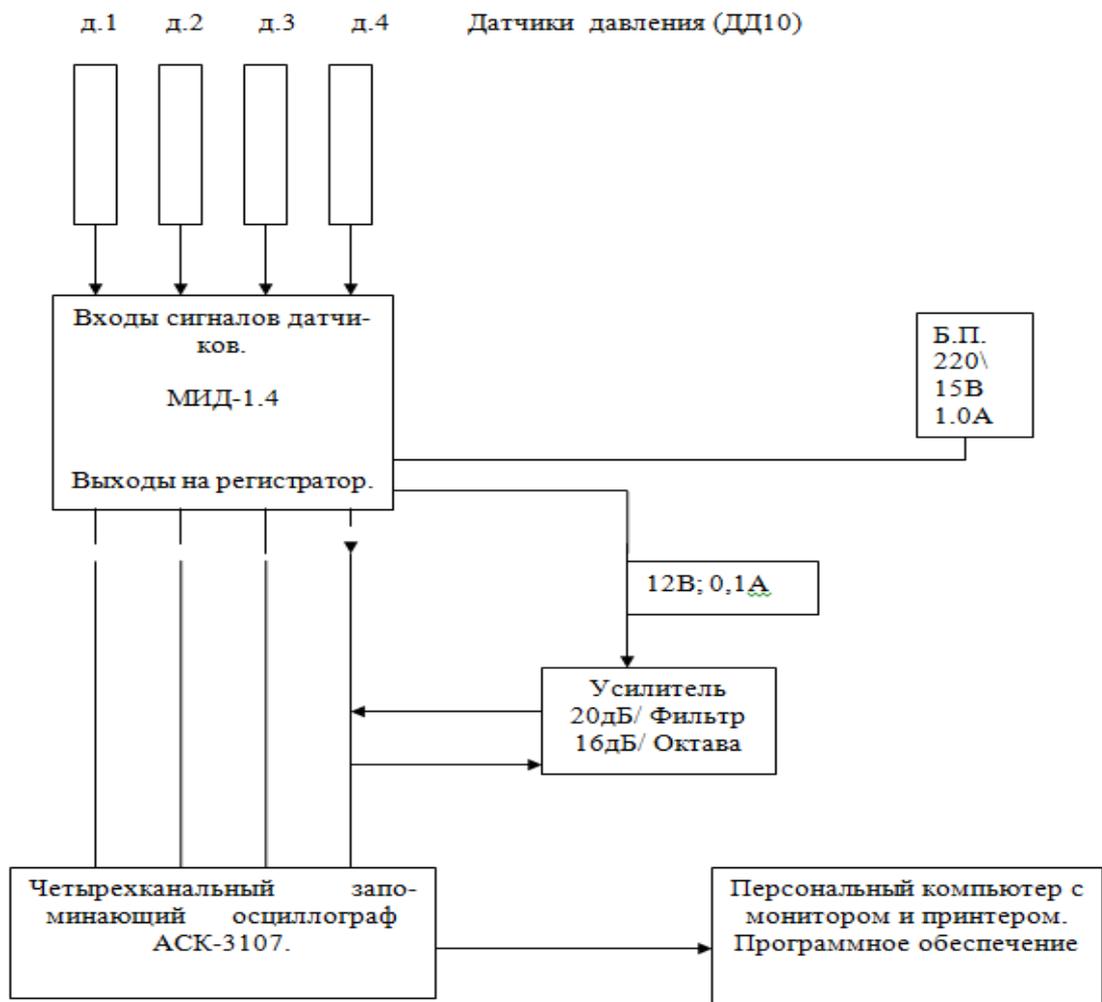


Рисунок 3.13. – Блок - схема соединения аппаратуры для измерения давления индуктивным датчиком давления [69]

На рисунке 3.14 приведены результаты гидродинамических исследований, адаптированные для условий работы водосливного пролёта плотины с гладкой нижней гранью при угле наклона  $49,6^\circ$  [38]. Интенсивность пульсации давления на участке от места установки датчика №3 до №5 близко соответствует известным экспериментальным данным для плоского прыжка [44, 46], в частности совпадают

местоположения экстремальных значений стандартов пульсации. Сопоставительный анализ показал, что величины статических нагрузок на модели находятся в пределах от 10 мм до 200 мм, при этом размах возможных пульсаций давлений может достигать 5...30% от величины среднего статического давления. Распределение максимальных размахов пульсации давления зависит от величины удельного расхода за водобоем. Наиболее высокие амплитудные значения пульсаций и действующие давления наблюдались в частотном диапазоне от 1,5 до 7 Гц. При ФПУ ( $УВБ_{ФПУ} = 187,92$  м, отметка гребня водослива 179 м) амплитудные значения достигают в натуре 7 м вод. ст. в начальной части водобоя (датчик №3) с частотой 4,9 Гц.

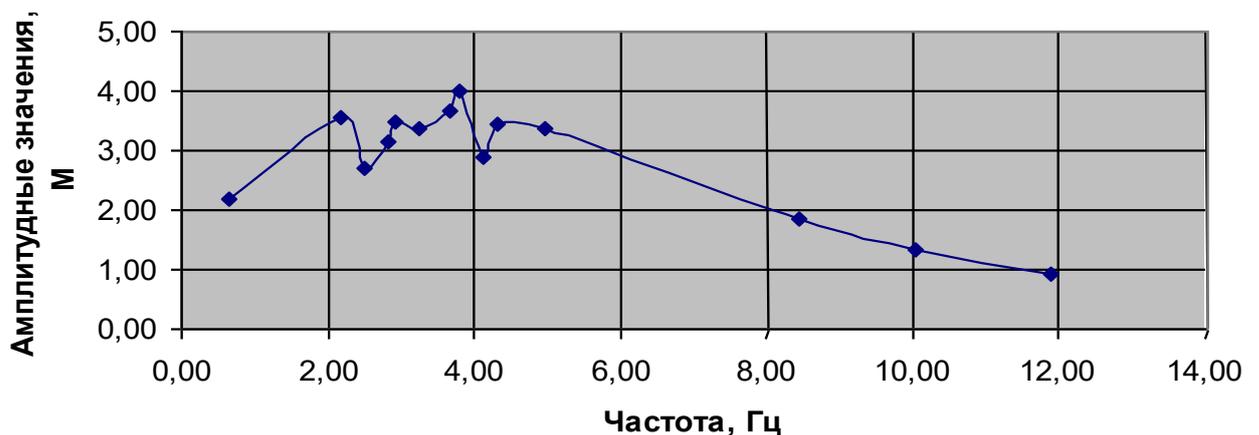


Рисунок. 3.14. Пример амплитудно-частотной характеристики пульсаций давления по оси пролёта (на модели - датчик №3) при  $УВБ=185,0$  м

Изменения пульсации давления по оси транзитного участка гладкого водоската таковы, что основная доля пульсационной нагрузки оказывается сосредоточенной в большинстве режимов на начальном участке водобоя. При сходе с водоската колебания давления относительно невелики, но при приближении вихрей ко дну, при сносе потоком и перемешивании их влияние резко увеличивается и стандарты давления возрастают. Таким образом, основные гидродинамические нагрузки, связанные с воздействием турбулентного потока при данном конструктивном решении, также концентрируются в основном на

плитах водобоя. За счёт чрезвычайно высокой пространственной корреляции между пульсациями в отдельных точках плит крепления водобоя, изменяющих значения коэффициентов корреляции соответственно с 0,9 до 0,6 по мере удаления от первого сжатого сечения, нагрузка сильно осредняется по площади водобойной плиты, что хорошо коррелируется с данными, приведёнными в научной литературе [34, 38, 40, 43, 46, 73]. Вследствие этого в спектре суммарной нагрузки превалирует существенно более низкая составляющая частот, чем пульсация давления в точках. Поскольку плиты водобоя, укрепляющие нижний бьеф водопропускного ГТС, по теоретическим разработкам д.т.н. В.М. Лятхера, апробированной его учениками (Комельков Л.В., Черных О.Н., Халтурина Н.В., Смирнов Л.В. и др.), являются острорезонансной системой и формируют энергию из относительно малых воздействий, то поскольку спектры пульсации давления имеют хоть и небольшие, но не нулевые значения, плиты крепления могут передавать водонасыщенному грунту, на котором они лежат, колебания. Именно из-за них в грунтовом основании могут возникнуть и распространяться на значительные расстояния упругие поверхностные волны, вовлекающие в колебания другие плиты водобоя и рисбермы, секции водосливной плотины или водопропускного ГТС, прилежащие земляные ГТС и береговые массивы грунта. Возмущения могут затухать на расстоянии не менее 0,5...5 км, как это и было на плотине Жигулёвской ГЭС (см. п. 1.3).

Также надо отметить, что при оптимизированной схеме сброса расходов через водосброс секции плотины, вибрация самой плотины может уменьшиться за счёт самосинхронизации при распределении расхода по всему фронту плотины и открытого пролёта [38]. Её частота может составлять не более 1,5 Гц. Наличие факторов, создающих неравномерность на водосливной грани представляет возможность взаимного гашения колебаний и изменение соотношения между максимальным и среднеквадратичными значениями, т.е. отступления от нормального закона распределения. При увеличении со временем эксплуатации жёсткости основания плотины характеристики вибрации её секций, собственных

колебаний, стандарты вертикальных вибраций могут быть резко понижены. Всё это в конечном итоге вызовет снижение уровня вибрации для строений на прибрежной территории.

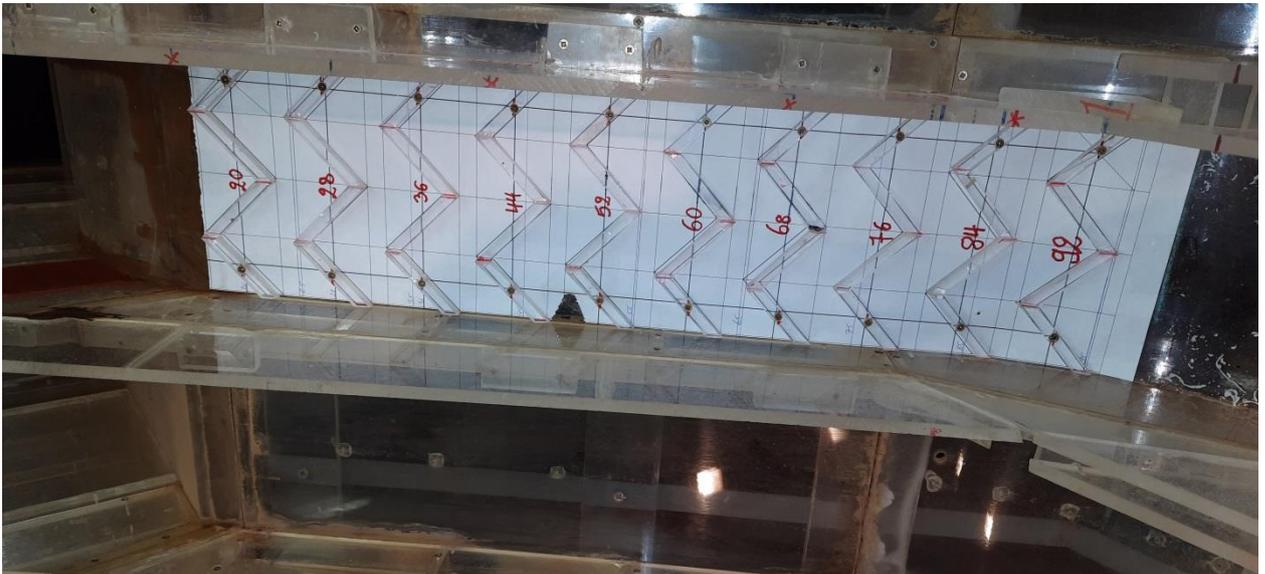
Можно предположить, что при интенсификации гашении основной части энергии на водоскатном участке, например, при установке на этом участке низовой грани плотины сопротивления в виде усиленной шероховатости типа двойного зигзага, подробно исследованного в данной диссертационной работе, и пренебрежением вибрации отдельных секций плотины вкупе с проектным регулированием уровней воды в верхнем и нижнем бьефах водных объектов поможет понизить даже существующий или возникающий при несанкционированных сбросах повышенный уровень вибрации жилых домов. Это позволит не вводить дополнительных ограничений при закладке новых домов на урбанизированных территориях прибрежных зон нижнего бьефа гидроузлов. Непосредственная оценка гидродинамических воздействий и нагрузок на элементы низко- и средненапорных водосливных плотин с негладкой поверхностью низовой грани может явиться предметом дальнейших экспериментальных исследований и теоретических проработок.

## **3.2 Результаты исследований работы водосброса при установке разных типов искусственной шероховатости на водосливной грани**

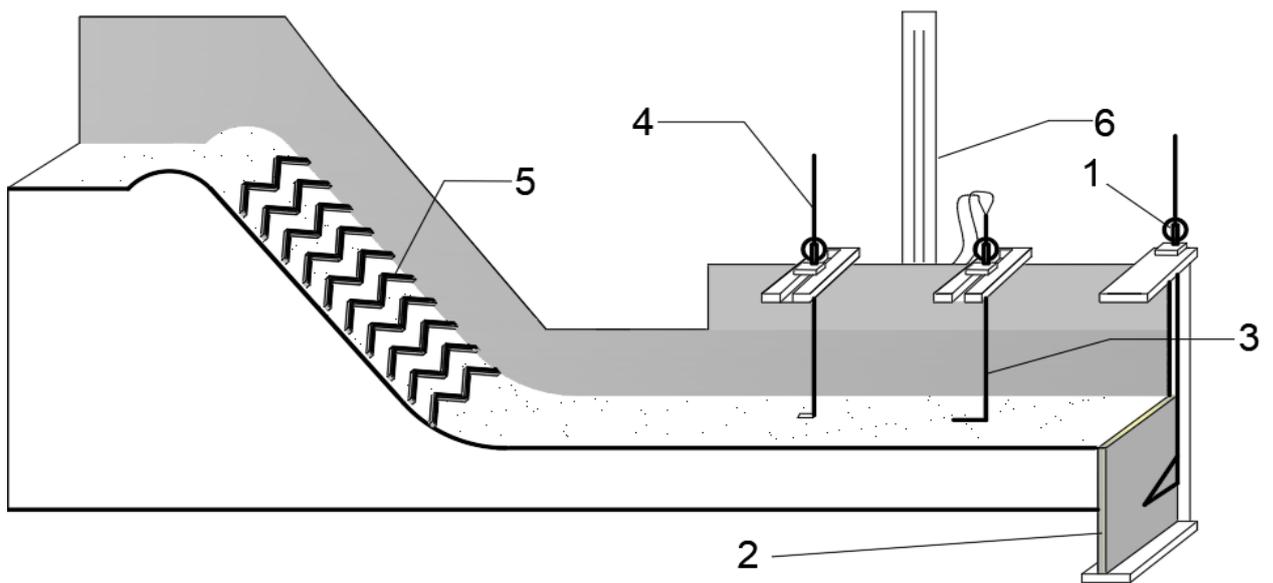
### **3.2.1 Двойной зигзаг с двумя изломами против течения**

Данная форма получила широкое распространение и является наиболее эффективным из широко применяемых ребристых элементов шероховатости на быстротоках. При изготовлении деталей соблюдались прямые углы во всех изломах. Крепление деталей на физической модели проводилось саморезами с шагом  $\delta = 8\Delta$ , где  $\Delta$  – толщина ребер шероховатости, принятая равной 1 см за исключением первого ряда:  $\Delta = 0,5$  см и второго:  $\Delta = 0,8$  см для обеспечения плавного перехода потока с гладкой на шероховатую грань. Применялись детали

квадратного сечения ( $\Delta \times \Delta$ ). На рисунках 3.10а и 3.10б показана схема размещения зигзагов на водосливной грани экспериментальной установки.



а



б

Рисунок 3.15 – Модельная установка с усиленной шероховатостью типа двойного зигзага: 1 – подъемный шпигенмасштаб; 2 – затворное устройство; 3 – трубка

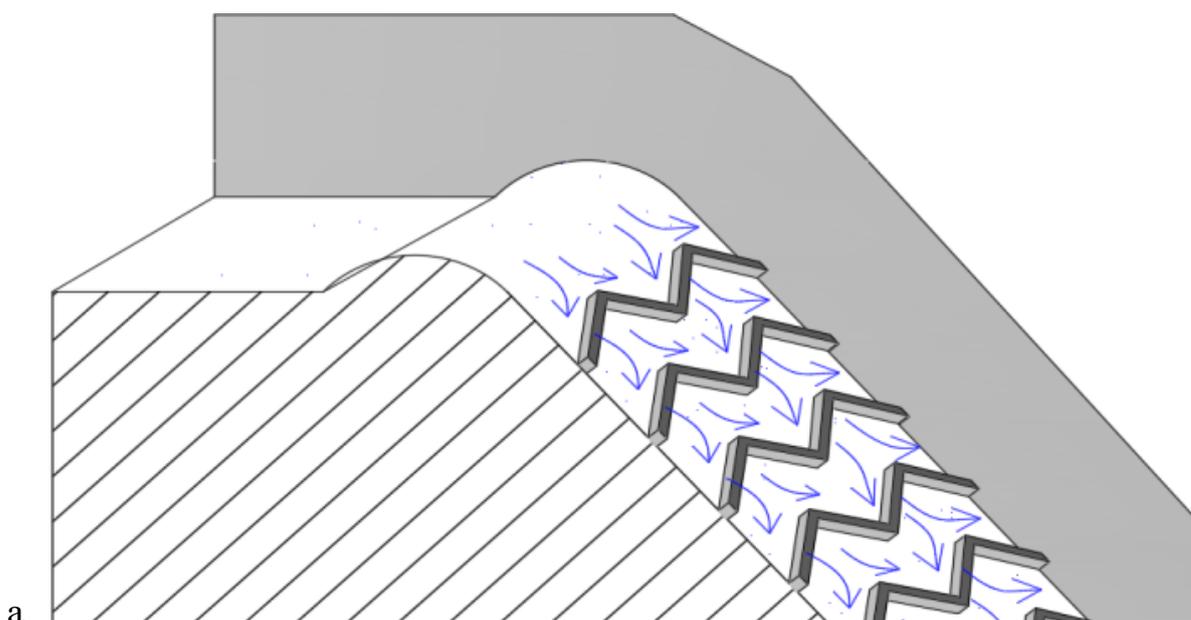
Пито; 4 – шпигенмасштаб для определения отметки уровня свободной поверхности; 5 – рёбра сопротивления - двойной зигзаг; 6 – пьезометры к трубке

Пито

Первый ряд ребер шероховатости установлен на расстоянии 20 см от отметки гребня. Это расстояние позволяет не создавать дополнительный подпор на верхнем бьефе.

Высокая турбулентность и аэрация потока при выходе потока с ребер шероховатости затрудняет замер гидродинамических параметров потока в сжатом сечении. Различные измерения проведены в поперечных створах С и D, выбранных в наиболее спокойной части потока. К оцениваемым параметрам относятся глубина потока, визуальный характер течения, начало аэрации и местная скорость потока в выбранных сечениях.

Эффективность рассматриваемых гасителей избыточной энергии (рис. 3.16) была оценена определением второй сопряженной глубины и с помощью закона сохранения энергии (формула 2.18).



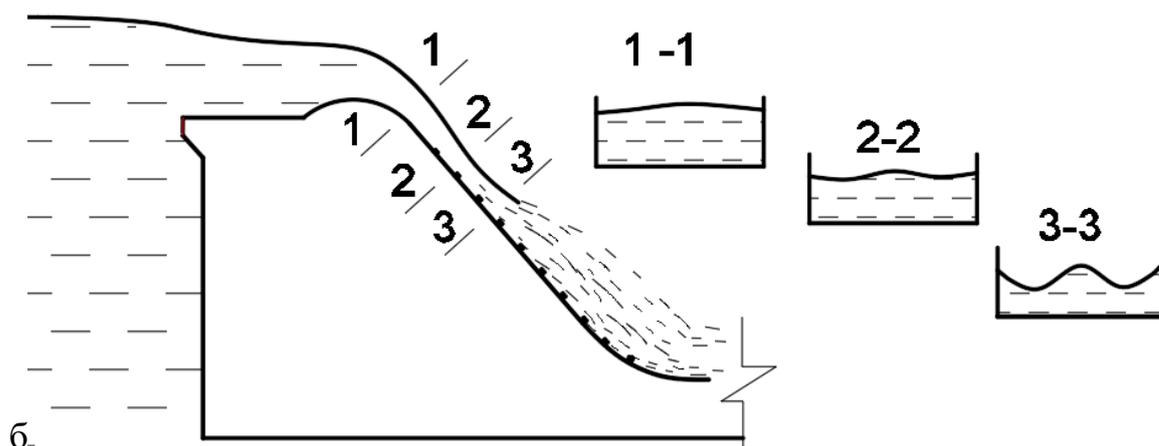


Рисунок 3.16 – Схемы движения потока при обтекании шероховатости зигзагообразного типа: а – план водоската; б – продольный разрез и поперечные сечения водоската

При истечении через зигзагообразные ребра шероховатости в виде двойного зигзага против течения, наблюдается стремление потока скапливаться по центру и у боковых стенок (рисунок 3.16), что вызывает неравномерное поперечное распределение потока с последующей аэрацией в местах, где глубина воды становится недостаточной для обтекания ребра шероховатости без отрыва струя. Стремление потока скапливаться в центре пролёта водосливной грани и у боковых стенок при обтекании ребер искусственной шероховатости в виде двойного зигзага, которое больше всего заметно над шероховатостью на сливной грани, исчезает при появлении аэрации и не передаётся в нижний бьеф [36].

На рисунках ниже (3.17а, 3.17б, 3.17в, 3.17г, 3.17д) представлен фотореференц экспериментальных опытов соответственно при напоре на пороге водослива  $H$ , равном 7,5 см, 10 см, 15 см, 20 см, 25 см и 33 см.

Анализ фотофиксации процесса движения потока по водосливной грани плотины при создании дополнительного сопротивления на ней в виде двойного зигзага, показывает, что расстояние от гребня до места начала аэрации увеличивается с ростом напора на гребне водослива. В нижнем бьефе наблюдается поток, насыщенный пузырьками воздуха, особенно в начале водобоя (рисунок 3.17г; 3.17д; 3.17е). Однако следует отметить, что после обтекания всех

сопротивлений, поток перераспределяется в нижнем бьефе более равномерно, а концентрация пузырей воздуха начинает постепенно уменьшаться

а)  $H = 7,5$  смб)  $H = 10$  смв)  $H = 15$  смг)  $H = 20$  смд)  $H = 25$  сме)  $H = 33$  см

Рисунок 3.17 – Фотореференц картин протекания потока на низовой грани водосливной плотины при установке усиленной шероховатости зигзагообразного типа

Измерение местных скоростей позволило построить эпюры скоростей в промерочных поперечных створах С и D при разных напорах (7,5 см, 10 см, 15 см, 20 см, 25 см). Для примера приводим эпюры скоростей в центральном продольном створе «с», замеренных в поперечном створе D (рис. 3.18).

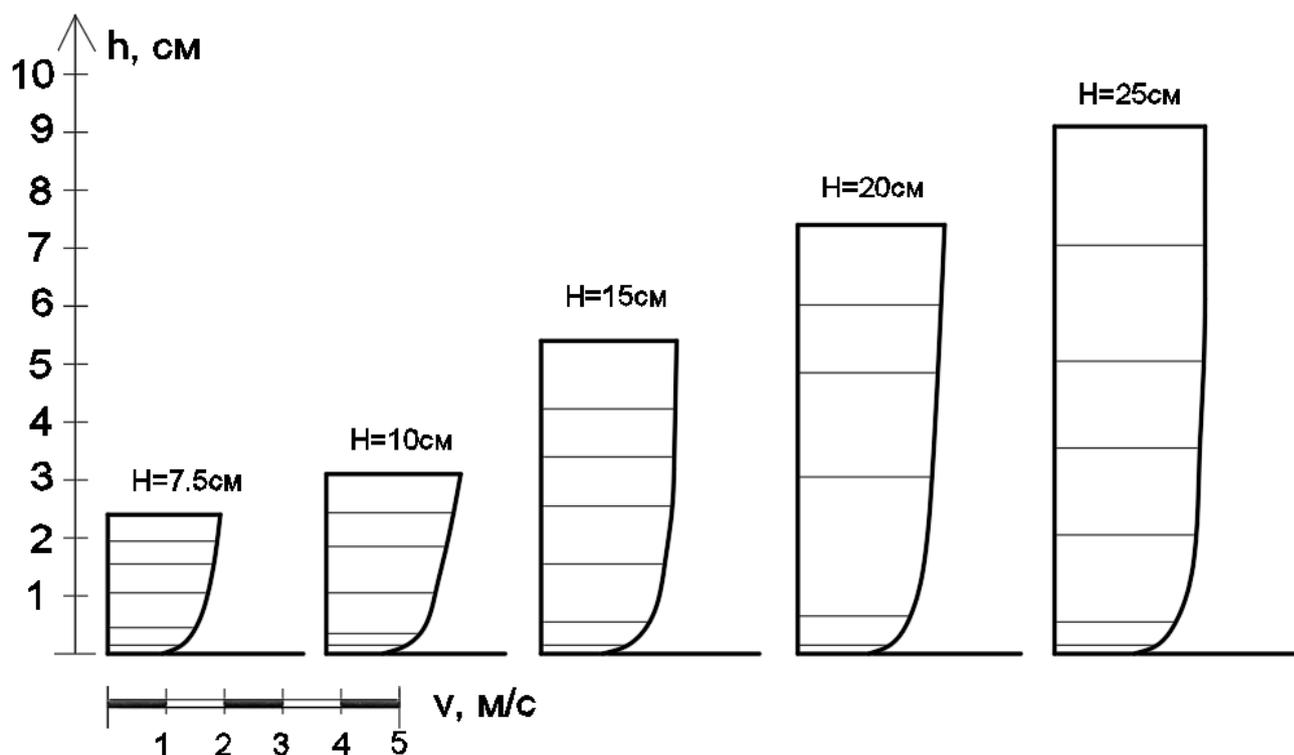


Рисунок 3.18 – Эпюры скоростей потока в центральном продольном створе «с», замеренных в поперечном створе «D» при шероховатости зигзагообразного типа

Можно констатировать, что при обтекании над ребрами сопротивления в виде двойного зигзага, по сравнению с истечением на гладком водосливе, наблюдается высокая аэрация потока.

Как видно из картин, представленных на рисунках 3.18 – 3.20, установленные элементы сопротивления существенно снижают избыточную энергию потока. Для оценки их влияния на вторую сопряженную глубину необходимо было создать подпор в нижнем бьефе с помощью затворного устройства, аналогично, как и при гладкой низовой грани плотины.



Рисунок 3.19 – Истечение при напоре 15 см и бытовой глубине 19,1 см

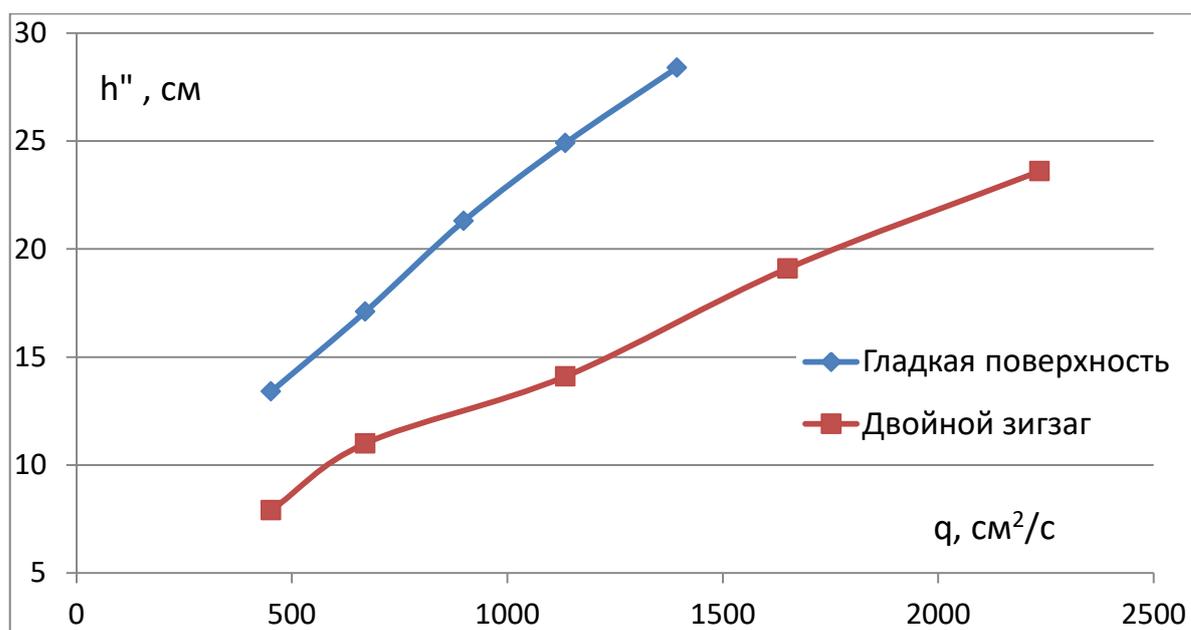


Рисунок 3.20 – Зависимость второй сопряженной глубины от удельного расхода при установке на водоскате искусственной шероховатости в виде двойного зигзага

Таким образом, применение двойного зигзага на водосливной грани приводит к уменьшению второй сопряженной глубины. Это означает изменение

характера гидравлического прыжка, который при одной и той же глубине воды в отводящем канале, может измениться с отогнанного на надвинутый.

### 3.2.2 Бруски в разбежку

Как и для двойного зигзага, нормальные бруски в разбежку широко применяются в качестве гасителей энергии на быстротоках. Для изготовления ребер шероховатости использовали оргстекло толщиной 10 мм, за исключением двух первых рядов. Крепление деталей на физической модели проводилось саморезами с шагом  $\delta = 8\Delta$ , где  $\Delta$  – толщина ребер шероховатости,  $\Delta = 1$  см за исключением первого ряда ( $\Delta = 0,5$  см) и второго ( $\Delta = 0,8$  см). Применялись детали квадратного сечения ( $\Delta \times \Delta$ ) также как у двойного зигзага, что в дальнейшем позволили провести сравнительный анализ эффективности воздействия брусков в разбежку по сравнению с двойным зигзагом. На рисунке 3.21 показана схема размещения брусков в разбежку на водосливной грани модели плотины, установленной на экспериментальной модели.

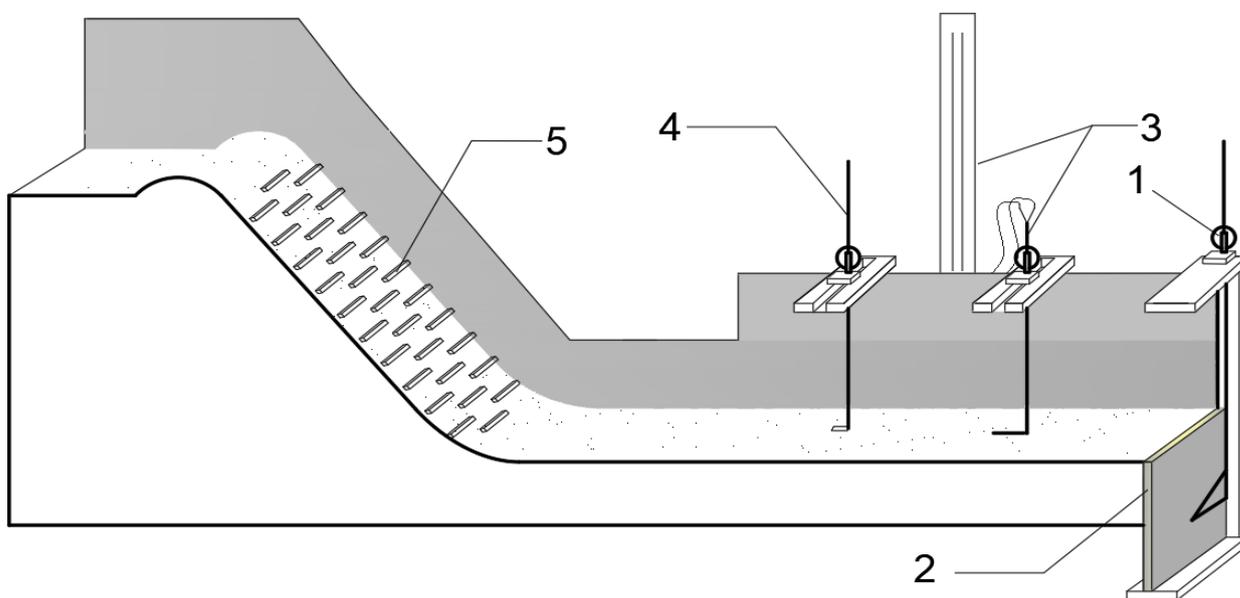


Рисунок 3.21 – Модельная установка с брусками в разбежку: 1 – подъемный механизм для затворного устройства; 2 – затворное устройство; 3 – трубка Пито; 4 – шпитценмасштаб; 5 – бруски в разбежку

Измеренные параметры остались те же самые, как и у двойного зигзага. При одних и то же напорах, здесь наблюдается по сравнению со схемой установки двойного зигзага ускоренное ослабление процесса аэрации на водоскате по мере увеличения напора. При напоре больше 20 см, что эквивалентно удельному расходу ан модели  $1650 \text{ см}^2/\text{с}$ , поток плавно переходит к неаэрированному течению (рис. 3.22а – 3.22в).

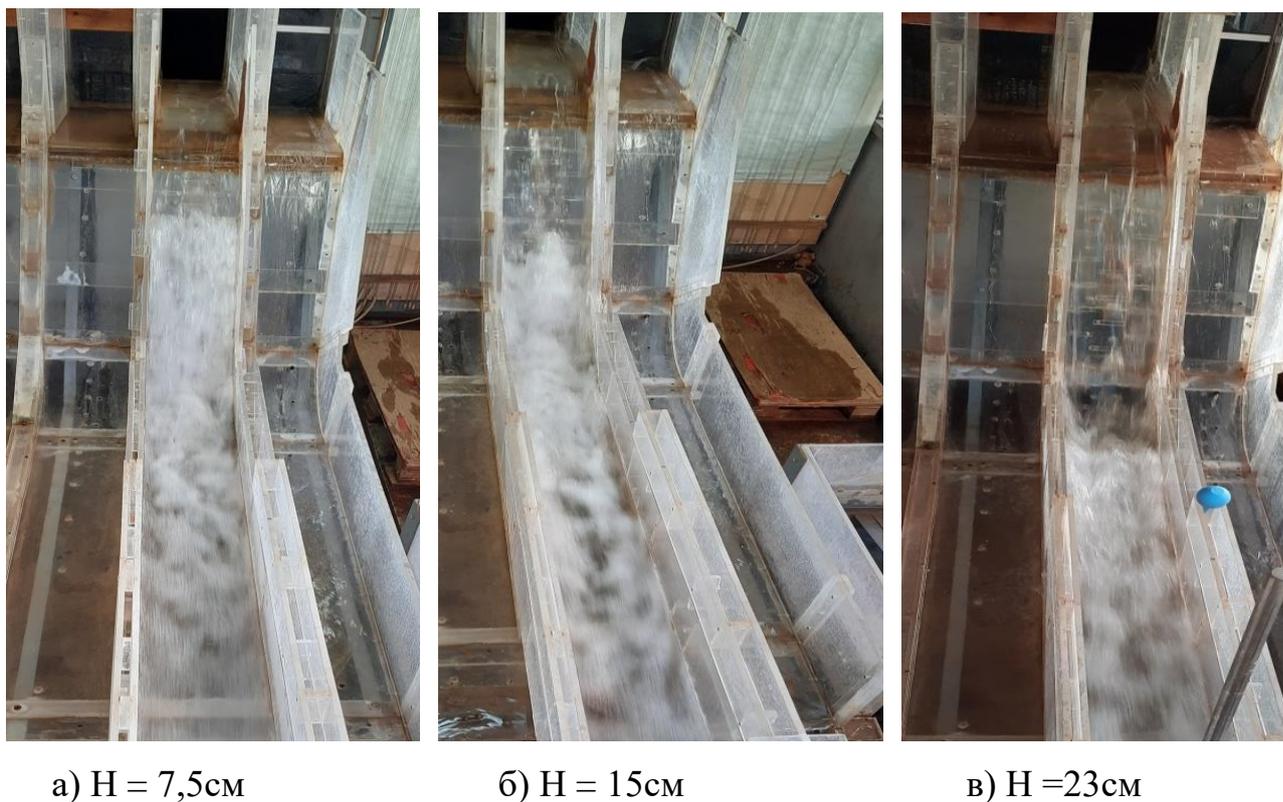


Рисунок 3.22 – Истечение через бруски в разбежку

Как и при двойных зигзагах, измерения гидродинамических показателей потока в нижнем бьефе проводились в поперечном створе D из-за высокой аэрации и турбулентности у сжатого сечения. На рисунке 3.23 показаны эпюры скоростей в середине поперечного створа D.

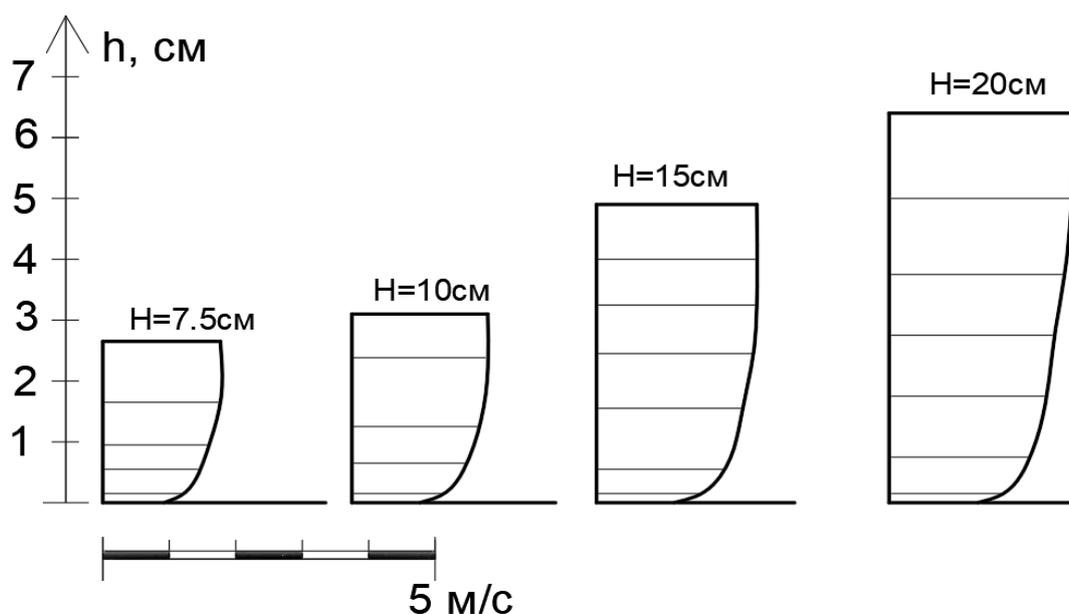


Рисунок 3.23 – Эпюры скорости в центральном продольном створе «с» и поперечном створе «D» при шероховатости типа бруски в разбежку

В результате экспериментов был сделан вывод, что усиленная шероховатость в виде брусков в разбежку оказалась недостаточно эффективной для сопряжения бьефов без дополнительных мер, направленных на гашение избыточной энергии. Как и для предыдущих случаев (гладкая грань и двойной зигзаг) влияние данной формы сопротивления на характер гидравлического прыжка оценивалось путем создания подпора в нижнем бьефе (рис. 3.24 и 3.25).



Рисунок 3.24 – Плановая картина течения потока при установке на водоскате сопротивлений в виде брусков в разбежку, напоре на гребне водослива  $H = 15$  см и бытовой глубине в нижнем бьефе 19,4 см

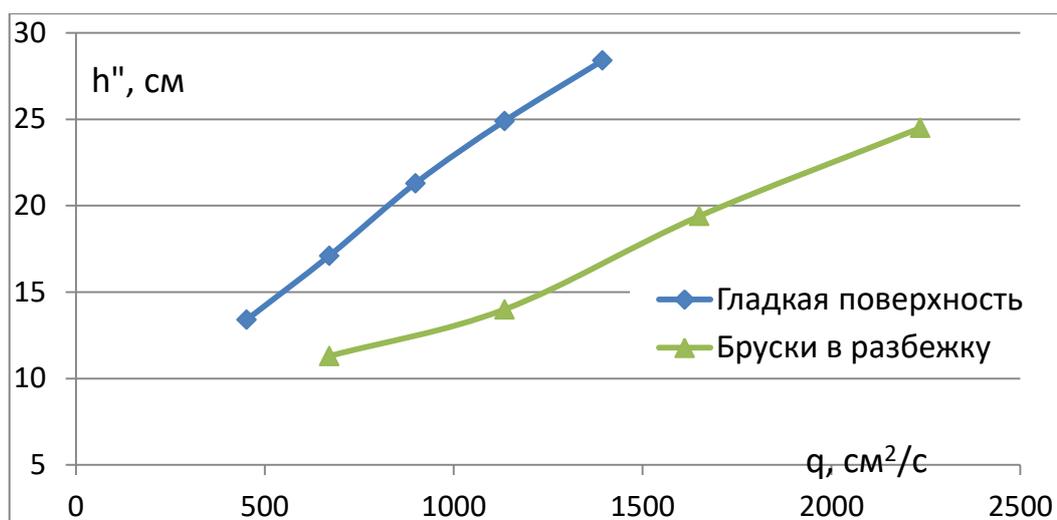


Рисунок 3.25. Зависимость второй сопряженной глубины от удельного расхода, при установке на водоскате искусственной шероховатости в виде брусков в разбежку

Проведенные исследования показали, что установка брусков в разбежку приводит к значительному уменьшению второй сопряженной глубины, что доказывает их пользу в гашении избыточной энергии потока. Наблюдается также ослабление процесса аэрации потока по сравнению с устройством на водоскате двойного зигзага.

### 3.2.3 Нормальные бруски

Модельные исследования при установке нормальных брусков в качестве сопротивлений выполнялись по аналогии с другими типами шероховатости - очередные наблюдения производились над теми же параметрами, как и в выше описанных опытах. Параметры размещения ребер сопротивления соблюдались по аналогии:  $\delta = 8\Delta$ , где  $\Delta = 1$  см, в первом ряду  $\Delta = 0,5$  см, во втором –  $\Delta = 0,8$  см (рис. 3.26). Картины течения на водоскате при установке нормальных брусков и варьировании напора  $H$  от 7,5 до 23 см приведены на рисунке 3.27.

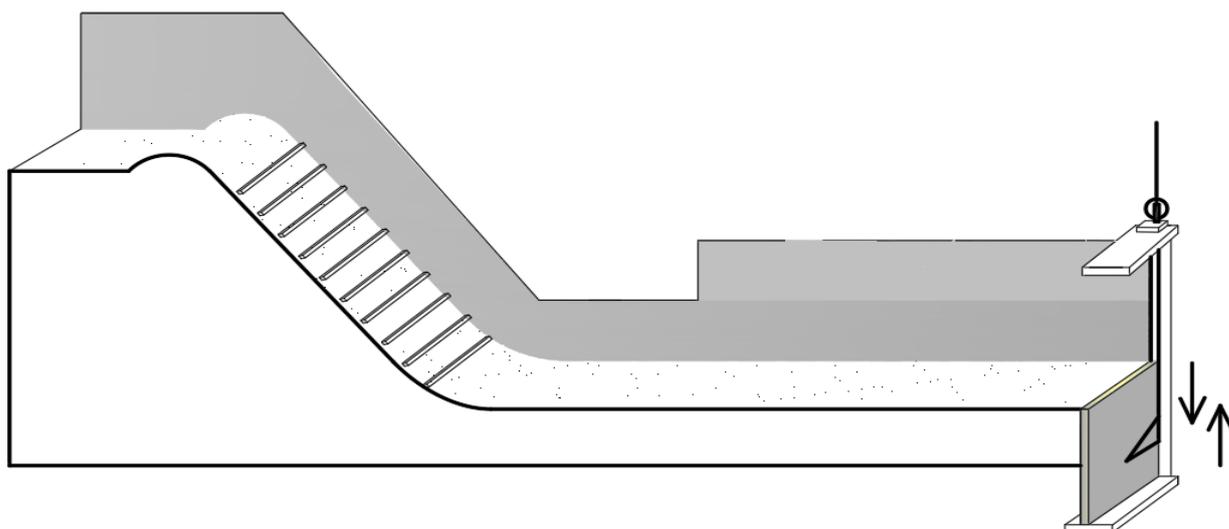


Рисунок 3.26. Модельная установка с усиленной шероховатостью в виде нормальных брусьев на водоскате



Рисунок 3.27 – Картины течения на водоскате при установке нормальных брусьев: а –  $H = 7,5$  см; б –  $H = 15$  см; в -  $H = 23$  см

Лабораторные эксперименты выявили достоинство у данных элементов шероховатости в том, что поток более равномерно распределяется по всей ширине лотки. Наблюдается отсутствие соударения струй, что приведет к ослаблению подверженности потока к аэрации по сравнению с применением двойного зигзага или брусков в разбежку (рисунок 3.27). Лабораторные опыты проводились по аналогии с предыдущими опытами (двойной зигзаг и бруски в разбежку). Полученные показатели при установке нормальных брусков на водосливной грани приведены на рисунках 3.28 и 3.29.

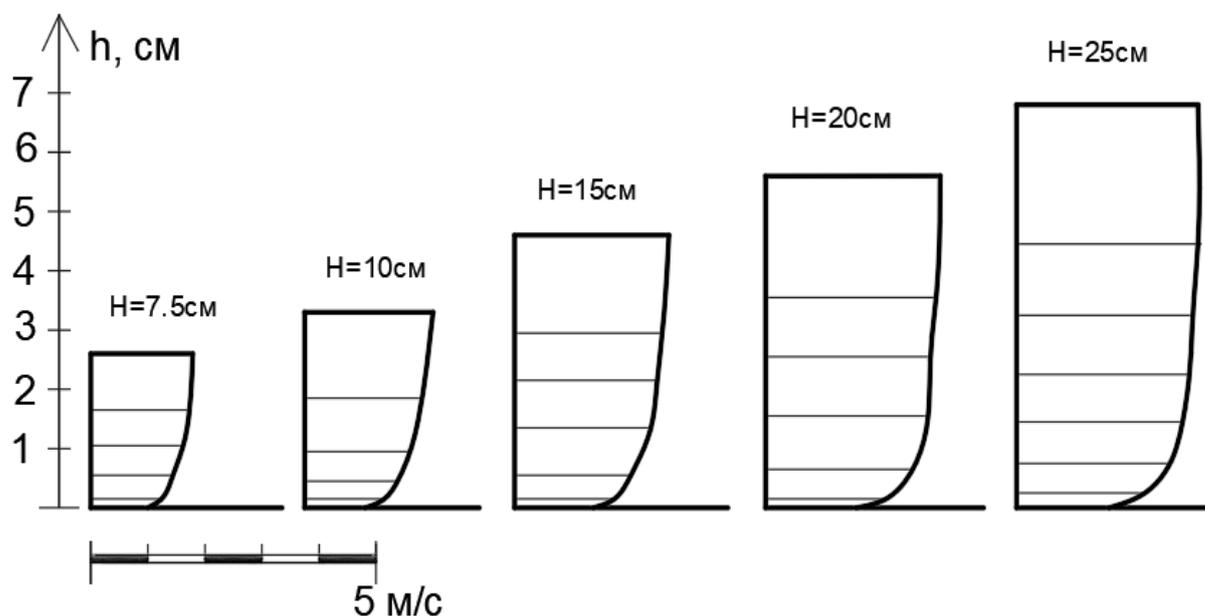


Рисунок 3.28 – Эпюры скорости в середине поперечного створа «D» при установке нормальных брусков на сливной грани водосброса

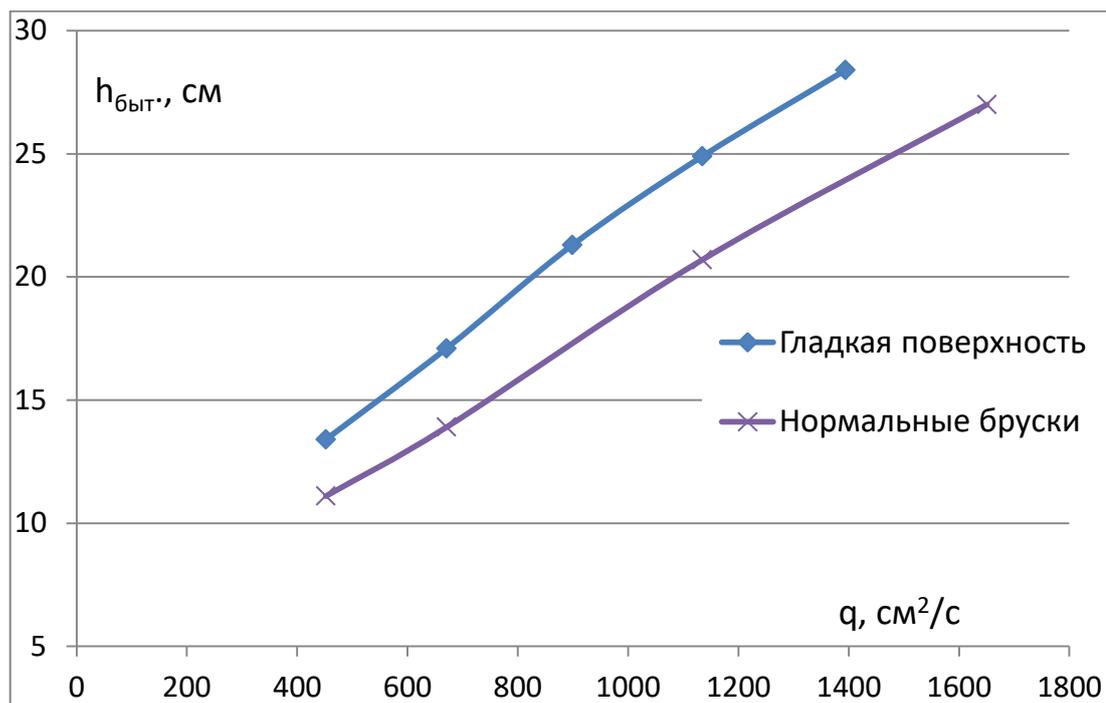


Рисунок 3.29 – Зависимость бытовой глубины от удельного расхода при условии начала прыжка в предельном положении в случае установки на водосливной грани нормальных брусков

Несмотря на выше перечисленные достоинства, наблюдаются значительные скорости в нижнем бьефе, что соответствует довольно большим значениям второй сопряженной глубины и указывает на снижение эффективности по сравнению с установкой на водоскате шероховатости в виде двойного зигзага или брусков в разбежку.

### **Выводы по третьей главе**

Анализ полученных результатов позволил провести оценку влияния изученных ребристых сопротивлений на параметры потока по трассе транзитной части водосливного пролёта плотины. Проведенные лабораторные эксперименты дали возможность увидеть реальный характер движения потока, как на сливной грани плотины, так и в отводящем канале нижнего бьефа. Это позволяет провести более достоверную оценку достоинств и недостатков исследованных элементов сопротивления. Наличие искусственной шероховатости на водосливной грани снижает вторую сопряженную глубину, что может изменить характер гидравлического прыжка из отогнанного прыжка на надвинутый прыжок, при том же удельном расходе.

## ГЛАВА 4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ МОДЕЛИ ВОДОСБРОСНОЙ ПЛОТИНЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМАХ УСИЛЕННОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ

### 4.1 Результаты определения коэффициента расхода модели водосливной плотины

При определении коэффициента расхода в процессе экспериментов было выявлено, что его величина для данной модели не является постоянной. Это было принято во внимание в расчетах. Представленная зависимость расхода от уровня воды в верхнем бьефе (рисунок 3.2) позволила найти зависимость коэффициента расхода модели от расхода (рисунок 4.1) с помощью формулы (2.17).

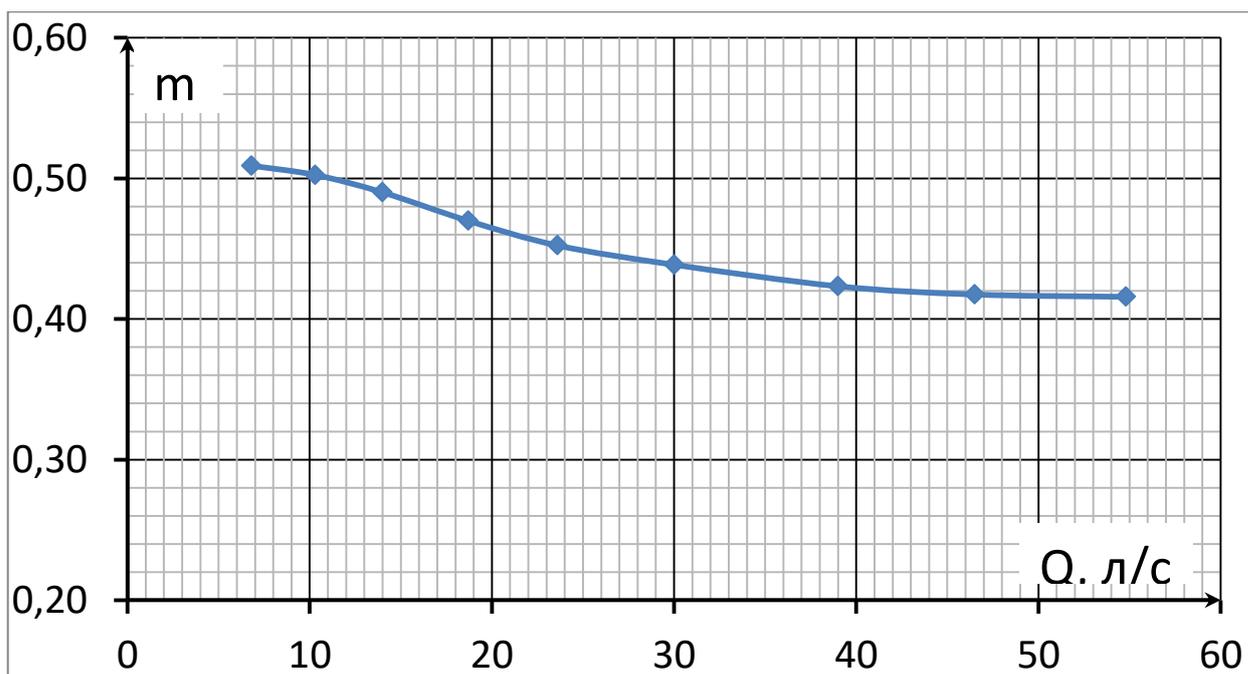


Рис. 4.1. Зависимость коэффициента расхода от подаваемого расхода на экспериментальной модели

На экспериментальной установке во время опытов наблюдалось постепенное уменьшение коэффициента расхода с увеличением напора. Это объясняется геометрией порога водослива (рисунок 4.2).

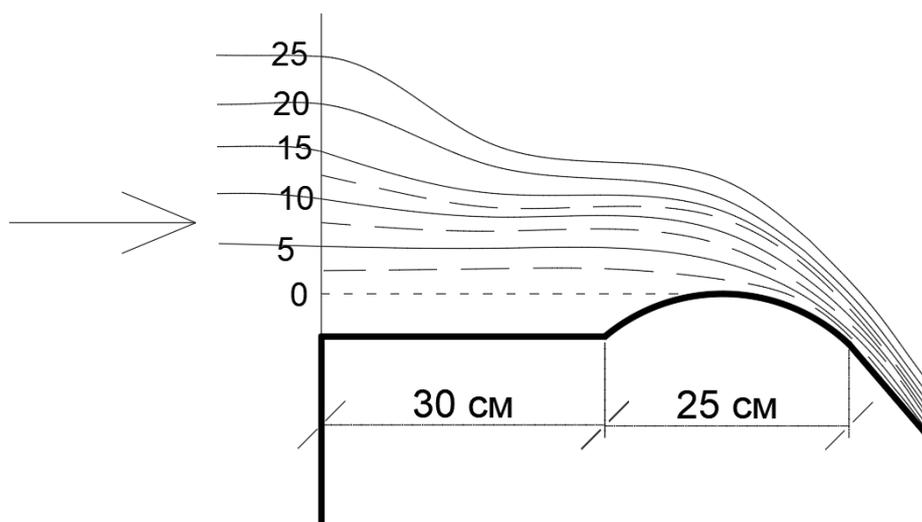


Рисунок 4.2. Кривые свободной поверхности потока при заходе на порог экспериментальной модели

Кривые свободной поверхности потока на пороге при разных напорах подтверждают, что закругленная часть, устроенная в конце порога для обеспечения безвакуумного истечения, сильно влияет на маленькие значения пропускаемых расходов, чем на большие, вызывая, таким образом уменьшение коэффициента расхода с ростом напора.

#### 4.2 Сравнительный анализ эффективности диссипативного эффекта исследуемых видов шероховатости

Выбор наилучшей формы шероховатости, с точки зрения её роли как фактора сопротивления, производился исходя из анализа параметров потока. Основные параметры, на которые обращалось внимание – это характер потока и его влияние на общую картину сопряжения бьефов.

Аэрация, которая больше всего наблюдается у зигзагообразных шероховатостей и у брусков в разбежку, сопровождается проникновением воздуха, что снижает риски возникновения кавитации.

Влияние искусственной шероховатости на сопряжение бьефом оценивалось по эпюрам скоростей, по удельной энергии выбранного сечения в нижнем бьефе,

а также по экспериментальному определению второй сопряженной глубины путем создания подпора до образования гидравлического прыжка в предельном положении. Для представления интегральной оценки эффективности исследованных шероховатостей, выполнялся анализ приведённых на рисунке 4.3 полученных эпюр местных скоростей в середине поперечного створа D.

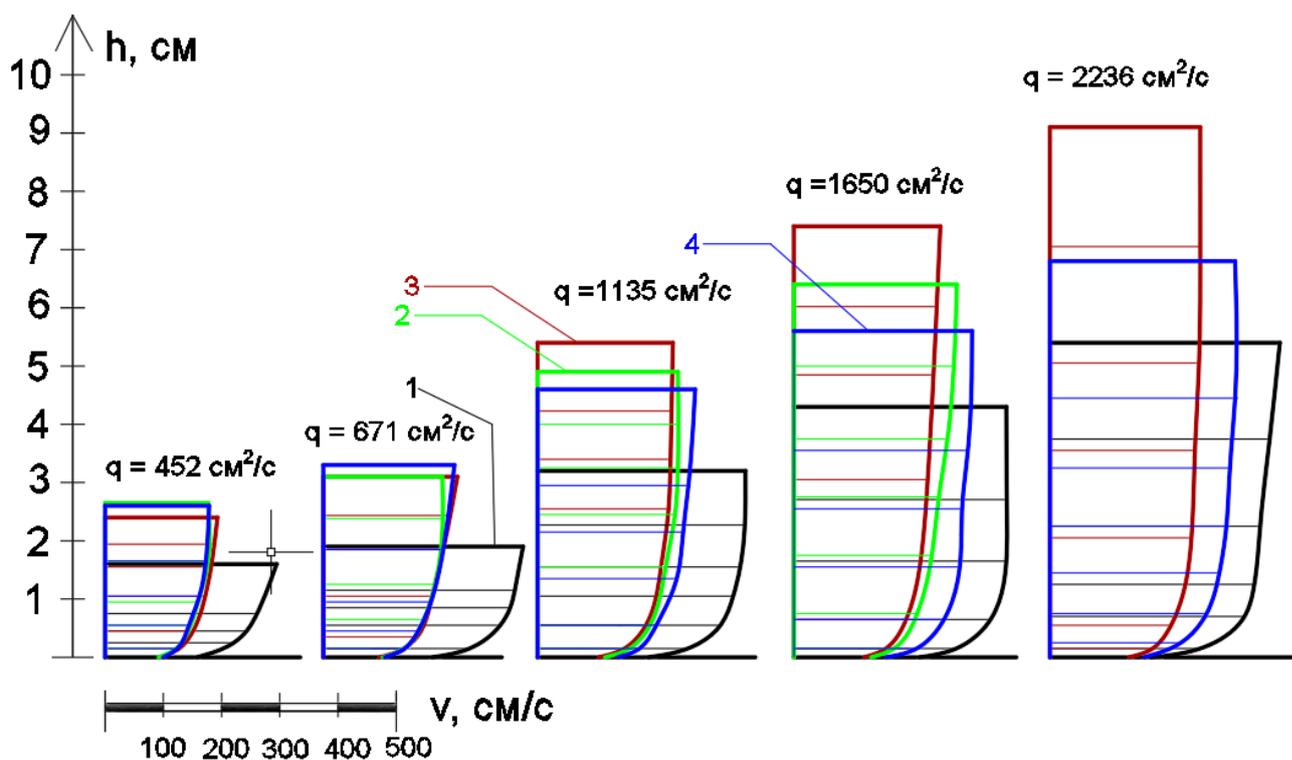


Рисунок 4.3 – Эпюры скоростей в центральном продольном сечении «с» и поперечном створе «D»: 1 – гладкая грань, 2 – бруски в разбежку, 3 – двойной зигзаг, 4 – нормальные бруски

Самые большие значения скоростей наблюдаются при гладкой поверхности низовой грани водосливного пролёта, затем - при нормальных брусках. Наименьшие скорости получились на водоскате при устройстве двойного зигзага, а затем - брусков в разбежку. Явно прослеживается уменьшение скорости потока за счет применения искусственной шероховатости, которое сопровождается увеличением глубины потока  $h$  в отводящем канале. Результаты, полученные с учётом закона сохранения энергии, сведены в таблицу 4.1 и приведены на рисунке 4.4.

Таблица 4.1 – Определение удельной энергии потока в створе «D»

Напор H, см	Полная удельная энергия E <sub>0</sub> , см	Коэф. боко- вого сжа- тия ε	Коэф. Расхода, m	Расход Q, л/с	Глуби- на h <sub>ср.</sub> , см	Ско- рость V <sub>ср.</sub> , см/с	Скоро- -стной напор h <sub>v</sub> , см	Удельна я энергия сечения E, см	E <sub>0</sub> – E, см
<b>Поперечный створ С - Гладкая грань</b>									
7,5	77,5	0,984	0,505	9,40	1,52	297,32	45,05	46,57	30,93
10	80	0,981	0,488	13,95	2,01	333,67	56,75	58,76	21,24
15	85	0,975	0,452	23,60	3,15	360,20	66,13	69,28	15,72
20	90	0,971	0,429	34,33	4,18	394,85	79,46	83,64	6,36
25	95	0,967	0,417	46,50	5,50	406,47	84,21	89,71	5,29
<b>Поперечный створ С - Двойной зигзаг</b>									
7,5	77,5	0,984	0,505	9,40	2,43	185,98	17,63	20,06	57,44
10	80	0,981	0,488	13,95	3,30	203,23	21,05	24,35	55,65
15	85	0,975	0,452	23,60	5,50	206,29	21,69	27,19	57,81
20	90	0,971	0,429	34,33	7,42	222,44	25,22	32,64	57,36
25	95	0,967	0,417	46,50	9,08	246,21	30,90	39,98	55,02
<b>Поперечный створ D - Гладкая грань</b>									
7,5	77,5	0,984	0,505	9,40	1,69	267,41	36,45	38,14	39,36
10	80	0,981	0,488	13,95	2,20	304,85	47,37	49,57	30,43
15	85	0,975	0,452	23,60	3,40	333,71	56,76	60,16	24,84
20	90	0,971	0,429	34,33	4,49	367,59	68,87	73,36	16,64
25	95	0,967	0,417	46,50	5,70	392,21	78,40	84,10	10,90
<b>Поперечный створ D - Двойной зигзаг</b>									
7,5	77,5	0,984	0,505	9,40	2,52	179,33	16,39	18,91	58,59
10	80	0,981	0,488	13,95	3,38	198,42	20,07	23,45	56,55
15	85	0,975	0,452	23,60	5,59	202,97	21,00	26,59	58,41
20	90	0,971	0,429	34,33	7,35	224,56	25,70	33,05	56,95
25	95	0,967	0,417	46,50	9,10	245,67	30,76	39,86	55,14
<b>Поперечный створ D - бруски в разбежку</b>									
7,5	77,5	0,984	0,505	9,40	2,52	179,33	16,39	18,91	58,59
10	80	0,981	0,488	13,95	3,10	216,35	23,86	26,96	53,04
15	85	0,975	0,452	23,60	4,98	227,83	26,46	31,44	53,56
20	90	0,971	0,429	34,33	6,42	257,08	33,69	40,11	49,89
25	95	0,967	0,417	46,50	7,80	286,61	41,87	49,67	45,33
<b>Поперечный створ D - Нормальные бруски</b>									
7,5	77,5	0,984	0,505	9,40	2,54	177,92	16,13	18,67	58,83
10	80	0,981	0,488	13,95	3,26	205,73	21,57	24,83	55,17
15	85	0,975	0,452	23,60	4,80	236,38	28,48	33,28	51,72
20	90	0,971	0,429	34,33	5,80	284,57	41,27	47,07	42,93
25	95	0,967	0,417	46,50	7,02	318,46	51,69	58,71	36,29

Избыточная энергия водного потока, погашенная за счет применения искусственной шероховатости, оценивалась по разнице между удельной энергией в сечения при данной шероховатости и удельной энергией в сечении при гладкой поверхности (рис. 4.4).

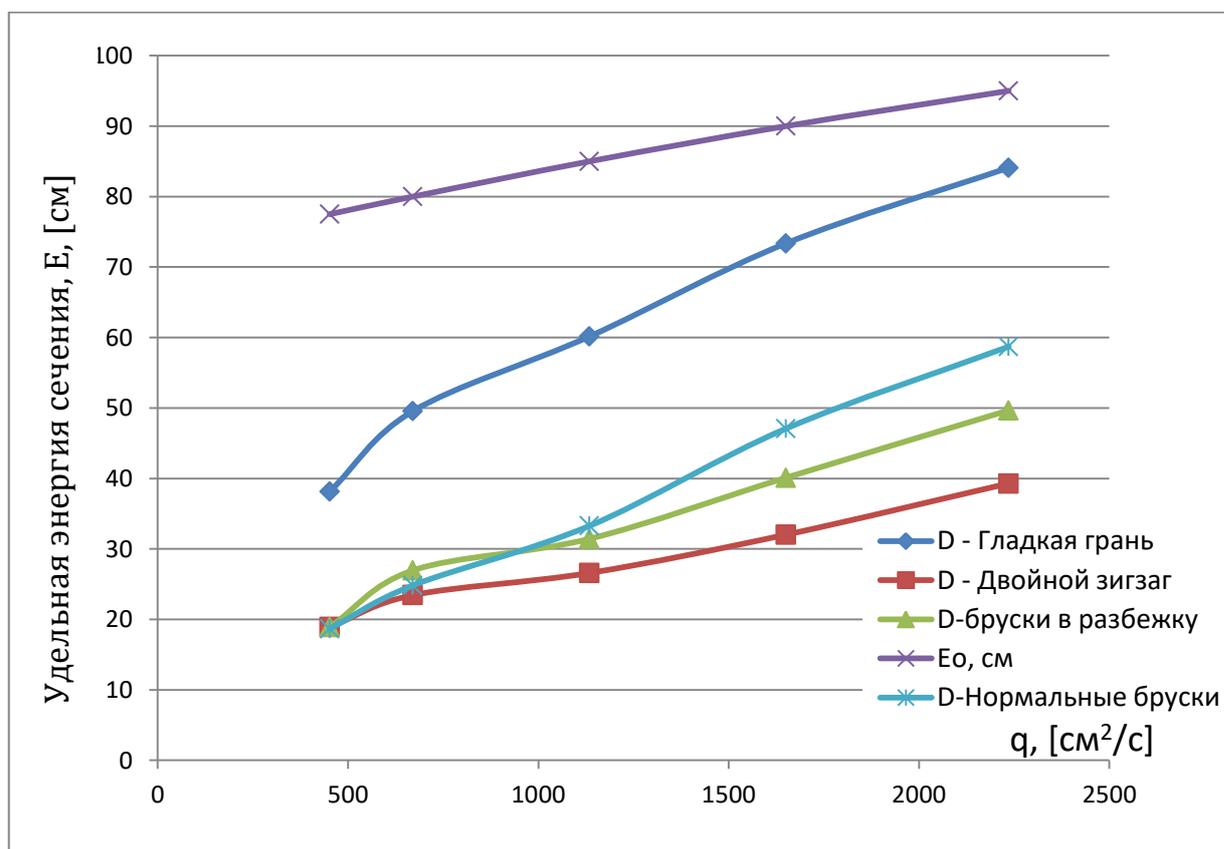


Рисунок 4.4 – Кривые изменения удельной энергии потока в сечении поперечного створа D при разных удельных расходах

Влияние погашенной энергии потока на сливной грани на сопряжение бьефов оценивалось созданием подпора в нижнем бьефе, таким образом, чтобы образовался гидравлический прыжок с началом в предельном положении. В этом случае, бытовая глубина равняется второй сопряженной глубине (рисунок 4.5).

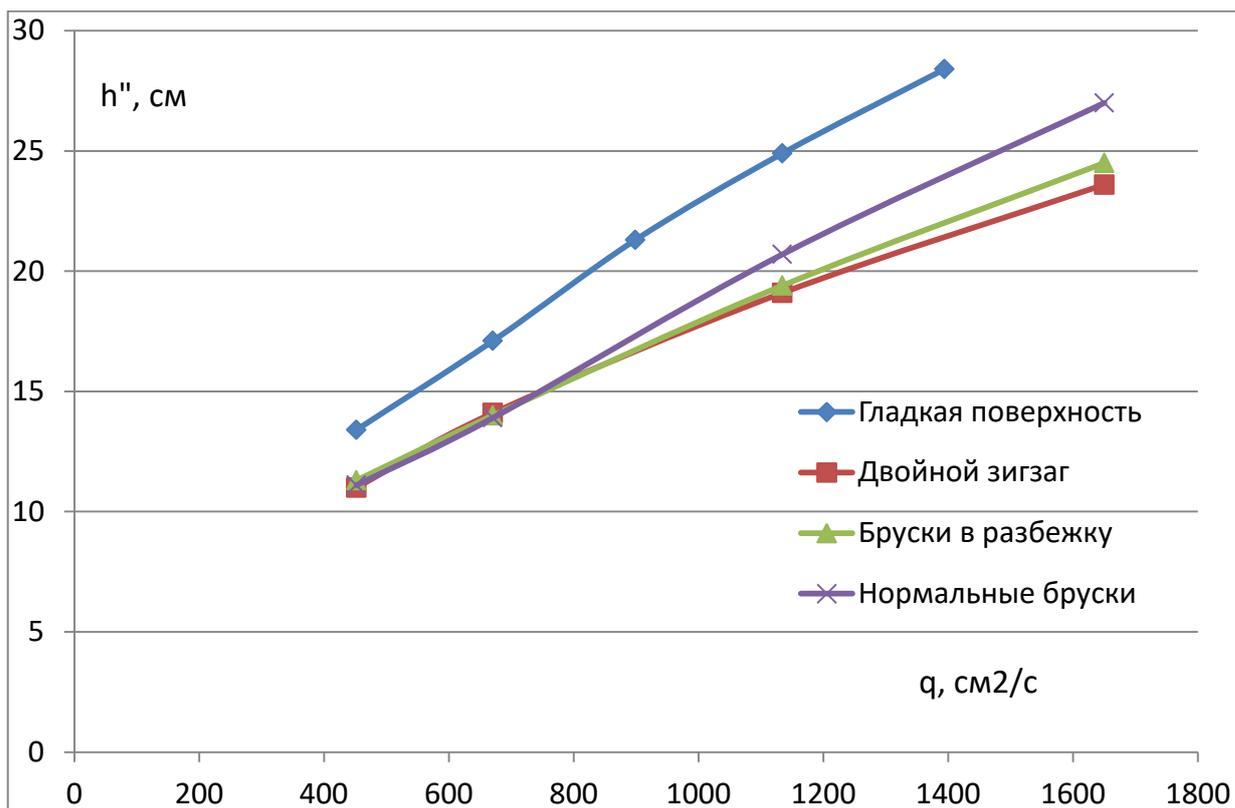


Рисунок 4.5 – Зависимость второй сопряженной глубины от удельного расхода водосливного пролёта при установке разных типов усиленной искусственной шероховатости на водоскате

Использование искусственной шероховатости на водосливной грани приводит к уменьшению второй сопряженной глубины гидравлического прыжка. Это означает изменение характера гидравлического прыжка, который может переформироваться с отогнанного на надвинутый при одной и той же глубине воды в отводящем канале [93], что свидетельствует о более эффективной работе ребристых элементов сопротивления при установке их в качестве гасителей на водосливной грани водосбросной плотины.

### 4.3 Сравнительная оценка гидравлического сопротивления шероховатой сливной поверхности

Для сравнения результатов и выбора наиболее эффективной формы шероховатости определяем коэффициент потерь избыточной энергии по длине

водосброса (формула 1.19). Для этого был выбран поперечный створ D. Результаты расчёта коэффициента «к» сведены в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Определение коэффициента потерь энергии по длине водосброса до поперечного створа D

Напор H, см	Полная удельная энергия E <sub>0</sub> , см	Удельная энергия сечение E, см	E <sub>0</sub> – E, см	$k = \frac{E_0 - E}{E_0}$
<b>Гладкая грань</b>				
7,5	77,5	38,14	39,36	0,51
10	80	49,57	30,43	0,38
15	85	60,16	24,84	0,29
20	90	73,36	16,64	0,18
25	95	84,10	10,9	0,11
<b>Двойной зигзаг</b>				
7,5	77,5	18,91	58,59	0,76
10	80	23,45	56,55	0,71
15	85	26,59	58,41	0,69
20	90	32,02	57,98	0,64
25	95	39,3	55,7	0,59
<b>Бруски в разбежку</b>				
7,5	77,5	18,91	58,59	0,76
10	80	26,96	53,04	0,66
15	85	31,44	53,56	0,63
20	90	40,11	49,89	0,55
25	95	49,67	45,33	0,48
<b>Нормальные бруски</b>				
7,5	77,5	18,67	58,83	0,76
10	80	24,83	55,17	0,69
15	85	33,28	51,72	0,61
20	90	47,07	42,93	0,48
25	95	58,71	36,29	0,38

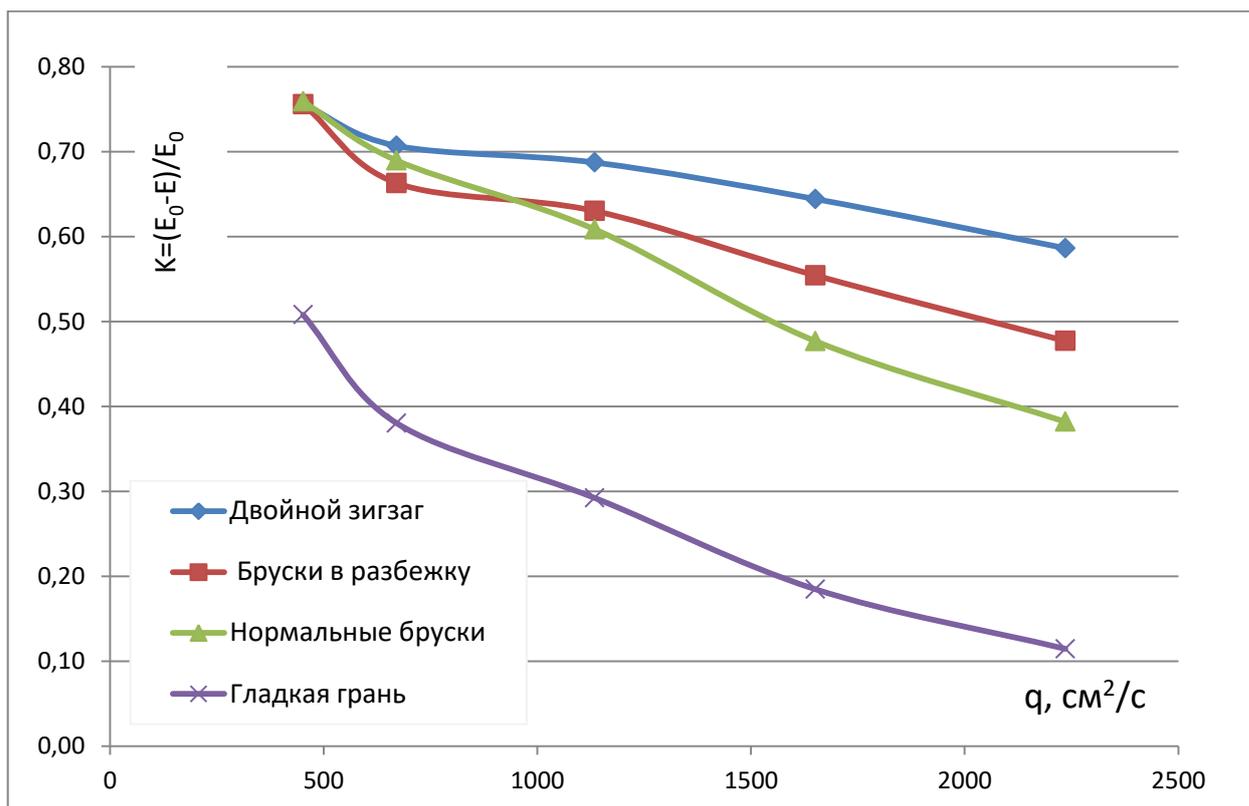


Рисунок 4.6 – Зависимость коэффициента потери избыточной энергии «k» от удельного расхода и типа искусственной шероховатости

Коэффициент потерь избыточной энергии потока по длине водосброса уверенно сохраняет высокие значения при установке двойного зигзага, чем у остальных исследованных сопротивлений.

Коэффициент гашения в виде «k» =  $(E_0 - E)/E_0$  представляет собой общий вид потери избыточной энергии на участке от входного оголовка до рассматриваемого сечения. Для определения дополнительных потерь напора, полученных исключительно благодаря усиленной искусственной шероховатости, следует вычесть коэффициент гашения, полученный при естественной шероховатости. Расчеты были проведены по формуле 4.1 и результаты приведены в таблицу 4.3.

$$k_{\text{ш}} = (k - k_{\text{гладк.}}) \quad (4.1)$$

Где:  $k_{\text{ш}}$  – дополнительные потери избыточной энергии по сравнению с гладкой поверхностью;  $k$  – общие потери напора;  $k_{\text{гладк.}}$  – потери напора при естественной шероховатости водосливной грани.

Таблица 4.3 – Определение эффективности исследованных сопротивлений

Н, см	q, см <sup>2</sup> /с	Гладкая грань	Двойной зигзаг		Бруски разбежку		Нормальные бруски	
		к, [%]	Общий к, [%]	Потери из-за шерохо- ватости, [%]	Общи й к, [%]	Потери из-за шерохо- ватости, [%]	Общий к, [%]	Потери из-за шерохо- ватости , [%]
7,5	452	50,79	75,60	24,81	75,60	24,81	75,90	25,11
10	671	38,04	70,69	32,65	66,30	28,26	68,96	30,92
15	1135	29,22	68,72	39,50	63,02	33,79	60,85	31,63
20	1650	18,49	64,43	45,94	55,44	36,95	46,18	27,70
25	2236	11,47	58,64	47,17	47,72	36,25	38,20	26,73

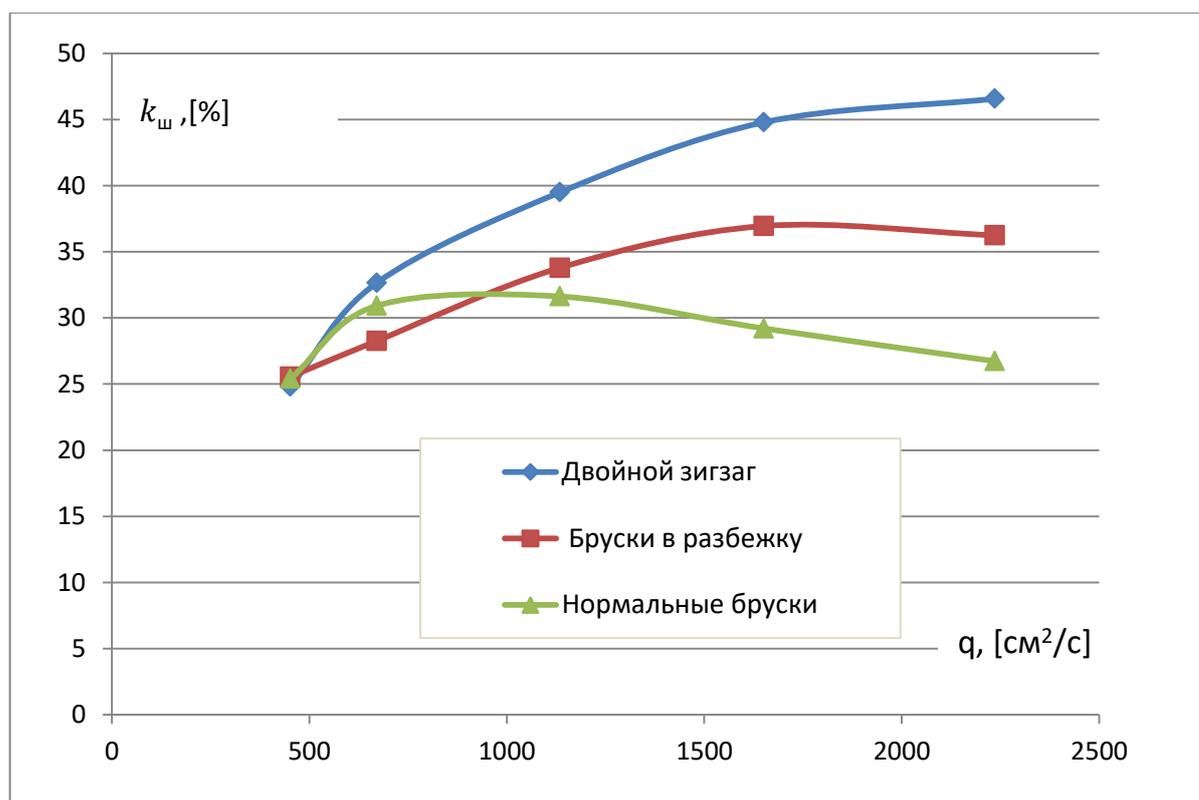


Рисунок 4.7 – Зависимость дополнительных потерь избыточной энергии потока от удельного расхода для разных типов искусственной шероховатости

Установлено, что по аналогии с работой ступенчатого водослива [91], эффективность ребристой искусственной шероховатости зависит от величины

удельного расхода, высоты элементов ребристой шероховатости и от высоты водосливной плотины. Результаты определения безразмерной относительной величины удельного расхода по формуле 1.21 сведены в таблицу 4.4.

Сохраняя принятое в данной диссертационной работе обозначение для высоты выступа шероховатости « $\Delta$ », формула 1.21 примет следующий вид:

$$\bar{q} = \frac{q}{P \cdot \sqrt{g \cdot \Delta}} \quad (4.1)$$

Где:  $P$  – высота водосливной плотины;  $q$  – удельный расход;  $\bar{q}$  – относительный удельный расход;  $\Delta$  – высота ребер искусственной шероховатости которая в данной диссертации была принята равной 1 см во всех лабораторных опытах.

Таблица 4.4 – Определение относительного удельного расхода

Напор $H$ , см	$Q$ , л/с	Ширина пролета $b$ , см	Удельный расход $q$ , см <sup>2</sup> /с	$\Delta$ , см	$\bar{q} = \frac{q}{P \cdot \sqrt{g \cdot \Delta}}$
7,5	9,40	20,8	451,92	1,0	0,21
10	13,95	20,8	670,67	1,0	0,31
15	23,60	20,8	1134,62	1,0	0,52
20	34,33	20,8	1650,48	1,0	0,75
25	46,50	20,8	2235,58	1,0	1,02

Приведение результатов в относительных величинах позволяют более обобщенно оформлять рекомендации по проектированию средне- и низконапорных водосливных плотин с искусственной шероховатостью. На рисунке 4.8 приведено процентное соотношение дополнительных потерь избыточной энергии от относительного удельного расхода. Для наглядности, кривая показателей двойного зигзага была экстраполирована с помощью программного комплекса Microsoft Excel 2010.

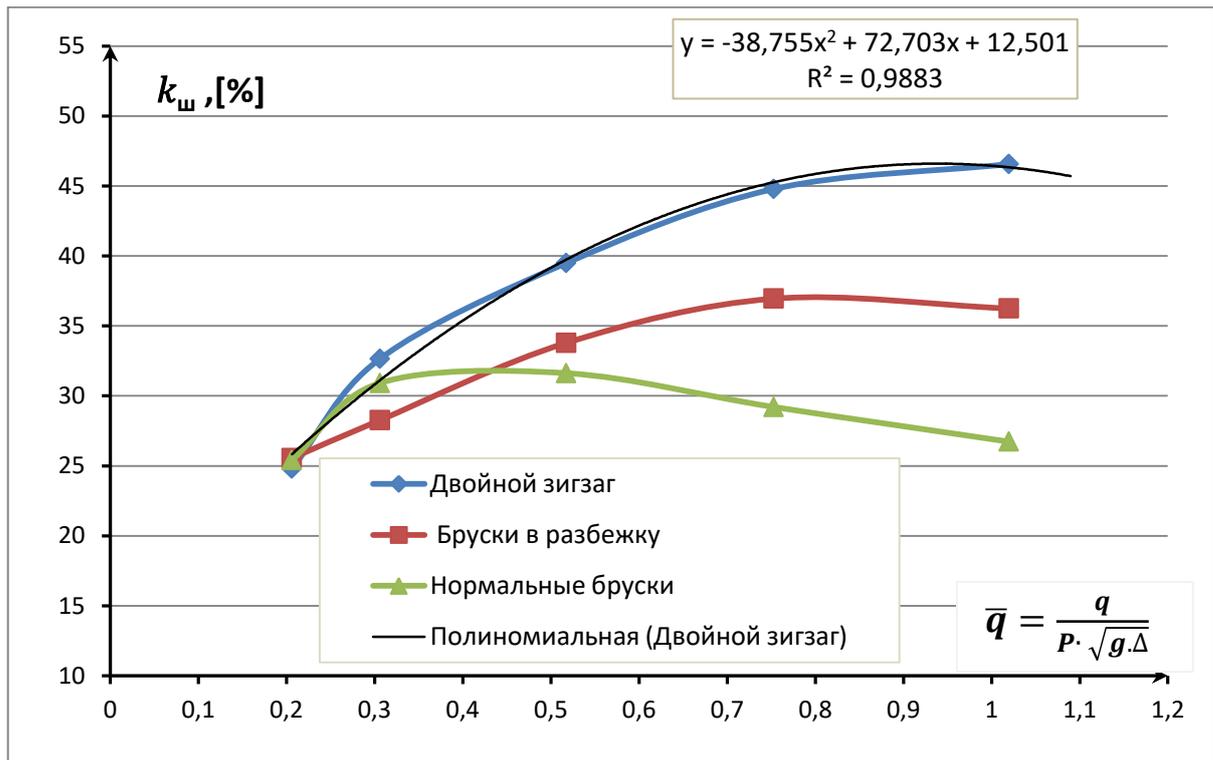


Рисунок 4.8 – Зависимость дополнительных потерь избыточной энергии потока от относительного удельного расхода

Анализ кривых рисунка 4.8 позволяют определить высоту выступа ребристых шероховатостей при заданных размерах водосливной плотины и оптимальные значения пропускных расходов. Это также позволяет определить граничные условия, при которых каждый вид усиленной искусственной шероховатость может дать максимальный эффект.

По этим кривым можно сделать сразу несколько выводов:

- среди исследованных ребристых усиленных шероховатостей установка двойных зигзагов приведёт к наибольшим дополнительным потерям избыточной энергии потока (порядка до 47% от полной удельной энергии потока  $E_0$ ) при  $\bar{q} = 1 \dots 1,1$ ;
- Аппроксимирующее уравнение зависимости дополнительных потерь, создаваемых за счет искусственной шероховатости для двойного зигзага, имеет вид:

$$k_{ш} = -38,755(\bar{q})^2 + 72,703\bar{q} + 12,501 \quad (4.2)$$

- установка брусков в разбежку позволяет дополнительно погасить до 36%...37 % от  $E_0$  при  $\bar{q} = 0,75 \dots 0,9$ ;
- нормальные бруски, наименее эффективные, так как позволяют дополнительно погасить не более 31%...32% при  $\bar{q} = 0,35 \dots 0,55$ ;
- при одной и той же высоте искусственной усиленной шероховатости, нормальные бруски оказались эффективнее, чем бруски в разбежку при  $0,2 < \bar{q} < 0,44$ , и обратный эффект при  $\bar{q} > 0,44$ .

При известных размерах водосливной плотины и проектных расходах, относительный удельный расход  $\bar{q}$  зависит только от высоты выступа элементов шероховатости, поэтому можно сформулировать следующие рекомендации расчета донных ребристых сопротивлений, устанавливаемых на низовые грани водосливных плотин практического профиля:

1. Двойные зигзаги обеспечивают наилучшие результаты при  $\bar{q} = \frac{q}{P \cdot \sqrt{g \cdot \Delta}} = 1 \dots 1,1$ , что дает возможность рекомендовать выбрать оптимальный размер высоты рёбер шероховатости:

$$\Delta = \frac{q^2}{(1 \dots 1,1)^2 \cdot P^2 \cdot g} = \frac{(0,82 \dots 1) \cdot q^2}{P^2 \cdot g}$$

Для упрощения расчетов можно принять

$$\Delta = \frac{0,9 \cdot q^2}{P^2 \cdot g} \quad (4.3)$$

2. Бруски в разбежку показали хорошо себя при  $\bar{q} = 0,75 \dots 0,9$ . Соответственно, оптимальная высота их рёбер может быть найдена по зависимости:

$$\Delta = \frac{q^2}{(0,75 \dots 0,9)^2 \cdot P^2 \cdot g} = \frac{(1,2346 \dots 1,7778) \cdot q^2}{P^2 \cdot g}$$

Для упрощения расчетов можно использовать зависимость:

$$\Delta = \frac{1,45 \cdot q^2}{P^2 \cdot g} \quad (4.4)$$

3. Нормальные бруски работают эффективно при  $\bar{q} = 0,35 \dots 0,6$ .

Соответственно:

$$\Delta = \frac{q^2}{(0,35 \dots 0,6)^2 \cdot P^2 \cdot g} = \frac{(2,77 \dots 8,16) \cdot q^2}{P^2 \cdot g}$$

Для упрощения расчетов и по экономическим соображениям можно рекомендовать принять:

$$\Delta = \frac{3 \cdot q^2}{P^2 \cdot g} \quad (4.5)$$

В качестве примера в таблице 4.5 приведены значения необходимых высот ребристой усиленной шероховатости в натуре для низконапорной плотины (линейный масштаб М1:25) и для средненапорной плотины (линейный масштаб М 1:50) при напоре на модели, равном 20 см.

Таблица 4.5 – Примерное определение высоты шероховатостей  $\Delta$  по формулам 4.2, 4.3 и 4.4

Показатель	Переводные коэффициенты	На модели	Натурные величины	Ожидаемые дополнительные потери избыточной энергии по рисунку 4.8, [в % от $E_0$ ]
1	2	3	4	5
<b>Низконапорная</b>				
линейный масштаб	25			-
Высота плотины P, см	25	70	1750	-
Напор H, см	25	20	500	-
Удельный расход q, см <sup>2</sup> /с	125	1650	206250	-
ускорение свободного падения g, см/с <sup>2</sup>	1	981	981	-
Высота искусственной шероховатости $\Delta$ при выборе двойного зигзага, см	25	0,51	12,75	45 ... 47
Высота искусственной шероховатости $\Delta$ при выборе брусков в разбежку, см	25	0,82	20,5	35...37

Продолжение таблицы 4.5

1	2	3	4	5
Высота искусственной шероховатости $\Delta$ при выборе нормальных брусков, см	25	1,70	42,5	30...32
$E_0$ , см	25	90,0	2250,0	-
<b>Средненапорная</b>				
Линейный масштаб	50			-
Высота плотины $P$ , см	50	70	3500	-
Напор $H$ , см	50	20	1000	-
Удельный расход $q$ , см <sup>2</sup> /с	353,55	1650	583363	-
ускорение свободного падения $g$ , см/с <sup>2</sup>	1	981	981	-
Высота искусственной шероховатости $\Delta$ при выборе двойного зигзага, см	50	0,51	25,5	45 ... 47
Высота искусственной шероховатости $\Delta$ при выборе брусков в разбежку, см	50	0,82	41,1	35...37
Высота искусственной шероховатости $\Delta$ при выборе нормальных брусков, см	50	1,70	84,9	30...32
$E_0$ , см	50	90,0	4500	-

Как видно из таблицы 4.5, нормальные бруски и бруски в разбежку не только требуют большего количества расходных материалов на их изготовление, но и дают при этом низкую эффективность по сравнению с двойным зигзагом. Таким образом, при проектировании средне- и низконапорных водосливных плотин предпочтение следует отдавать устройству двойного зигзага с двумя изломами против течения.

Сопоставление кривых (рисунок 4.8) и фотографий лабораторных испытаний для всех трех изученных шероховатостей дает также возможность сделать вывод о том, что максимальный эффект искусственной шероховатости

наступает в момент перехода потока из аэрированного состояния к неаэрированному течению. Однако, при заданной высоте выступа шероховатости и продолжающемся росте удельного расхода, наступает время, когда влияние шероховатости сильно уменьшается.

На рисунках 4.9, 4.10 и 4.11 представлены фотографии лабораторных опытов, с помощью которых визуально заметно, что область максимального влияния каждого вида шероховатости соответствует переходному интервалу от аэрированной живой площади в неаэрированное течение на низовой водосливной грани плотины.



Рисунок 4.9 – Влияние изменения относительного удельного расхода  $\bar{q} = \frac{q}{P \cdot \sqrt{g \cdot \Delta}}$  на режим течения при установке нормальных брусков на низовой водосливной грани: а – 0,21; б - 0,31; в – 0,52; г – 0,75

Максимальная эффективность у нормальных брусков достигался при  $\bar{q} = 0,35 \dots 0,6$ . На рисунке 4.9б видно как точка начала аэрации начинает опускаться вниз по течению при  $\bar{q} = 0,31$  для шероховатостей в виде нормальных брусков.



а)  $\bar{q} = \frac{q}{P \cdot \sqrt{g\Delta}} = 0,21$

б)  $\bar{q} = 0,31$

в)  $\bar{q} = 0,75$

г)  $\bar{q} = 0,91$

Рисунок 4.10 – Бруски в разбежку. Изменение режима течения



а)  $\bar{q} = \frac{q}{P \cdot \sqrt{g\Delta}} = 0,31$

б)  $\bar{q} = 0,52$

в)  $\bar{q} = 0,75$

г)  $\bar{q} = 1,02$

Рисунок 4.11 – Двойной зигзаг. Изменение режима течения

Рисунки 4.8 – 4.11 подтверждают, что максимальное сопротивление искусственной шероховатости наступает в момент, когда истечение через все ряды сопротивления происходит без заметной аэрации.

Безразмерные показатели наиболее обобщенно описывают влияние одного показателя на другой. Для оценки эффективности искусственной шероховатости на снижении второй сопряженной глубины, переведем данные графика 4.5 в относительных величинах (рис.4.12). Для удобной оценки изменения второй сопряженной глубины вследствие применения искусственной шероховатости, принимаем за относительную вторую сопряженную глубину величину  $\bar{h}''$  и определяем ее как соотношение:

$$\bar{h}'' = \frac{h''_{\text{ш}}}{h''_{\text{глад.}}} \quad (4.6)$$

где  $h''_{\text{ш}}$  – вторая сопряженная глубина при шероховатой водосливной грани,  $h''_{\text{глад.}}$  – вторая сопряженная глубина при гладкой сливной грани.

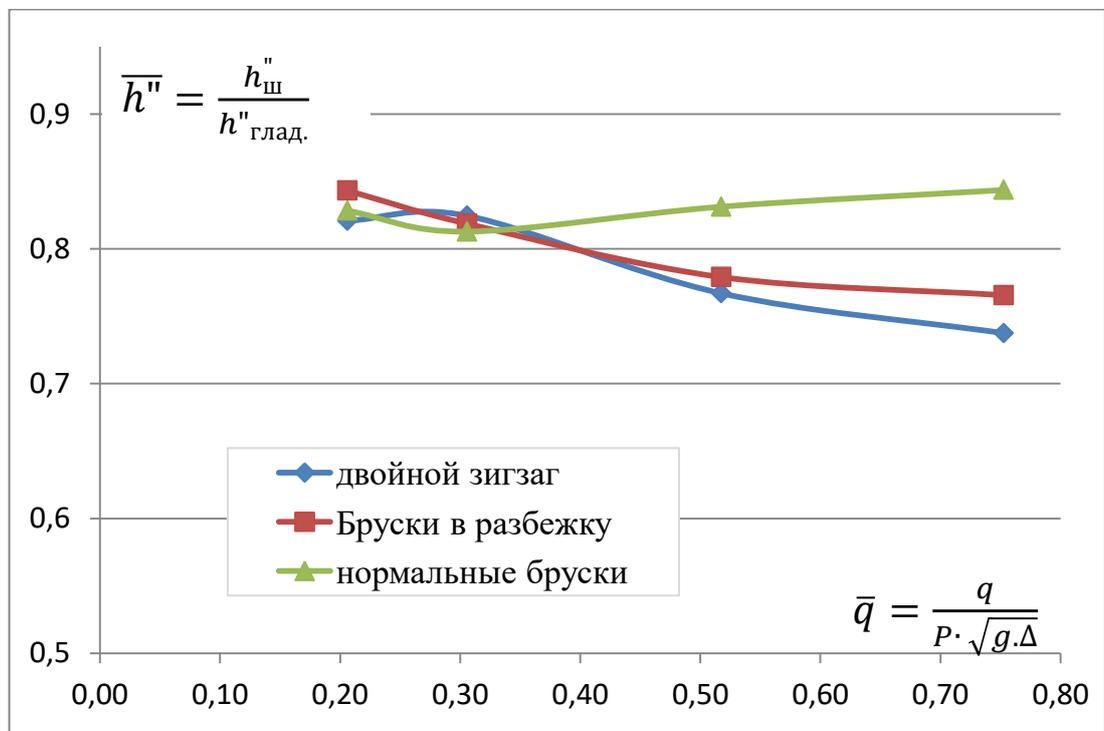


Рисунок 4.12 – Зависимость относительной второй сопряженной глубины от типа искусственной шероховатости.

Аналогично, средние скорости в створе D можно описать в относительных величинах как:

$$\bar{V} = \frac{V_{\text{ш}}}{V_{\text{гладк.}}}, \quad (4.7)$$

Где  $V_{\text{ш}}$  – средняя скорость в створе D при шероховатой водосливной грани;  
 $V_{\text{гладк.}}$  – средняя скорость в створе D при гладкой водосливной грани.

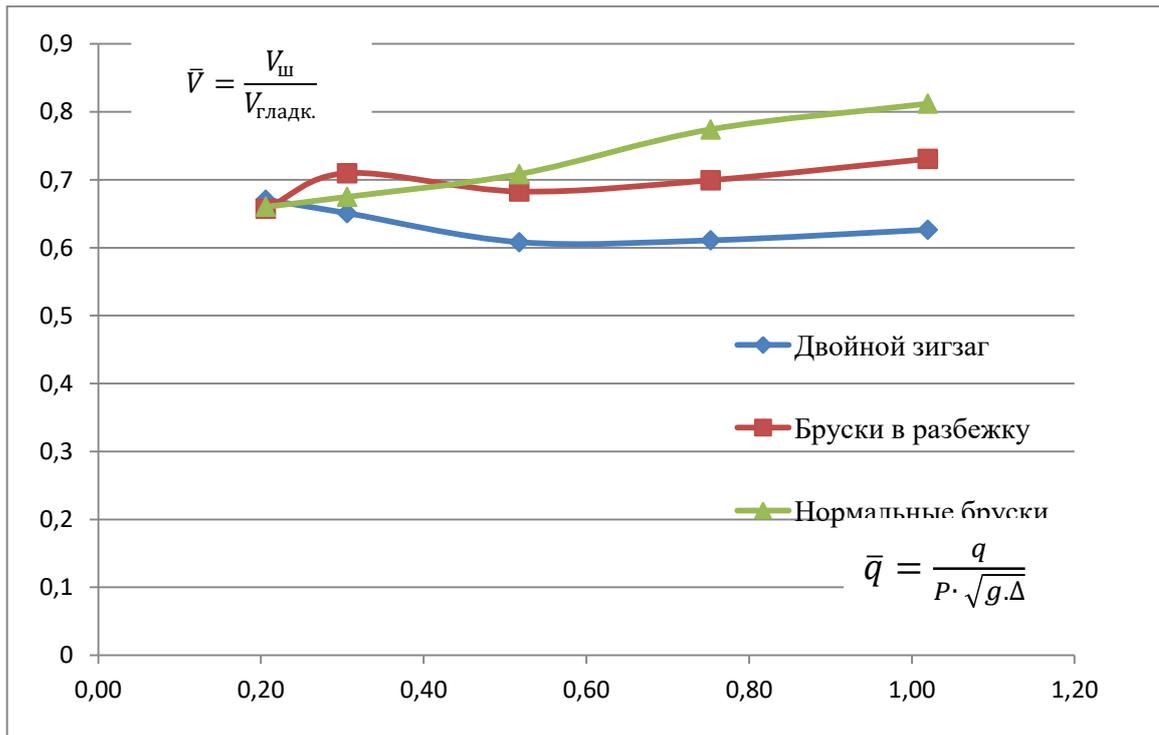


Рисунок 4.13 – Зависимость относительной скорости в поперечном створе D от типа искусственной шероховатости

Ребристая искусственная шероховатость представляет собой систему местных сопротивлений, в которую складываются внезапные расширения и сжатия потока по течению, более энергоемкие, чем обычное трение жидкости.[5] Наибольшая эффективность ребер шероховатости зигзагообразного типа объясняется соударением поверхностных и донных струй между собой и с боковыми стенками (рис. 4.14).

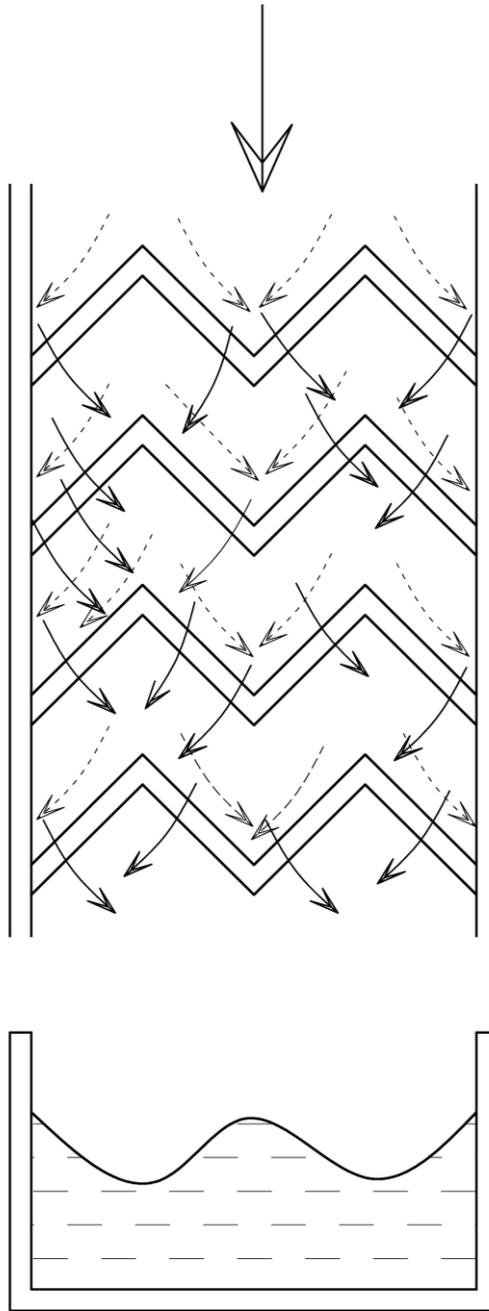


Рисунок 4.14 – Соударение поверхностных и донных струй между собой и с боковыми стенками

## Выводы по четвертой главе

Анализ результатов исследований, представленных на рисунках 4.3 – 4.8, позволил выяснить степень эффективности каждого типа из исследованных элементов сопротивления. Следует выделить шероховатость в виде двойного зигзага как наиболее перспективный вид искусственной шероховатости, применение которого приводит к гашению значительной части избыточной энергии потока на водосливной грани, снижая, таким образом, вторую сопряженную глубину.

На основе анализа кривых рисунка 4.8 был сделан обобщенный и количественный анализ влияния работы всех исследованных ребристых шероховатостей, что позволило предлагать новую методику расчета ребристых шероховатостей низовой грани средне- и низконапорных водосливных плотин.

По сравнению с потерями при гладкой поверхности, искусственная шероховатость в виде двойного зигзага позволила создавать дополнительные потери избыточной энергии в размере до 47% от  $E_0$ , а бруски в разбежку и нормальные бруски до 37% и 32% соответственно.

Так как гашение энергии происходит непосредственно на водоскате, искусственные шероховатости существенно снижают гидродинамическую нагрузку, создаваемую потоком начальной части водобоя.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В данной диссертационной работе представлены результаты лабораторных гидравлических исследований, направленных на изучение влияния усиленной шероховатости низовой грани средне- и низконапорных плотин. Обзор работ, посвященных изучению существующих методов гашения избыточной энергии потока на разных участках транзитного тракта водопропускных сооружений, позволил оценить современное состояние вопроса гашения энергии потока в целом и подтвердил актуальность вопросов гашения кинетической энергии, особенно для создания желательных режимов на водоскатах и на отводящем участке нижнего бьефа низко- и средненапорных плотин, в частности путем усиления искусственной шероховатости и всех факторов, могущих существенно влиять на формирование сопротивлений.

2. Несмотря на то, что имеется целый ряд изученных видов элементов сопротивления, большинство исследований, посвященных изучению роли искусственной шероховатости как фактора сопротивления, были проведены на быстротоках или на водобоях с относительно малыми уклонами. Вопрос применения искусственной шероховатости непосредственно на низовой сливной грани оставался недостаточно исследованным. Полученные картины течения и эпюры скоростей позволили оценивать снижение кинематических параметров потока при применении искусственной шероховатости разных типов.

3. По сравнению с потерями при гладкой поверхности, искусственная шероховатость создает дополнительные потери избыточной кинетической энергии потока. Двойные зигзаги, установленные на водоскате, смогли погасить до 47% от общей потенциальной энергии, а бруски в разбежку и нормальные бруски соответственно до 37% и 32%. Это позволяет существенно снизить гидродинамическую нагрузку на водобойном участке и в дальнейшем понизить уровень вибрации на территории, прилегающей к нижнему бьефу таких гидроузлов.

4. Результаты модельных исследований позволили определить граничные условия для применения исследованных вариантов усиленной искусственной шероховатости, и доказать уровень эффективности каждого из них. Наилучшие показатели выявлены при установке рёбер сопротивлений в виде двойного зигзага.

5. В работе представлены рекомендации и расчётные зависимости для определения габаритов, конструктивных и гидравлических характеристиках искусственной шероховатости в виде двойного зигзага, брусков в разбежку, нормальных брусков при установке их на водоскате значительной крутизны для водопропускных сооружений разного назначения. Для наилучшей эффективности гашения избыточной энергии водного потока при уклоне водоската в расширенных пределах, встречающихся в гидротехнической практике (от 0,05 до 0,76), рекомендовано применить двойные зигзаги, интенсивность работы которых подтверждена опытным обоснованием и анализом кинематической структуры потока.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на совершенствование конструкций и методов расчёта усиленной шероховатости разной типологии, устанавливаемой на водосливной грани низко- и средненапорных плотин, а также методологии оценки гидродинамических воздействий и нагрузок на элементы низовой грани плотин с негладкой поверхностью.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдельрахман, А.А. Гидравлические сопротивления в руслах с высокой шероховатостью: диссертация кандидата технических наук / А.А. Абдельрахман. – М., 1993. – 131 с.
2. Абилов, Р.С. Гашение энергии сбросного потока в нижнем бьефе водосбросных сооружений плотинных гидроузлов / Р.С. Абилов // Точная наука. – 2017. - №11. – С.18-51.
3. Агроскин, И.И. Гидравлика / И.И. Агроскин, Г.Т. Дмитриев, Ф.И. Пикалов. – М.Л.: Издательство «Энергия». – 1964. – 352 с.
4. Адигамов, Р.Т. Совершенствование конструкций, методов гидравлических исследований и расчетов быстротоков с искусственной шероховатостью: дисс. канд. техн. наук / Адигамов Рустам Талгатович. – М., 1991. – 200 с.
5. Айвазян, О. М. Основы гидравлики бурных потоков / О. М. Айвазян. – М. Ижевск: Институт компьютерных исследований, НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2010. – 266 с.
6. Айвазян, О.М. Новый метод гидравлического расчёта быстротоков с усиленной шероховатостью / О.М. Айвазян // В сб. Гидравлика, использование водной энергии, т. 52. М.: МГМИ, 1977. – С.100 - 114.
7. Айвазян, О.М. О применении усиленной шероховатости для предотвращения волнообразования на быстротоках / О.М. Айвазян // Гидротехника и мелиорация. – 1968. – №4 . – С.79-84.
8. Айвазян, О.М. Универсальные координаты для обработки опытных данных по гидравлическому сопротивлению открытых потоков / О.М. Айвазян // В сб. Гидравлика, использование водной энергии. М.: МГМИ, 1975. – С.3 - 11.
9. Альтшуль, А.Д. Примеры расчетов по гидравлике / А. Д. Альтшуль. – М.: Стройиздат, 1982. – 255 с.

10. Арефьев, Н.В. Общий размыв и понижение уровня воды в нижнем бьефе водохранилищных гидроузлов / Н.В. Арефьев, М.А. Михалев, О.С. Скворцова // Природообустройство. – 2008. - № 1. - С.83-87.
11. Аубакирова, Ф. Х. Гашение избыточной энергии потока в водосбросных сооружениях при различных режимах сопряжения бьефов / Ф. Х. Аубакирова // Природообустройство. – 2015. – № 1. – С. 37-41.
12. Бакштанин, А.М. Гидравлическое обоснование методов расчета водобойных колодцев с боковым отводом потока. Дис. кандидат технических наук: 05.23.07 / Бакштанин Александр Михайлович. – М. - 2006. - 154 с.
13. Батук, Б.О. Гидравлика / Б. О. Батук. – М.: Высшая школа, 1962.– 450 с.
14. Беглярова, Э.С. Экспериментальные исследования затопленного гидравлического прыжка в непризматическом русле прямоугольного сечения при гладком горизонтальном дне / Э.С. Беглярова и др. // Природообустройство. – 2018. – № 3. – С.51-58.
15. Беяшевский, Н.Н. Расчеты нижнего бьефа за водосбросными сооружениями на нескальных основаниях / Н. Н. Беяшевский, Н. Г. Пивовар, И.И. Калантыренко. – Киев: Наук. думка, 1972. – 290 с.
16. Бендат, Дж. Измерение и анализ случайных процессов / Дж. Бендат, А. Пирсол // Пер. с англ. – М.: Мир, 1974. – 408 с.
17. Бендат, Дж. Применения корреляционного и спектрального анализа / Дж. Бендат, А. Пирсол // Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 312 с.
18. Богомоллов, А.И. Гидравлика / А.И. Богомоллов, К.А. Михайлов. М.: Издательство литературы по строительству, 1965. – С. 632.
19. Богославчик, П.М. Проектирование и расчеты гидротехнических сооружений: учеб. Пособие / П. М. Богославчик, Г.Г. Круглов. Минск.: «Вышэйшая школа», 2018.– 366 с.

20. Васильева, Н. В. Гидравлика. Гидравлические расчеты открытых потоков и сооружений : учебно-методическое пособие / Н. В. Васильева, Л. И. Мельникова. – Горки. : БГСХА, 2022. – 161 с. ISBN 978-985-882-167-8.
21. Векслер, А.Б. Гидравлические расчёты водосбросных гидротехнических сооружений: Справочное пособие / А.Б. Векслер.– М.: Энергоатомиздат, 1988. – 624 с.
22. Волков, В. И. Открытые береговые водосбросы. Учебник для вузов / В.И. Волков и другие. – М.: МГУП, 2012. – 244 с.
23. Волков, В.И. Лабораторные исследования открытых водосбросов / В.И. Волков, В.И. Алтунин, О.Н. Черных. М.: ФГБОУ ВПО МГУП, 2013. – 150 с.
24. Волченкова, Г.Я. Пособие по гидравлическим расчетам малых водопропускных сооружений / Г.Я. Волченкова. - М.: «ТРАНСПОРТ», 1992. – 408 с.
25. Гидротехнические сооружения. Справочник проектировщика / ГВ. Железняков и др. под ред. В. П. Недриги. – М.: Стройиздат, 1983. – 543 с.
26. Гиргидов, А.Д. Гидравлика. Механика. Энергетика: избранные труды / А. Д. Гиргидов. - Санкт-Петербург.: Издательство Политехнического университета, 2014. – 458 с.
27. Гришин, М.М. Гидротехнические сооружения / М. М. Гришин. – М.: Госстройиздат, 1962. – 763 с.
28. Гурьев, А.П. Влияние формы струи при ее отбросе носком трамплином высокопорогового водосброса на формирование ямы размыва в нижнем бьефе / А.П. Гурьев, Д.В. Козлов, Н.В. Ханов, А.С. Елистратов // Природообустройство. – 2010. – № 5. – С.37-41.
29. Гурьев, А.П. Модельные гидравлические исследования водосброса №2 Богучанской ГЭС с отбросом струи с длинными разделительными стенками / А.П. Гурьев, И.С. Румянцев, Д.В. Козлов, Н.В. Ханов и др. // Приволжский научный журнал. – 2009. – № 1. – С. 57-65.

30. Гусев, А.А. Основы гидравлики: учебник для СПО / А. А. Гусев. – М.: Юрайт, – 2015. – 285 с.
31. Ершов, К.С. Гидравлическое обоснование методов прогноза пропускной способности высокопороговых водосбросов с горизонтальной вставкой на гребне. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук: 05.23.07 / Ершов Константин Сергеевич. – Москва, 2011. - 161 с.
32. Зуйков, А. Л. Гидравлика в двух томах. Том 1. Основы механики жидкости: учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 270800 "Строительство": в 2 т. / А. Л. Зуйков. – М.: "Московский гос. строит. ун-т", 2014. – 515 с.
33. Иванова, Е.Э. Сравнение конструкций крепления концевой части водосброса / Е.Э. Иванова // Вестник наука и образования северо-запада России. – 2020. – Т.6. - № 4. – С. 1-6.
34. Ивойлов, А. А. Результаты исследования моделируемости пульсации давления на дно нижнего бьефа водосбросного сооружения / А. А. Ивойлов // Труды координационного совещания по гидротехнике. 1970. - №54. – С. 47-52.
35. Кавешников, Н.Т. Устройства нижнего бьефа водосбросов / Н.Т. Кавешников и др.; под ред. Н.П. Розанова.– М.: Колос, 1984. – 269 с.
36. Каньяругендо, Л. Оценка влияния зигзагообразной шероховатости на кинематические параметры потока / Л. Каньяругендо // Природообустройство. - 2023. - №3. - С. 85-91.
37. Киселёв, П.Г. Справочник по гидравлическим расчётам / П.Г. Киселёв и др. – М.: ЭКОЛИТ, 2011. – 312 с.
38. Корольков, А.И. Научно технический отчет «Проведение гидравлических исследований водосброса №2 Богучанской ГЭС в периоде пропуска строительных расходов. Плотина бетонная. Водосброс №2. Секции №20...22. Сопряжение с НБ» / А.И. Корольков, А.П. Гурьев, Н.В. Ханов. –М.: МГУП, 2008. – С.267.

39. Косиченко, Ю.М. Определение параметров шероховатости в призматических руслах при неравномерном движении жидкости / Ю.М. Косиченко, А. В. Самойленко // Мелиорация антропогенных ландшафтов. - 2001 – С. 129-134.
40. Кумин, Д. И. Турбулентность и гашение энергии при сопряжении бьефов / Д. И. Кумин. – Л.: Изв.ВНИИГ, 1956. – Т.55. – С. 7 – 36
41. Лабораторные работы по гидротехническим сооружениям: учебное пособие / Н.Т. Кавешникови др. под ред. Н. П. Розанова – М.: Агропромиздат, 1989. – 208 с.
42. Леви, И. И. Моделирование гидравлических явлений / И. И. Леви. – Л.: Энергия, 1957. – 252 с.
43. Лятхер, В.М. Вибрация водосливной плотины Волжской ГЭС им. В.И. Ленина и расположенных на берегу жилых зданий при попуске паводка / В.М. Лятхер, Л.В. Комельков // Безопасность энергетических сооружений. - 2004. - Вып.14. - С.105-125.
44. Лятхер, В.М. Гидравлическое моделирование / В.М. Лятхер, А. М. Прудовский – М.: Энергоатомиздат, 1984. - 352 с.
45. Лятхер, В.М. Динамика сплошных сред в расчётах гидротехнических сооружений / В.М. Лятхер, Яковлев Ю.С. - М.: Энергия, 1976. - 391 с.
46. Лятхер, В.М. Турбулентность в гидросооружениях / В.М. Лятхер. - М.: Энергия, 1968. - 407 с.
47. Маслов, А. Б. Гидродинамическое воздействие потока на гасители энергии и расщепители: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.09 / Маслов Александр Борисович. – М. – 1982. - 210 с.
48. Мвуйекуре, Ж. К. Экспериментальное обоснование параметров гасителей ударного действия трубчатых водовыпусков : дисс. ...канд. техн. наук: 05.23.07 / Мвуйекуре Жан Клод. - Москва, 2016. - 157 с.
49. Мирзоев, М.И. Гидравлические условия работы высокопороговых водосбросных плотин со ступенчатой низовой сливной гранью: автореферат дис.

... кандидата технических наук: 05.23.07 / Моск. гос. ун-т природообустройства / Мирзоев Марат Идрисович. – Москва, 2005. - 29 с.

50. Нань, Ф. Гидравлические исследования ступенчатых водосбросов различных конструкций / Ф. Нань, Д. В. Козлов, И. С. Румянцев // Гидротехническое строительство. – 2015. – № 8. – С. 29-37.

51. Нань, Ф. Основы современного гидротехнического строительства / Ф. Нань, А.Г. Журавлёва, И. С. Румянцев // Монография: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG. Saarbrücken, Germany, 2014. – 124с.

52. Нань, Ф. Совершенствование конструкций и методов расчетного обоснования бетонных водосбросов со ступенями на низовой грани: диссертация кандидата технических наук. Ф. Нань. - Москва, 2015. - 211 с.

53. Петров, Е. Ф. Гаситель энергии ударного действия в концевых частях трубчатых водопропускных сооружений: дис. канд. техн. наук: 05.23.07 / Евгений Федорович Петров. – М., 1990. – 242 с.

54. Пикулин, А. В. Применение искусственной шероховатости в высоконапорных водосбросах. Диссертация кандидата технических наук / Пикулин Александр Васильевич. – М. - 1986. - 254 с.

55. Рассказов, Л. Н. Гидротехническое строительство, Часть 1: учебник для вузов / Л.Н. Рассказов и др. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2008. – 576 с.

56. Рахманов, А.Н. О размерах гидравлического прыжка на сильно шероховатом водобое. / А.Н. Рахманов Известия ВНИИГ им. Веденеева, т. 3., 1963 г.

57. Розанов, Н. П. Гидротехнические сооружения: Учебное пособие / Н. П. Розанов и др. – М.: Агропромиздат, 1985. – 432 с.

58. Розанова, Н. Н. Моделирование работы гидротехнических сооружений: учебное пособие / Н. Н. Розанова. – М.: Изд-во Рос.ун-та дружбы народов, 1998. – 108 с.

59. Рубин, О. Д. Многофакторные исследования гидротехнических сооружений со сроком эксплуатации более 25 лет. Программа многофакторных исследований ГТС. Проведение натурных работ по комплексному обследованию и геодезическим измерениям: учебное пособие / О.Д. Рубин, Н.В. Ханов, С.Е. Лисичкин, А.С. Антонов; Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева. – Москва: РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева, 2022. – 111 с.

60. Румянцев И.С., Бетонные водосливные плотины со ступенчатой низовой гранью / И.С. Румянцев, М.И. Мирзоев // Безопасность энергетических сооружений. 2004. Вып.14. С.146-151.

61. Санжиев, А. Д. Гидродинамическое взаимодействие потока с элементами искусственной шероховатости. Дисс. канд. техн. наук / Санжиев Анатолий Дамдинович. – М., 1984. –199 с.

62. Симак, С.В. Гидрологические аспекты безопасности Жигулевской ГЭС и примыкающих к ней территорий / С.В. Симак, Е.М. Шумакова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2010. - т. 12, №1(9). – С.2255-2260.

63. Слиссский, С. М. Гидравлические расчеты высоконапорных гидротехнических сооружений / С. М. Слиссский. – М.: Энергоатомиздат, 1986. - 304с.

64. Снежко В.Л. Современные способы обработки данных гидравлического эксперимента: Монография/ В.Л. Снежко. - М.: Издательство РГАУ-МСХА, 2015. – 141 с.

65. СП 58.13330.2012. «Гидротехнические сооружения. Основные положения» (актуализированная редакция СНиП 33-01-2003). 2012.

66. Ткачев, А.А. Определение формы движения потока в лотке быстротока Новотроицкого водохранилища при минимальном расходе / А.А. Ткачев, К.Г. Гурин //Экология и водное хозяйство. - 2022. - Т.4. - №3. - С.128-142.

67. Ухин, Б. В. Инженерная гидравлика: Учебное пособие / Б. В. Ухин, Ю.Ф. Мельников; под редакцией Б. В. Ухина. – М.: Издательство АСВ, 2011. – 344 с.
68. Ухин, В.В. Инженерная гидравлика / В.В. Ухин, Ю.Ф. Мельников. – М.: Издательство ассоциации строительных ВУЗов, 2007. – 343 с.
69. Фартуков, В.А. Методы гидравлических исследований гидротехнических сооружений: Учебное пособие / В.А. Фартуков, М.И. Зборовская, Д.А. Алексеев. –М.: Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева, 2022. – 123 с.
70. Ханов, Н. В. Обоснование методов гидравлических расчетов водосбросов с тангенциальными завихрителями: дис. ... докт. техн. наук: 05.23.07, 05.23.16 / Ханов Нартмир Владимирович. – Москва, 1998. – 349 с.
71. Ханов, Н.В. Рекомендации по проектированию и строительству креплений нижнего бьефа трубчатых водовыпусков с гасителями ударного действия / Н.В. Ханов, А.Г. Журавлёва, Мвуйекуре Жан Клод // Природообустройство. - 2017. - №4. - С. 27-34.
72. Черных, О.Н. Методика совершенствования учебного процесса в лабораторном комплексе кафедры гидротехнических сооружений / О.Н. Черных, Н.В. Ханов // Вестник учебно-методического объединения по образованию в области природообустройства и водопользования. – 2017. - №10. - С. 44–52.
73. Черных, О.Н. Оценка гидродинамического воздействия потока на элементы крепления нижнего бьефа мелиоративных сооружений с колодцем заглубленного типа / О.Н. Черных, А.В. Бурлаченко // Природообустройство. – 2022. – № 2. – С. 79-85. DOI:10.26897/1997-6011-2022-2-79-85.
74. Черных, О.Н. Экспериментальные и имитационные методы исследования режимов сопряжения потока в нижнем бьефе природоохранных водосбросных и сопрягающих сооружений АПК / О.Н.Черных, А.В. Бурлаченко// Вестник учебно-методического объединения по образованию в области природообустройства и водопользования. – 2021. - №21. - С. 72– 80.

75. Чоу, В.Г. Гидравлика открытых каналов / В.Г. Чоу. /Пер. с англ. /. - М.: Стройиздат, 1969. - 464 с.
76. Чугаев, Р.Р. Гидротехнические сооружения. Ч.II: Водосливные плотины / Р.Р. Чугаев–М.: Агропромиздат, 1985. – 302с.
77. Штеренлихт, Д.В. Гидравлика: учебник / Д. В. Штеренлихт. –5-е изд. – СПб.: Лань, 2015. – 656 с.
78. Щапов, Н.М. Гидрометрия гидротехнических сооружений и гидромашин / Н.М. Щапов. – Ленинград.: «Госэнергоиздат», 1957. – 237 с.
79. Юрченко, А.Н. Совершенствование конструкций гасящих устройств и оценка их влияния на кинематическую структуру потока за многопролетной водосбросной плотиной: дис.канд. тех. наук: 05.23.07 / Юрченко Александр Николаевич. – Москва, 2000. - 222 с.
80. Akutina, Y. Lateral bed-roughness variation in shallow open-channel flow with very low submergence / Y. Akutina, E. Olivier , Y. Frédéric, M. Rouzes // *Environmental Fluid Mechanics*. 2019. P.1339-1361
81. André, S. Energy dissipation and hydrodynamic forces of aerated flow over macro-roughness linings for overtopped embankment dams / S. André, J.L. Boillat & A.J. Schleiss // *Hydraulics of Dams and River Structures*. 2004. P.189-196.
82. Basco, D.R. Drag forces on baffle blocks in hydraulic jumps / D. R. Basco, J. R. Adams // *Journal of hydraulics Division*. – 1971. – Vol. 97. – № 12. – P. 2023 – 2035.
83. Bathurst, J.C. (1982) Theoretical aspects of flow resistance. In: *Gravel-bed Rivers* (ed. by R. D. Hey, J. C. Bathurst & C. R. Thorne), 83–105. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK.
84. Bradley, J.N. Hydraulic Design of Stilling Basins / J. N. Bradley, A. J.Peterka/ J.N. Bradley // *Journal of A.S.C.E., Hydraulic Engg.* – 1957. – Vol. 83. – № 5. – P. 1401 – 1406.

85. Buckingham, E. Model experiments and the form of empirical equations / E. Buckingham // American Society Mechanical Engineers. – 1915. – Vol. 37. – P. 263 – 296.
86. Burlachenko, A.V. Damping of Increased Turbulence Beyond a Deep and Relatively Short Spillway Basin / A.V. Burlachenko and others // AIP conference proceedings. – 2023. – Volume 2612. – Issue 1. – id.020029. – 7 pp.
87. Chernykh, O.N. Hydrodynamic loads and stability of the lower-pool apron of hydraulic structures / O.N. Chernykh, L.V. Komelkov // Hydrotechnical Construction. - 1983. - Vol. 17(8). – P. 410–416.
88. Chouaib, L. Ecoulement a surface libre sur fond de rugosité inhomogène. Thèse doctorale / L. Chouaib/ Paris. - 2005. - 150p.
89. George, C.C. Equivalent roughness of submerged obstacles in open channel flows / C.C. George // Journal of Hydraulic Engineering. National Technical University of Athens. -Zografou 15780 (GREECE), 2013. p.21. -doi:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000801.
90. Joko, N. Experimental Study of Energy Dissipation at Baffled Chute Spillway / N. Joko, S. Indratmo, A.W. Hadi Soeharno // Jurnal Teknik Sipil.-2019 Vol. 26 №1. –P 33-38.
91. Mashau, S.M. Flow resistance in open channels with intermediate scale roughness / S.M. Mashau. – Johannesburg, 2006. p.66
92. Osman Akan A. Open Channel Hydraulics / A. Osman Akan. – Oxford, 2006. – 384 p.
93. Peterka, A.J. Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators / A.J. Peterka. – Denver: Colorado, U.S. – 2015. – 240 p.
94. Rand, W. An approach to generalized design of stilling basins / W. Rand // Journal of the hydraulics Division. – 1957. – Vol. 20. – № 2. – P. 173 – 191.
95. Rand, W. Flow over a vertical sill in an open channel / W. Rand // Journal of the hydraulics Division. – 1965. – Vol. 91. – № 4. – P. 97 – 122.

96. Rand, W. Flow over dented sill in an open channel / W. Rand // Journal of the hydraulics Division. – 1966. – Vol. 92. – № 5. – P. 135 – 153.
97. Richard, S. Ecoulements au-dessus de macro-rugosités artificielles constituées de plots / S. Richard, J. Chorda et M. Larinier // Bull.Fr. Pêche Piscic. (1999) 353/354: 279-294
98. Schiestel, R. Modélisation et simulation des écoulements turbulents / R. Schiestel, Hermès. – Lavoisier: Wiley-ISTE, 2008. – 768 p.
99. Stefano, P. Flow resistance in large-scale roughness condition / P. Stefano D. Rajib, C. Iacopo // Canadian Journal of Civil Engineering · - 2008. - P.1285-1293.
100. Wang, Z.Q., Secondary flows in open channel with smooth and rough bed strips / Z.Q. Wang, N.S. Cheng , Y.M. Chiew and X.W. Chen // XXX IAHR Congress. - Thessaloniki, Greece, 2003. -№ 1. - p. 111-118.
101. Willi, H.H. Hydraulic Engineering of Dams / H.H. Willi, J. Anton Schleiss, M. Boes Robert Michael Pfister. – London. UK.: Taylor & Francis Group, 2021. - P. 1054. DOI: 10.1201/9780203771433.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А



**ООО НАУЧНО - ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ  
ФИРМА «БЕРЕГ»**

Почт. адрес

360017 КБР, г. Нальчик, ул.

Ватутина, 32а/20

E-mail [05bereg@rambler.ru](mailto:05bereg@rambler.ru)

ИНН 0560028947 КПП 057301001

Р/сч. № 40702810110090000333

Филиал Центрального Банка ВТБ (ПАО) г. Москва

№17/23

20.10.2023г

**СПРАВКА О ВНЕДРЕНИИ В ПРОЕКТНОЕ ДЕЛО РЕЗУЛЬТАТОВ  
ИССЛЕДОВАНИЙ**

Вопросы гашения избыточной энергии в гидротехническое строительство всегда были и остаются актуальными. На практике уже имеется ряд мер по гашению избыточной энергии потока при проектировании плотин разных классов опасности, разработанных для обеспечения в процессе эксплуатации нормативной безопасности.

В исследованиях Каньяругендо Леонидас изучались рациональный выбор компоновки элементов водопропускного тракта и достижение оптимизации гидродинамических и конструктивных параметров водосбросного сооружения. При этом исследовались три вида ребристой искусственной шероховатости в виде донных ребристых зигзагообразных ребер сопротивления. Разработаны рекомендации и способы расчета высоты выступа усиленной шероховатости для получения наилучшей эффективности (дополнительное гашение до 45...47% от полной удельной энергии) при проектировании средне-и низконапорных водосливных плотин.

Полученные результаты исследований, по компоновке элементов водопропускного тракта и укрепления его водосливной части искусственной шероховатостью, могут быть использованы при проектировании и реконструкции средне-и низконапорных водосливных плотин.

Предлагаемые Каньяругендо Леонидас результаты исследований приняты

ООО Научно-производственной фирмой «Берег» для использования их в проектном деле.

Директор ООО НПФ «Берег» *С.О. Курбанов* С.О. Курбанов



## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

## ЗАО «Бюро Сервиса и Эксплуатации» «BSM»

Закрытое акционерное общество

№06/1023 дата 18.10.2023

## СПРАВКА О ВНЕДРЕНИИ В ПРОИЗВОДСТВО РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Высокий спрос на воду для гидроэнергетики, промышленности, сельского хозяйства и бытовых нужд, а также для защиты территорий от негативных воздействий паводков часто принуждают возведение гидроузлов, в состав которых входят плотины, водозаборные сооружения и водосбросы. При этом, водосбросные сооружения придают потоку высокую кинетическую энергию. Скорость потока может оказаться выше допустимой для материала грунтового основания нижнего бьефа, или же ограничена в соответствии с назначением объекта.

Решение задачи – гашение избыточной энергии потока на ГТС не только обеспечивает безопасную эксплуатацию самого сооружения и прилегающей к нему территории, но и поддерживает экологическое состояние водного объекта в допустимых пределах.

Проведенные исследования Каньяругендо Леонидас рассматривали три вида донной ребристой искусственной шероховатости, и завершились с рекомендацией автора - применить искусственную шероховатость в виде двойных зигзагов на водосливной грани средне-и низконапорных водосливных плотин.

Учитывая значимость рассматриваемого вопроса для безопасности гидроузлов, применение искусственной шероховатости зигзагообразного типа на сливной грани может служить вариантом повышения надежности и безопасности работы низко- и средненапорных водосливных плотин и облегчить устройства нижнего бьефа.

Зам.Генерального директора



/Крупнов Н.В./