

На правах рукописи

КАНЬЯРУГЕНДО ЛЕОНИДАС

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

2.1.6. Гидротехническое строительство, гидравлика и инженерная гидрология

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2023 г.

Работа выполнена на кафедре гидротехнических сооружений ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева».

Научный руководитель: **Ханов Нартмир Владимирович**,
доктор технических наук, профессор, профессор
РАН, заведующий кафедрой гидротехнических
сооружений ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени
К.А. Тимирязева

Официальные оппоненты: **Косиченко Юрий Михайлович**,
доктор технических наук, профессор, главный
научный сотрудник гидротехнического отдела
ФГБНУ «Российский научно-исследовательский
институт проблем мелиорации»

Глотко Анна Владимировна,
кандидат технических наук, старший научный
сотрудник отдела гидрологии речных бассейнов
ФГБУН «Институт водных проблем Российской
академии наук»

Ведущая организация: ФГБНУ «Федеральный научный центр
гидротехники и мелиорации имени А.Н.
Костякова»

Защита состоится 26 декабря 2023 г. в 12:30 на заседании диссертационного совета 35.2.030.07, созданного на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет–МСХА имени К.А. Тимирязева», по адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, учебный корпус №28, аудитория 201, тел: 8 (499) 976-17-14.

Юридический адрес для отправки почтовой корреспонденции (отзывов):
127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Н.И. Железнова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» и на сайте Университета www.timacad.ru.

Автореферат разослан «___»_____ 2023 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета 35.2.030.07

кандидат технических наук, доцент

Н.Б. Мартынова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. При возведении 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 водоподпорные, 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.

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 усиленной искусственной шероховатости на ней и при наличии ее различных типов.

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 современное 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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится актуальность темы исследования и, на основе анализа ранее проведенных исследований, обоснована степень ее разработки, определены подходящие методы и методология исследования; изложены научная новизна и положения, выносимые на защиту, а также доказана достоверность и практическая значимость полученных результатов лабораторных исследований.

В первой главе рассматривается современное состояние вопроса гашения энергии потока в гидротехнике. Проводится обзорный анализ работ и исследований по гашению энергии потока на ГТС. Особое внимание уделяется исследованиям, которые изучали вопрос применения искусственной шероховатости.

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

$$Q = \omega \cdot C_{\text{сн}} \cdot \sqrt{R \cdot i} \quad (1)$$

где: Q – расход потока жидкости; ω – площадь живого сечения потока;
 $C_{\text{сн}} = \frac{1}{n} \cdot R^{1/6}$ – коэффициент Шези; n – коэффициент шероховатости; R – гидравлический радиус.

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

Обобщенный вид метода Замарина-Пикалова для уклона $i = 0,15$ представлена в виде формулы 2 для различных видов шероховатостей.

$$C_{\text{сн}} = \frac{1000}{A - E \cdot \alpha \pm D \cdot \beta} \quad (2)$$

где: A, E, D – опытные коэффициенты, зависящие от вида шероховатости;
 $\alpha = \frac{h}{\Delta}$; $\beta = \frac{B}{h}$.

Работы Е.А. Замарина и Ф.И. Пикалова были дополнены исследованиями О.М. Айвазяна (1962 г.), который расширил диапазон уклонов $0,05 < i < 0,57$ и предложил общий способ расчета быстротоков с ребристыми элементами сопротивления (рис.1) при шаге расстановки $\delta = 7 \dots 8\Delta$.

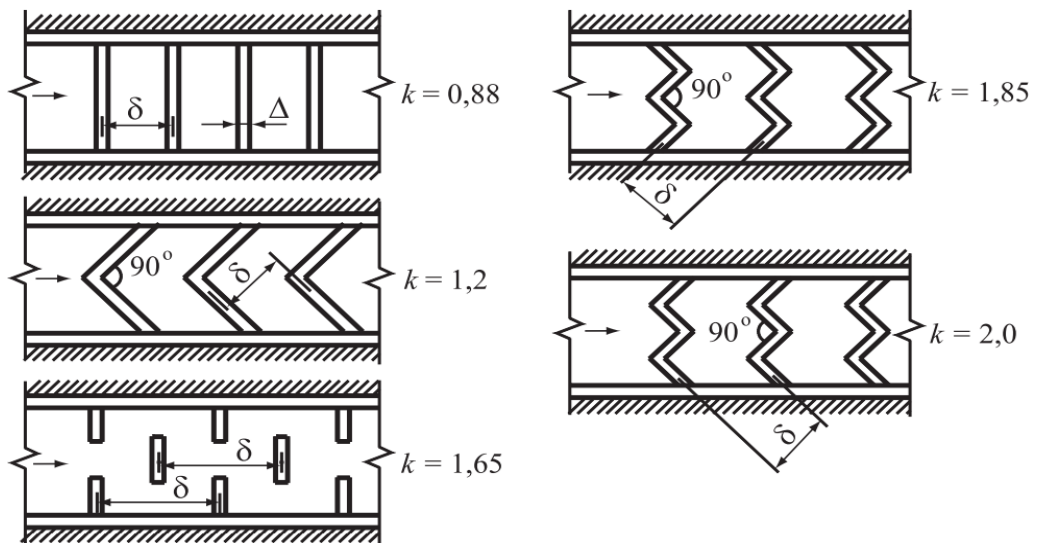


Рисунок 1 – Типы усиленной шероховатости, рассмотренные О.М.

Айвазяном

Айвазян предлагает формулу 3 для расчета быстротоков с ребристой искусственной шероховатостью:

$$\frac{8gRi_0\omega^2}{Q^2} = 0,04 + 2,29i_0^2 + ki_0^{0,1} \frac{\Delta}{R} \left(\frac{b}{\chi}\right)^2, \quad (3)$$

где: Q – расчетный расход; χ , ω 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); b – ширина лотка.

Следует отметить, что обычно рекомендуется проектировать ребристые донные элементы сопротивления квадратного сечения ($\Delta \times \Delta$), а способ расчета быстроток с донной ребристой искусственной шероховатостью, предложенный О.М. Айвазяном, справедлив при условно равномерном движении, при относительной глубине потока в три раза больше, чем высота искусственной шероховатости.

Зарубежные ученые также исследовали различные виды сопротивлений. В качестве примера в первой главе приведены научные достижения исследователей и исследовательских институтов из США, Китая, Индонезии, Франции, Южной Африки и Греции.

Большинство исследований, посвященных изучению ребристых элементов сопротивления, были проведены на быстроточах 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.

Во второй главе описываются экспериментальная установка, методика проведения исследований, используемое оборудование и измерительные приборы.

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. Схемы модельной установки и исследованных шероховатостей представлены на рисунках 2, 3 и 4.

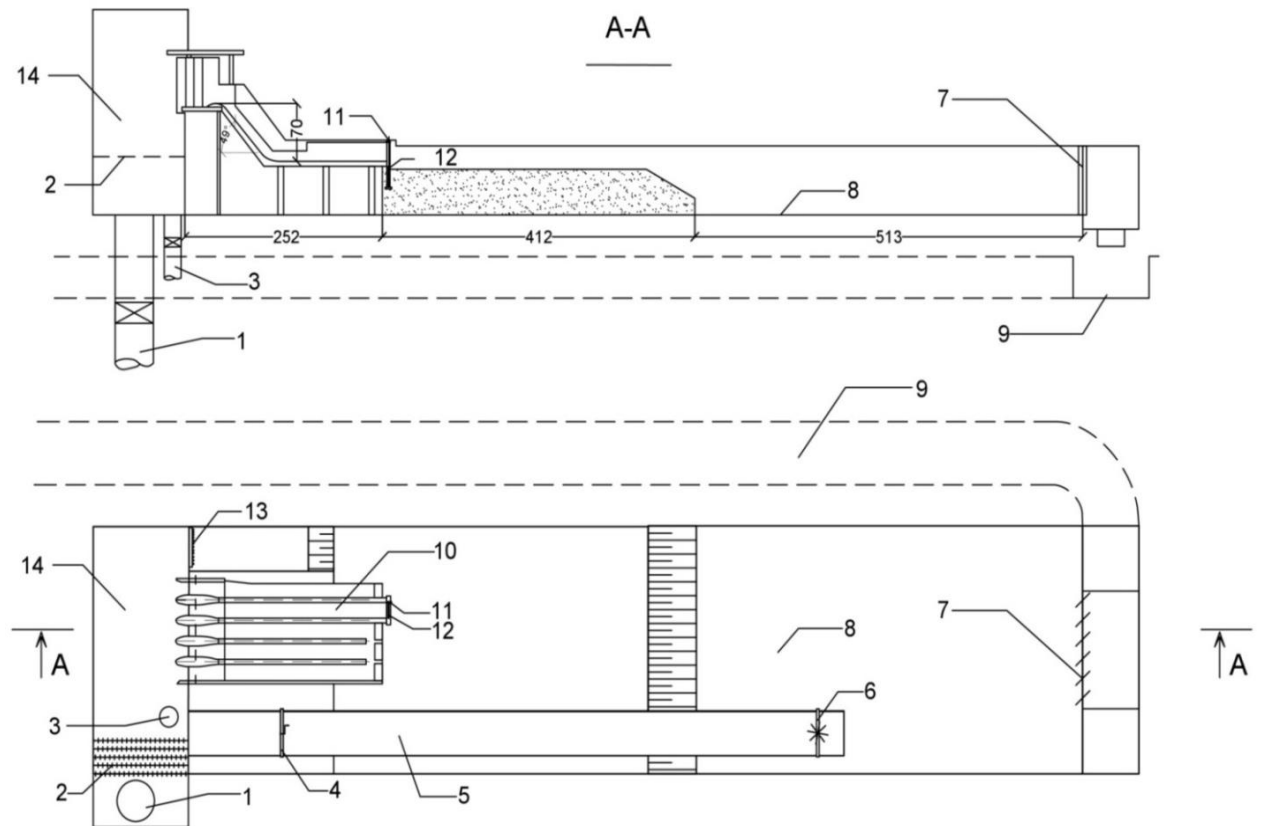


Рисунок 2 – Общий вид экспериментальной установки: 1 – подающая труба; 2 – решетки; 3 – сливной трубопровод; 4 – затвор; 5 – канал; 6 – подъёмный механизм для регулирования уклона канала; 7 – жалюзийный затвор; 8 – пространственный лоток; 9 – отводящий лоток; 10 – используемый пролет в опытах; 11 – подъемный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

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 (рис. 4). Водосливная грань была выполнена с углом наклона $49,6^\circ$ к горизонтальной плоскости, что дает уклон $i = 0,76$.

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 (рис. 3). 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.

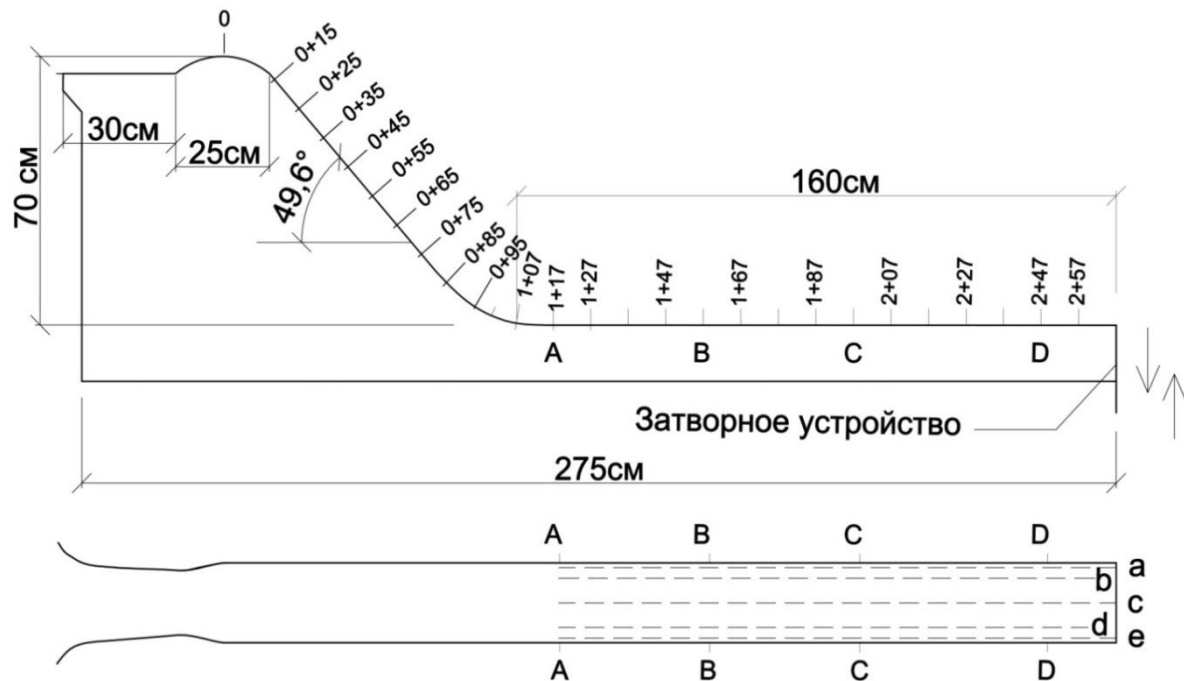


Рисунок 3 – Размеры основной части модельной установки

Расход воды, подаваемый на модель, измерялся с помощью стационарного ультразвукового расходомера Днепр-7. В соответствии с техническими характеристиками расходомера Днепр-7, пределы приведенной погрешности при преобразовании объемного расхода жидкости в выходной токовый сигнал составляли $\pm 1,5\%$. Местная скорость потока по выбранным сечениям была измерена трубкой Пито, прикреплённой к шпитценмасштабу. Точность трубки Пито составила 2...3%. Отметка свободной поверхности потока определилась отдельным шпитценмасштабом. Точность измерения глубины потока в нижнем бьефе составила 0,3...0,4 мм. Минимальная относительная ошибка при определении глубины потока в нижнем бьефе

составляла 0,63%, а максимальная – 1,88%. Исследования проводились для трех видов ребристой искусственной шероховатости (рис. 4).

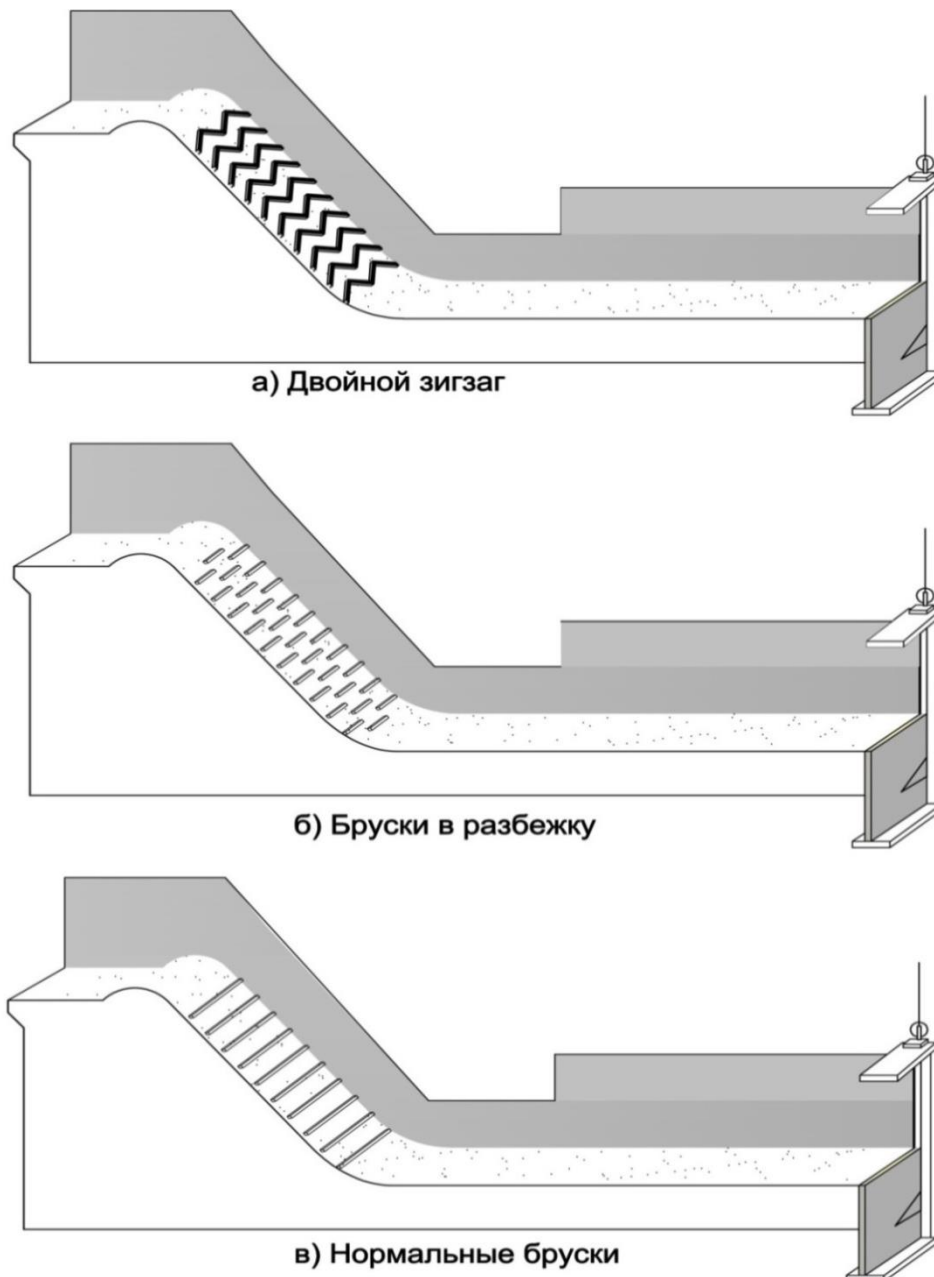


Рисунок 4 – Исследованные виды ребристой шероховатости

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

В третьей главе подробно описывается поэтапный ход лабораторных исследований с последующей их обработкой. Датчики ультразвукового расходомера «Днепр-7» были установлены на подающую трубу, что позволило

определить общий расход воды, подаваемый на модельный водослив и определить зависимость расхода от напора (рис. 5).

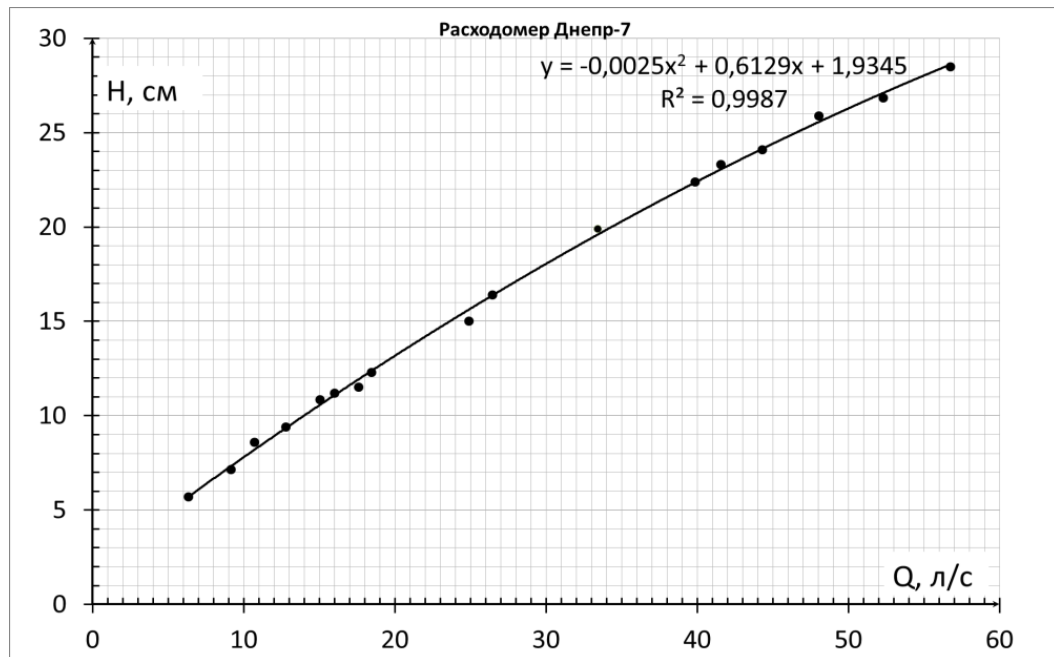


Рисунок 5 – Зависимость расхода водослива от напора

Рассматривались кинематические параметры потока на гладкой водосливной грани и при установке каждой из шероховатостей, представленных на рисунке 4, и оценивалось влияние искусственной шероховатости на амплитудно-частотные характеристики пульсации давления потока.

Исследования строительного периода водосброса №2 Богучанской ГЭС, выполненные под руководством проф. Н.В. Ханова и А.П. Гурьева на этом же экспериментальном лотке с линейным масштабом 1:60 установили, что зоны с максимальным давлением расположены в конце водоската - на криволинейном участке сопряжения наклонной сливной части водосброса с водобоем (рис. 6).

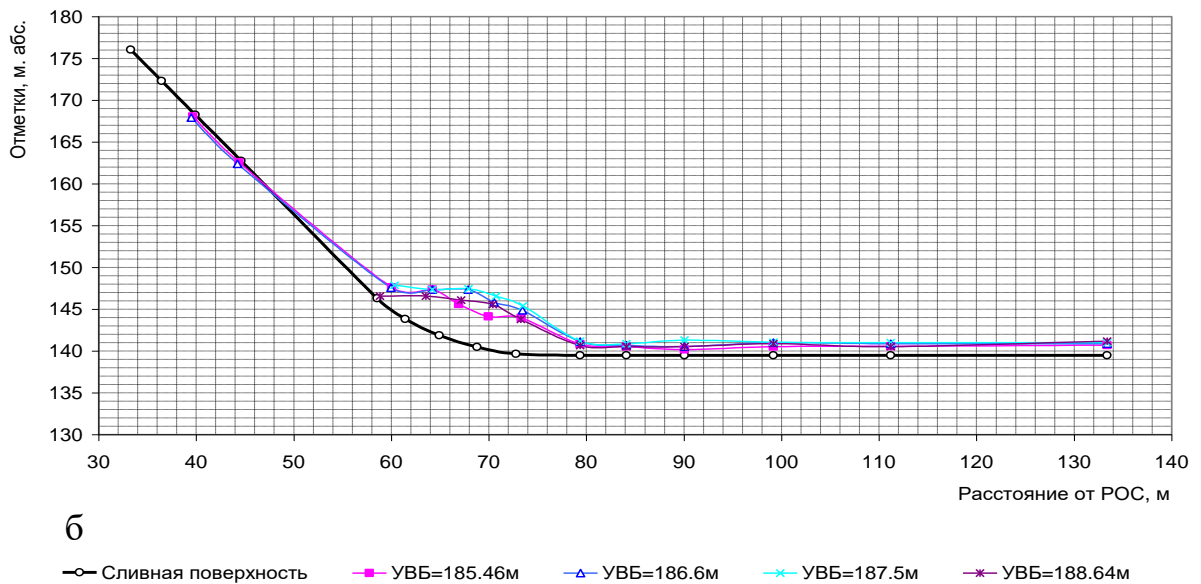
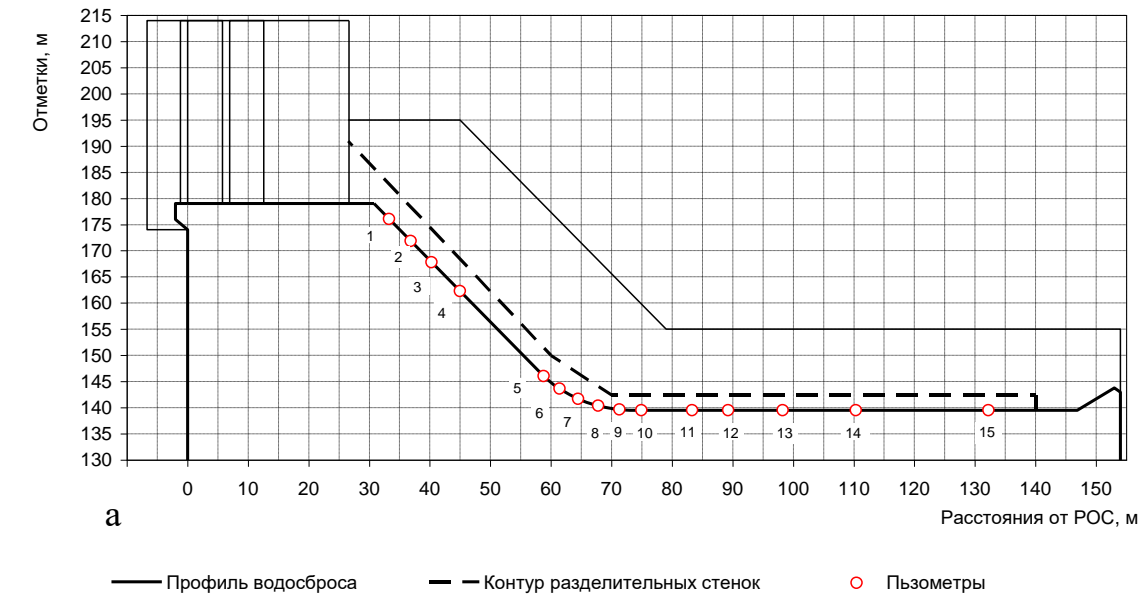
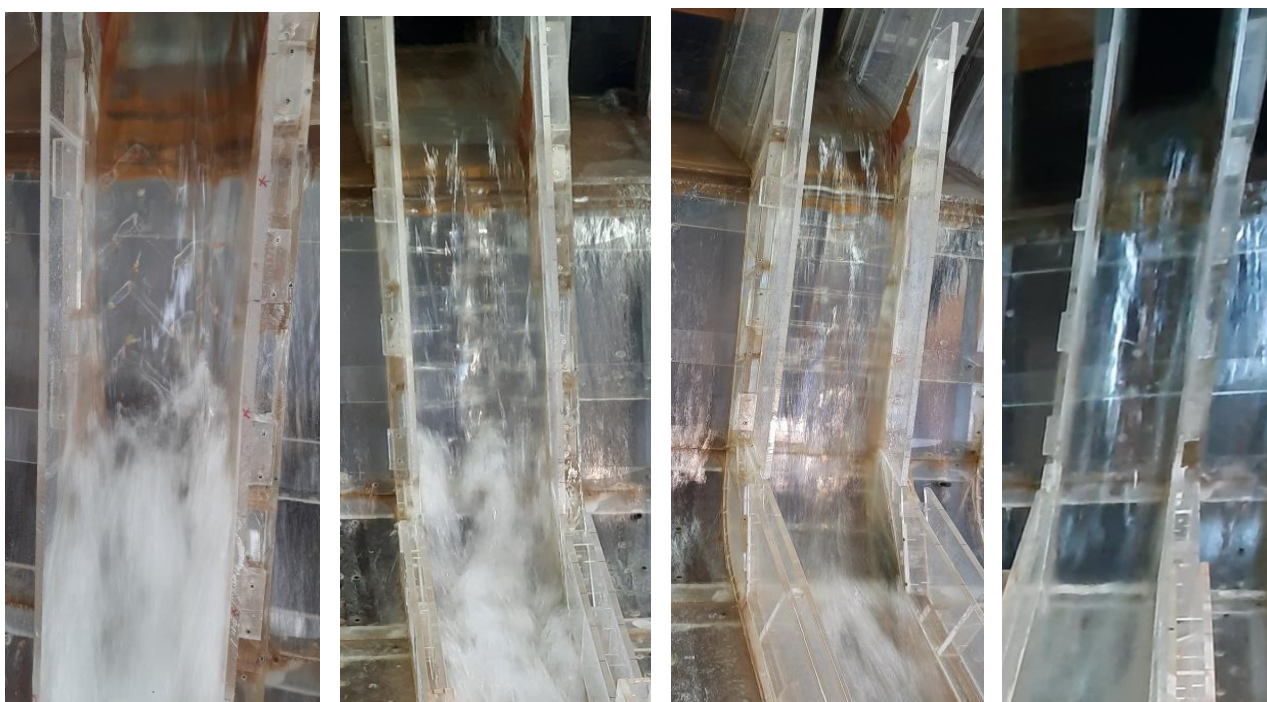


Рисунок 6 – Распределения осреднённого давления: а – размещение пьезометров; б - пьезометрическая линия на поверхности нижней грани водосброса при разных глубинах нижнего бьефа (натурные значения по Богучанскому гидроузлу)

Можно предположить, что интенсификация гашения основной части энергии на водоскатном участке, например, при установке усиленной шероховатости типа двойного зигзага, подробно исследованного в данной диссертационной работе, поможет понизить 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.

Для всех исследованных в данной диссертации ребер искусственной шероховатости, крепление на физической модели проводилось с шагом $\delta = 8\Delta$, где Δ – 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. На рисунке 7 приведены часть фотографий лабораторных опытов на модельной установке при разной конфигурации низовой грани.



а

б

в

г

Рисунок 7 – Истечение при удельном расходе $q=1650\text{см}^2/\text{с}$: а – двойной зигзаг; б – бруски в разбежку; в – нормальные бруски; г – гладкая грань

Полученные в отдельных сериях экспериментов результаты для рассмотренных видов шероховатости для сравнительного анализа приведены в четвертой главе.

В четвертой главе приводится анализ результатов. Оценивается влияние каждого типа шероховатости на сопряжение бьефов, на гидродинамические параметры потока и на коэффициент гашения избыточной энергии потока. Основные результаты приведены на рисунках 8 -15.

Для представления интегральной оценки эффективности исследованных шероховатостей, выполнялся анализ приведённых на рисунке 8 полученных эюр местных скоростей в середине поперечного створа D.

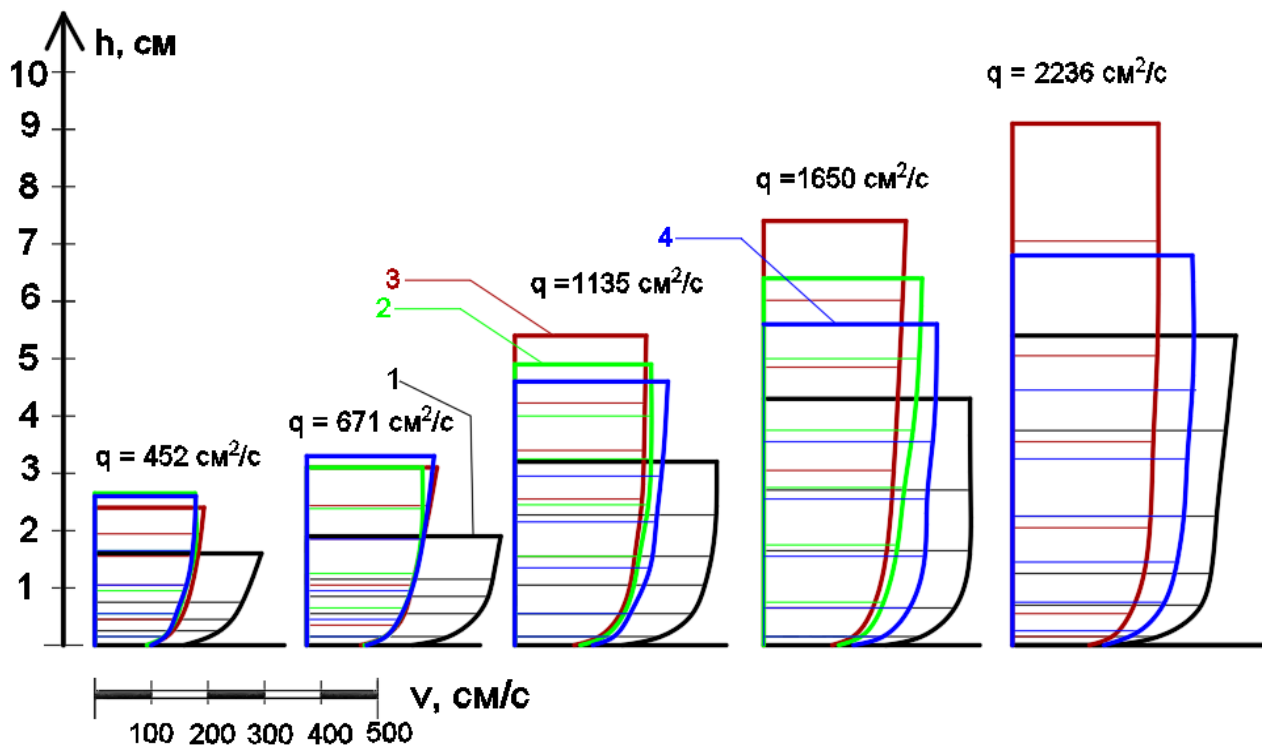


Рисунок 8 – Эюры местных скоростей в центральном продольном сечении «с» и поперечном створе D: 1 – гладкая грань, 2 – бруски в разбежку, 3 – двойной зигзаг, 4 – нормальные бруски

Самые большие значения скоростей наблюдаются при гладкой поверхности нижней 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. По закону сохранения энергии потока была построен график зависимости удельной энергии сечения от удельного расхода (рис. 9). Полная удельная энергия сечения определяется по зависимости:

$$E_0 = E_1 + \Delta E_1 = E_2 + \Delta E_2 = \dots = E_n + \Delta E_n = \left(\frac{\alpha V_n^2}{2g} + h_n \right) + \Delta E_n, \quad (4)$$

где: α – коэффициент кинетической энергии, $\alpha = 1$; E_0 – полная удельная энергия в верхнем бьефе относительно дна нижнего бьефа; E_n – удельная энергия сечения n ; H – напор без учета скорости подхода потока; H_0 – напор с учетом скорости подхода; ΔE_n – потери напора в поперечном створе n ; V_n – средняя скорость в сечении n ; h_n – глубина потока в сечении n .

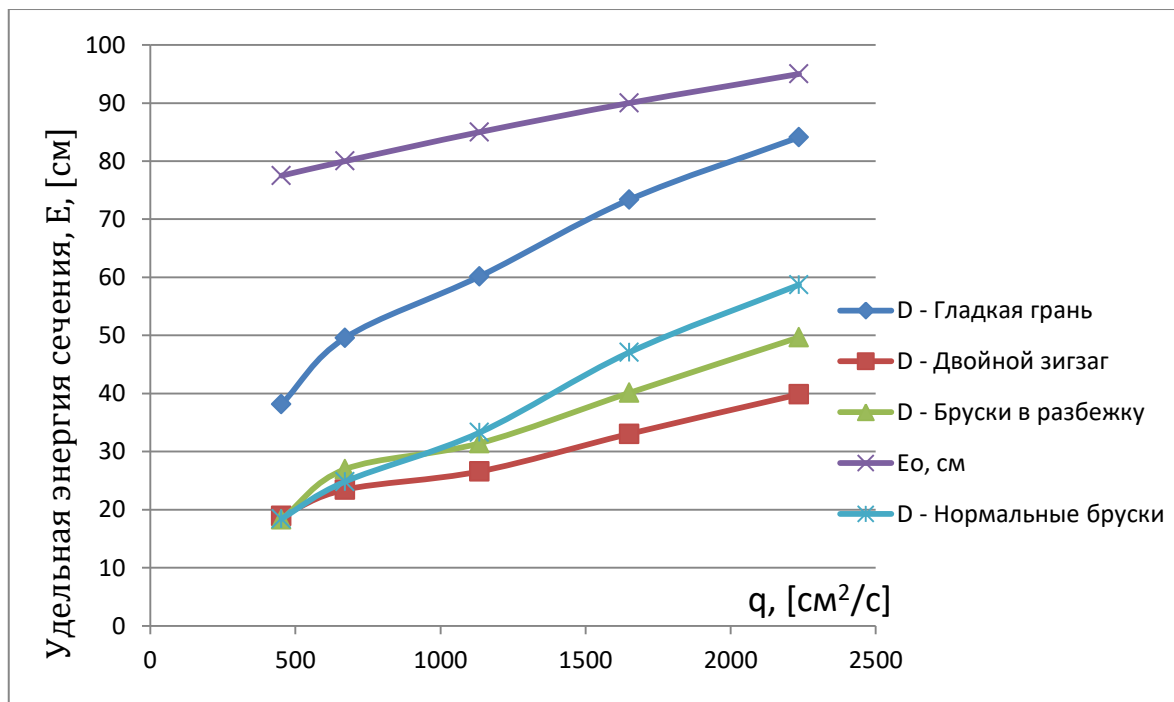


Рисунок 9 – Кривые изменения удельной энергии потока в сечении поперечного створа D при разных удельных расходах

Для оценки эффективности той или иной конструкции был определен коэффициент гашения энергии потока в поперечном створе D по зависимости:

$$k = \frac{\Delta E}{E_0} = \frac{E_0 - E}{E_0}. \quad (5)$$

Коэффициент гашения « k » представляет собой общий вид потери избыточной энергии на участке от входного оголовка до рассматриваемого сечения.

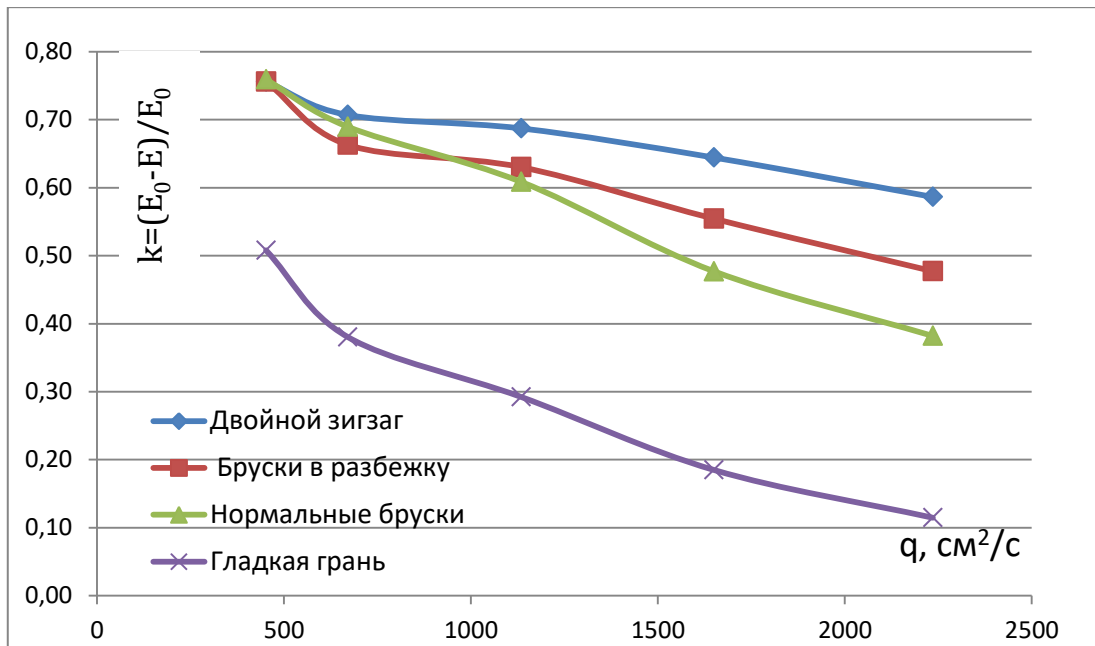


Рисунок 10 – Зависимость коэффициента гашения избыточной энергии « k » от удельного расхода и типа искусственной шероховатости

Для определения дополнительных потерь напора, полученных исключительно благодаря усиленной искусственной шероховатости ($k_{\text{ш}}$), следует вычесть коэффициент гашения, полученный при естественной шероховатости ($k_{\text{гладк.}}$):

$$k_{\text{ш}} = (k - k_{\text{гладк.}}). \quad (6)$$

Для обобщенной оценки влияния искусственной шероховатости на параметры потока, удельный расход был приведен в относительных единицах

$$\bar{q} = \frac{q}{P \cdot \sqrt{g \cdot \Delta}}, \quad (7)$$

где: P – высота водосливной плотины; Δ – высота ребер искусственной шероховатости, которая в данной диссертации была принята равной 1 см во всех опытах.

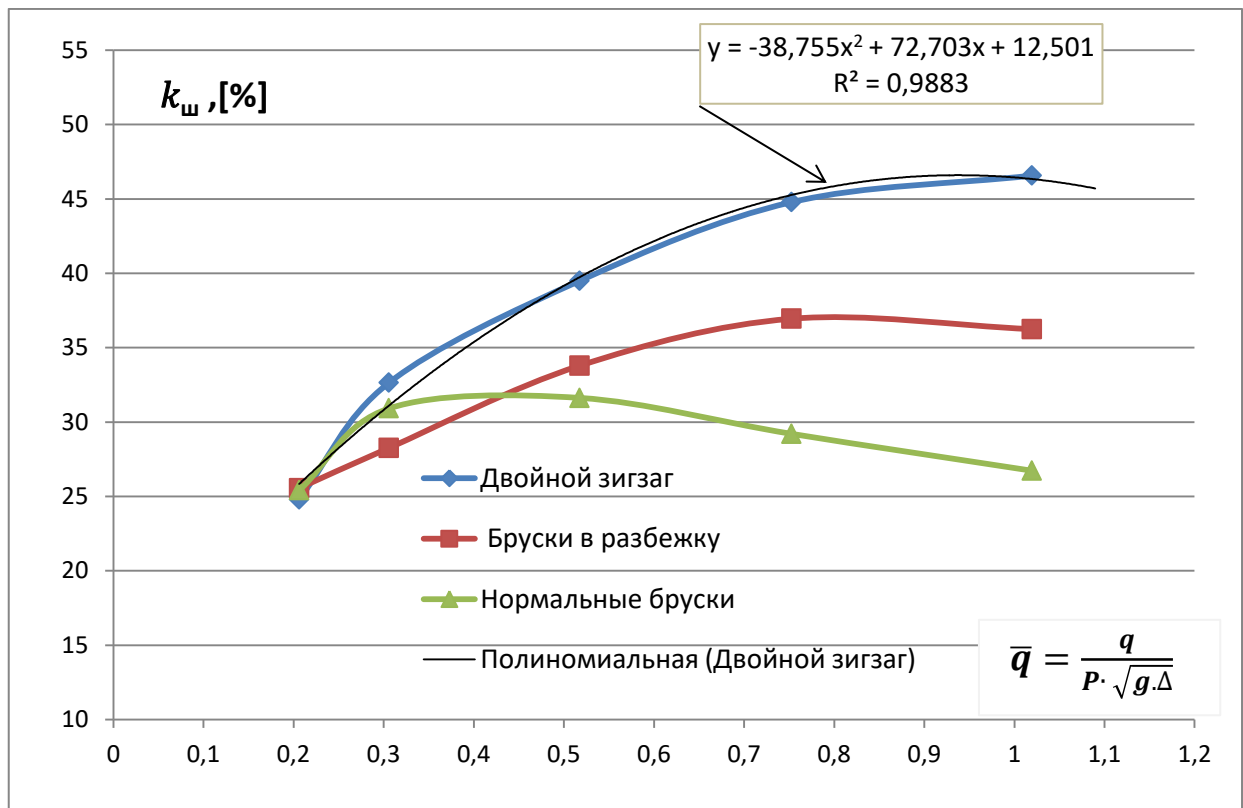


Рисунок 11 – Зависимость дополнительных потерь избыточной энергии потока $k_{ш}$ от относительного удельного расхода \bar{q}

На основании анализа рисунка 11 оценивалась эффективность каждого вида шероховатости, и определены границы наибольшего сопротивления. Установлено, что двойной зигзаг наиболее эффективный среди изученных ребристых элементов сопротивления, и создает дополнительные потери избыточной удельной энергии от 45 до 47% от E_0 . Соответственно при установке брусков в разбежку – 35 ... 37 %, а для нормальных брусков – 31 ... 32%.

Аппроксимирующее уравнение зависимости дополнительных потерь, создаваемых за счет искусственной шероховатости для двойного зигзага, имеет вид:

$$k_{ш} = -38,755(\bar{q})^2 + 72,703\bar{q} + 12,501. \quad (8)$$

Двойные зигзаги обеспечивают наилучшие результаты при

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

Оптимальная высота рёбер шероховатости в виде брусков в разбежку может быть определена по зависимости

$$\Delta = \frac{1,45 \cdot q^2}{P^2 \cdot g}, \quad (10)$$

для нормальных брусков

$$\Delta = \frac{3 \cdot q^2}{P^2 \cdot g}. \quad (11)$$

Влияние погашенной энергии потока на сливной грани на сопряжение бьефов оценивалось путем создания подпора в нижнем бьефе, таким образом, чтобы образовался гидравлический прыжок с началом в предельном положении. В этом случае, бытовая глубина равняется второй сопряженной глубине (рис. 12).

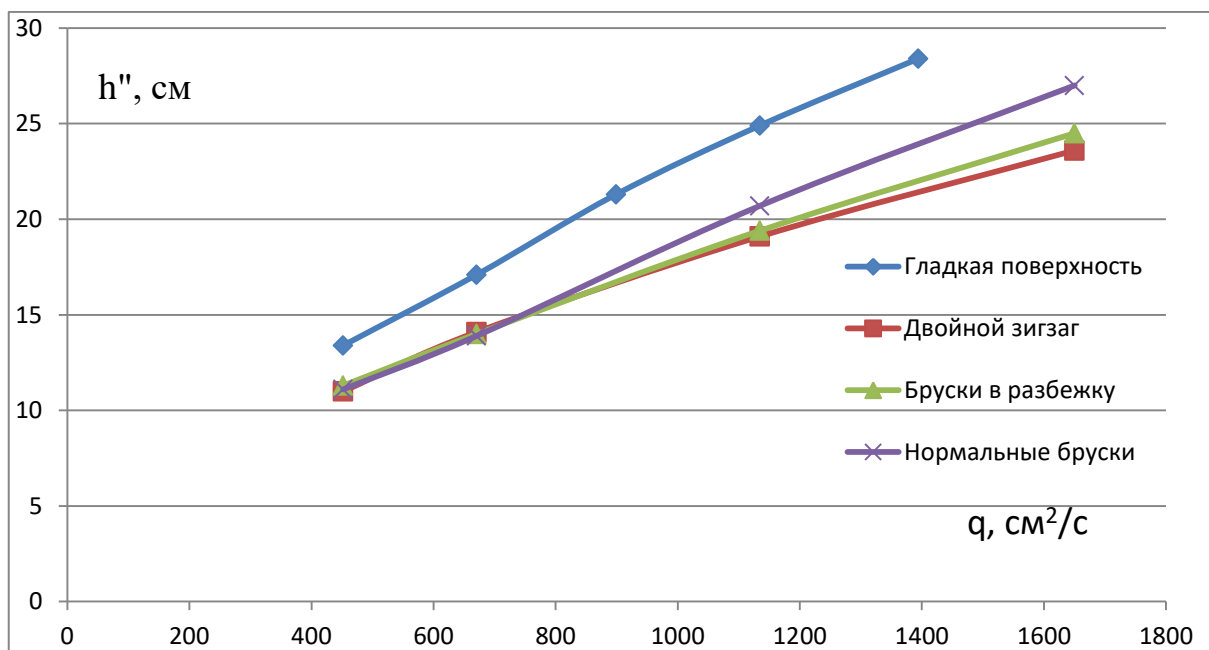


Рисунок 12 – Зависимость второй сопряженной глубины от удельного расхода водосливного пролёта при установке разных типов усиленной искусственной шероховатости на водоскате

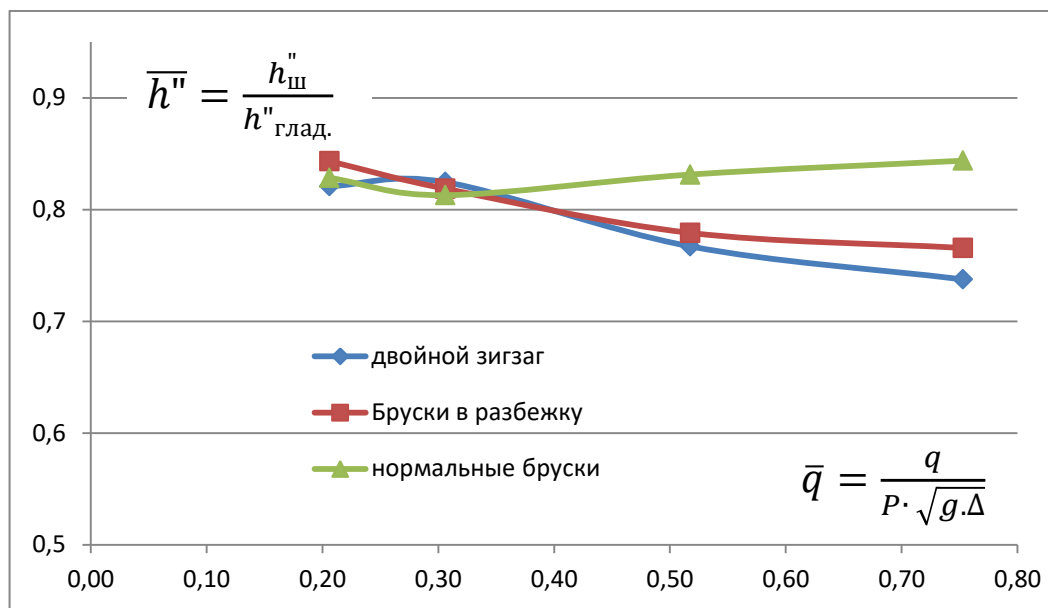


Рисунок 13 – Зависимость относительной второй сопряженной глубины от типа искусственной шероховатости

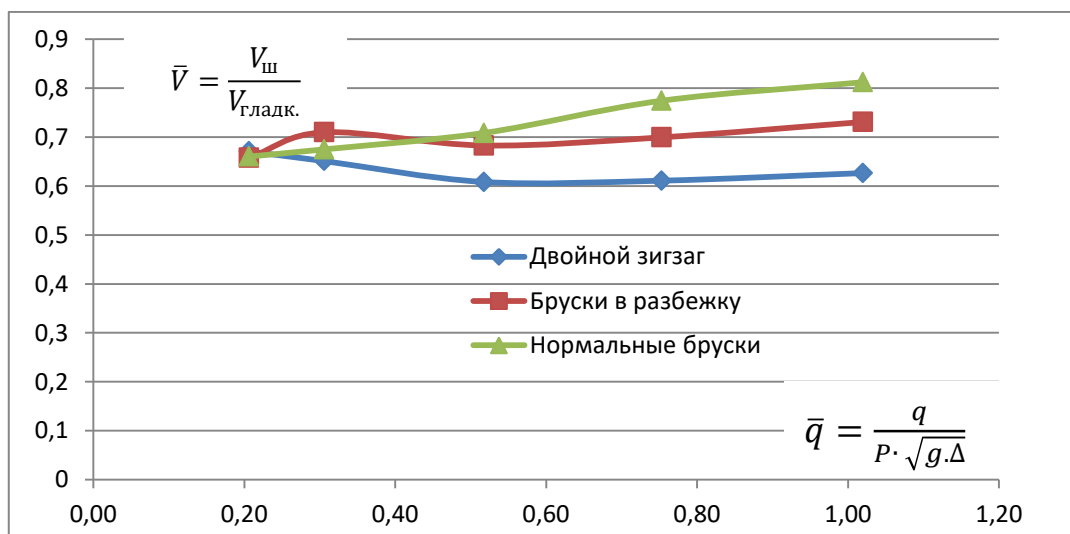


Рисунок 14 – Зависимость относительной скорости в поперечном створе D от типа искусственной шероховатости

Рёбрастая искусственная шероховатость представляет собой систему местных сопротивлений, в которую складываются внезапные расширения и сжатия потока по течению, более энергоёмкие, чем обычное трение жидкости. Наибольшая эффективность рёбер шероховатости зигзагообразного типа объясняется соударением поверхностных и донных струй между собой и с боковыми стенками (рис. 15).

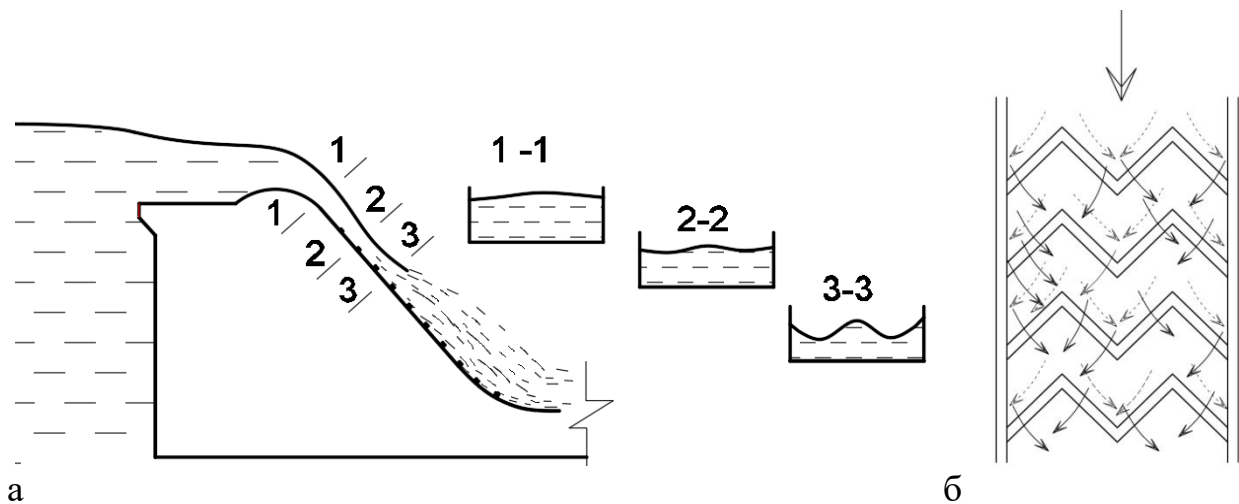


Рисунок 15 – Схемы движения потока при обтекании шероховатости зигзагообразного типа: а - продольный разрез и поперечные сечения водоската; б - соударение поверхностных и донных струй между собой и с боковыми стенками

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 быстотоках 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 гидродинамических 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 удельной энергии, а бруски в разбежку и нормальные бруски соответственно до 37% и 32%. Это позволяет уменьшить 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 характеристик 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), можно рекомендовать применение искусственной шероховатости в виде двойного зигзага, интенсивность работы которой 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 работ, опубликованных автором по теме диссертации

Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки РФ:

1. Каньяругендо Леонидас. Повышение эффективности гашения энергии потока в нижнем бьефе /Леонидас Каньяругендо, А.П. Гурьев, Н.В. Ханов // Природообустройство. – 2022. - №2. - С. 56-62.

2. Каньяругендо Леонидас. Оценка влияния зигзагообразной шероховатости на кинематические параметры потока /Леонидас Каньяругендо // Природообустройство. – 2023. - №3. – С. 85-91.

Публикации в других изданиях:

3. Каньяругендо, Леонидас Перспективы применения усиленной шероховатости в качестве гасителя энергии потока на низконапорных водосливах / Леонидас Каньяругендо // Международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 160-летию В.А. Михельсона. Сборник статей. Том 2, 2020, С. 362-366.

4. Каньяругендо Леонидас. Способы повышения эффективности гашения энергии в нижнем бьефе /Леонидас Каньяругендо, А.П. Гурьев, Н.В. Ханов // Всероссийская с международным участием научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 155-летию со дня рождения Н.Н. Худякова Сборник статей. Том 1 . С. 249-263.

5. Каньяругендо Леонидас. Гидравлическое сопротивление ребристых элементов усиленной шероховатости /Леонидас Каньяругендо, А.П. Гурьев, Н.В. Ханов // Международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 135-летию со дня рождения А.Н. Костякова. Сборник статей. Том 1, Москва 2022. С. 73-76.

6. Каньяругендо, Леонидас. Сопряжение бьефов бетонных плотин с учетом установки ребристых шероховатостей на водосливной грани / Леонидас Каньяругендо, Н.В. Ханов // Международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 180-летию со дня рождения К.А. Тимирязева. Москва, 2023. Сборник статей. Том 1, С. 32-35.